

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение: Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Синтез короткоживущих изотопов для половой стерилизации жуков-короедов

УДК 632.939.1:632.935.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ91	Полисадов Святослав Сергеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения материаловедения ИШНПТ	Пушкарев Александр Иванович	д.ф.-м.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

Со-руководитель (по разделу «Концепция стартап-проекта»)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ШИП	Рыжкова Марина Вячеславовна	д.э.н, профессор		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООТД ШБИП ТПУ	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника	Жгун Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

Томск – 2021 г.

Запланированные результаты обучения по ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий
ПК(У)-2	Способен работать в научном коллективе в качестве члена команды, а также руководить командой в соответствующей области знаний
ПК(У)-3	Способен самостоятельно проводить исследования
ПК(У)-4	Способен решать научные и инженерные задачи наукоемкого производства
ПК(У)-5	Способен выбирать серийные и проектировать новые объекты профессиональной деятельности
ПК(У)-6	Способен обеспечивать безопасную и эффективную эксплуатацию и работу научно-исследовательского и технологического оборудования

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение: Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ООП

_____ _____ Пушкарев А.И.
 (подпись) (дата) (Ф.И.О)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ91	Полисадову Святославу Сергеевичу

Тема работы:

Синтез короткоживущих изотопов для половой стерилизации жуков-короедов	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	№42-31/с от 11.02.2021

Срок сдачи студентом дипломной работы	11.06.2021
---------------------------------------	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Исходные данные к работе	Объект исследования – численное моделирование генерации нейтронов в D-T реакции, с последующим применением нейтронов в реакции синтеза короткоживущего изотопа фосфор 32
---------------------------------	--

	Исходными данными являются литературные данные, результаты при проведении НИР и прохождении практик.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Генерация нейтронов в D-D реакции; 2. Синтез короткоживущего изотопа фосфор-32 при облучении нейтронами мишени содержания природную серу-32; 3. Концепция стартап проекта; 4. Социальная ответственность.
Перечень графического материала	Документация к ускорителю ТЕМП-6
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Концепция стартап-проекта	д.э.н, профессор, Рыжкова Марина Вячеславовна
Социальная ответственность	к.т.н , Сечин Андрей Александрович
Иностранный язык	Ст. преп. Демьяненко Наталия Владимировна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Calculating the neutron yield	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения материаловедения ИШНПТ	Пушкарев Александр Иванович	д.ф.-м.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ91	Полисадов Святослав Сергеевич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Уровень образования: магистр
Отделение материаловедения
Период выполнения: весенний семестр 2020-2021 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.04.2021	Литературный обзор	35
01.05.2021	Расчетно-конструкторская часть	35
28.05.2021	Концепция стартап проекта	15
05.06.2021	Социальная ответственность	15
Итого		100 баллов

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения материаловедения	Пушкарев Александр Иванович	д.ф.-м.н., профессор		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения материаловедения	Пушкарев Александр Иванович	д.ф.-м.н., профессор		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 85 страниц, 21 рисунков, 19 таблиц, 59 литературных источников, 1 приложения.

Ключевые слова: D-D реакция, D-T реакция, нейтрон, дейтрон, изотоп, стерилизация, фосфор 32.

Объектом исследования является короткоживущий изотоп фосфор-32, применяемый в различных сферах жизнедеятельности.

Цель работы – разработка методики синтеза короткоживущего изотопа фосфор 32 для половой стерилизации жуков-короедов под действием β излучения.

В процессе исследования проводились расчеты и моделирования с использованием различных программных комплексов.

В результате исследования полученные результаты систематизированы.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

D-D реакция - генерация нейтронных пучков путем облучения ускоренными атомами дейтерия дейтронной мишени;

D-T реакция - генерация нейтронных пучков путем облучения ускоренными атомами трития дейтронной мишени;

МИП – мощный ионный пучок;

МРТ – магнитно-резонансная томография;

ЛПЭ – линейные потери энергии дейтрона;

КЦФ – колиммированный цилиндр Фарадея;

ПВА – первичного выбитый атом

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ	11
1.1 Ускоритель ТЕМП-6	11
1.2 Расчет выхода нейтронов	12
1.2.1 Выход нейтронов на один дейтрон	12
1.2.2 Выход нейтронов за импульс	15
1.2.3 Спектр протонов	15
1.2.4 Выход нейтронов за импульс	20
1.2.5 Выход нейтронов при иницировании атомами дейтерия.....	21
1.2.6 Выход нейтронов при облучении атомами дейтерия с учетом изменения энергии	23
1.3 Генерация изотопа фосфор-32	26
1.3.1 Расчет для тонкой мишени	26
1.3.2 Расчет для толстой мишени	27
1.3.3 Линейные потери энергии.....	28
1.3.4 Выход изотопа на нейтрон.....	31
1.4 Расчет поглощенной дозы	32
2. КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП ПРОЕКТА	36
2.1 Описание продукта как результата НИР	36
2.2 Интеллектуальная собственность.....	40
2.3 Объем и емкость рынка	42
2.4 Планируемая стоимость продукта.....	43
2.5 Анализ современного состояния рынка и перспектив развития отрасли	46
2.6 Конкурентные преимущества создаваемого продукта, сравнение технико-экономических характеристик с отечественными и мировыми аналогами.....	47
2.7 Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта	49
2.8 Стратегия продвижения продукта на рынок.	50
2.9 Бизнес-модель проекта. Производственный план	52
3. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	55
3.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	55
3.2 Производственная безопасность.....	57
3.2.1 Анализ вредных и опасных факторов производственной среды	58
3.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия вредных и опасных факторов на исследователя	64
3.3 Экологическая безопасность.....	64
3.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА	70
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	71
ПРИЛОЖЕНИЕ А	77

ВВЕДЕНИЕ

Жуки-короеды являются большой опасностью для леса. Эти вредители часто встречаются в России, они паразитируют на коре и в лубе древесины, поражая плодовые деревья, лиственные, и особенно хвойные: сосны, ели и кедры. Наибольший вред наносят личинки, так как они питаются древесиной все время, пока не окуклятся. Всего несколько личинок за год могут довести взрослое дерево до гибели.



Рисунок 1. Галереи союзного короеда

Недавнее обнаружение союзного короеда и очагов его массового размножения в Западной Сибири, почти в 4 тыс. км от известных местонахождений в европейской части России, свидетельствует о появлении нового фактора деградации сибирских кедровых лесов [36]. Очаги размножения союзного короеда сформировались в Кемеровской и Томской областях в припоселковых кедровниках. Они являются особо ценными лесами, выполняя функции орехово-промысловых зон, территорий традиционного природопользования местного населения, недревесными пищевыми ресурсами, генетических резерватов кедра сибирского. Повреждённые припоселковые кедровники – это огромная экологическая и серьёзная социально-экономическая проблема, поскольку эти насаждения не относятся к естественно возобновляемым лесам. Такой сложный статус насаждений, с одной стороны,

требует повышенного внимания к защите от вредных организмов, а с другой стороны – значительно ограничивает возможности применения лесозащитных мероприятий.

Для уничтожения жуков-короедов используют следующие методы [37]:

1. Вырубка и уничтожение зараженных деревьев;
2. Применение инсектицидов;
3. Феромонные ловушки;
3. Половая стерилизация жуков-короедов.

Вырубка и уничтожение зараженных деревьев не обеспечивает полное уничтожение жуков и их личинок. Применение инсектицидов очень дорого и приводит к обработке соседних деревьев, кустарников, насекомых, птиц и др. Феромонные ловушки показали низкую эффективность. При половой стерилизации на специальных биофабриках-инсектариях выращивают большое число личинок насекомого-вредителя [38]. После окукливания насекомых собирают и подвергают интенсивному гамма-облучению с дозой, приводящей к устойчивой стерилизации самцов. Нарботанных стерильных самцов выпускают на территориях естественного обитания насекомых этого вида. Эта технология также очень дорогостоящая и требует много времени. В целом опыт борьбы с союзным короедом оказался неудачным [38]. Об этом свидетельствует не только продолжение гибели деревьев от вредителя в очагах, но и его прогрессирующее распространение в сопредельных кедровых насаждениях, которое ещё можно было бы задержать выборочной рубкой заселенных и выкладкой ловчих деревьев, своевременной разработкой ветровала, бурелома и снеголома.

Для половой стерилизации жуков-короедов предлагается использовать радиационное излучение, которое формируется при распаде короткоживущих изотопов. Водорастворимые молекулы, в состав которых входят короткоживущие изотопы, вводятся в ствол дерева и при сокодвижении перемещаются по стволу к кроне.

Изотопы, это разновидность атомов какого-либо химического элемента, которые имеют идентичный атомный номер, но разные массовые числа. Изотопы одного элемента имеют одинаковый заряд ядра, отличаясь лишь числом нейтронов.

Изотопы разделяются на стабильные (устойчивые) и радиоактивные. Стабильные могут находиться в основном состоянии длительное время, когда радиоактивные подвержены самопроизвольному превращению в другие ядра с испусканием различных частиц. Также изотопы условно делятся на короткоживущие ($T_{1/2} < 10$ суток) и долгоживущие ($T_{1/2} > 10$ суток). Период полураспада ($T_{1/2}$) - промежуток времени, в течении которого число радиоактивных ядер уменьшается вдвое.

Изотопы широко применяются в медицине (магнитно-резонансная томография (МРТ) ,диагностика заболеваний, радиоиммунный анализ, радиационная стерилизация медицинского оборудования и др.) ,ядерной энергетике (обогащение урана), биологии (исследование процессов биосинтеза, обмена веществ, изучение структуры и функций сложных биологических молекул и др.) ,сельском хозяйстве (разведение высококачественных, хорошо адаптированных к местным условиям и устойчивых к болезням сельскохозяйственных и садовых растений с помощью радиационно-индуцированных мутаций, борьба с вредными насекомыми путём их стерилизации или генетического изменения с помощью излучения, уменьшение потерь урожая с помощью облучения и др.) а также во многих других сферах жизни.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

1.1 Ускоритель ТЕМП-6

Расчет интегрального выхода нейтронов проводили по результатам экспериментов по генерации протонов и ускоренных атомов водорода. Эксперименты проводили на ускорителе ТЕМП-6 [2, 3], который состоит из генератора Маркса, двойной формирующей линии и вакуумного ионного диода с магнитной самоизоляцией электронов. Схема диодного узла приведена на Рисунке 2.

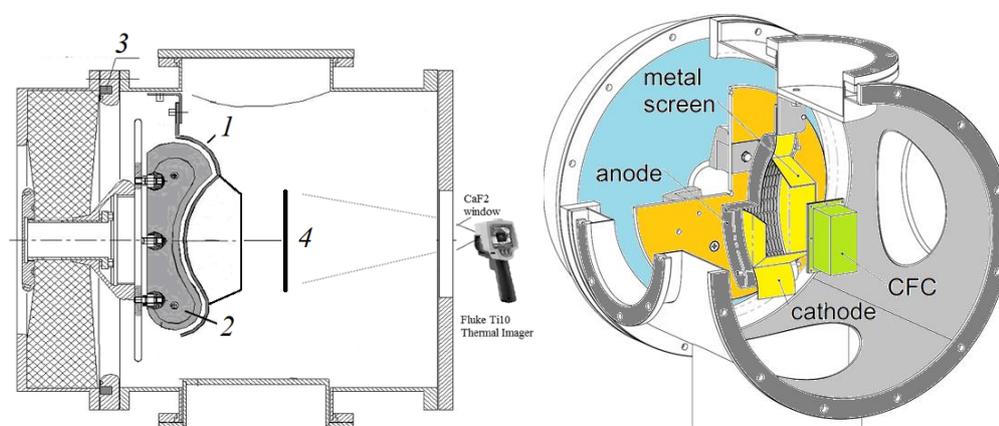


Рисунок 2 – Схема диодного узла ускорителя ТЕМП-6 (1 - катод, 2 - анод, 3 - пояс Роговского, 4 - мишень)

Анод полуцилиндрической фокусирующей конфигурации выполнен из нержавеющей стали, имеет радиус 14 см, длину 20 см и ширину 10 см. Катод изготовлен из металлической полосы шириной 5 см, длиной 25 см и толщиной 2 мм с радиусом изгиба 13 см. Катод имеет пазы размером 0.4×2 см² и прозрачность 70%. Конструкция и режим работы диода более подробно рассмотрены в статье [4].

1.2 Расчет выхода нейтронов

В данном разделе представлен расчет выхода нейтронов в D-T реакции при облучении дейтронами и атомами дейтерия мишени из $TiTi_2$:



1.2.1 Выход нейтронов на один дейтрон

Для толстой мишени выход нейтронов в D-T реакции на один дейтрон с энергией E на единичном пути (в пределах которого $\sigma \approx \text{const}$) равен [5]:

$$\frac{dY_1}{dx} = n \cdot \sigma_{DT}(E), \text{ см}^{-1} \quad (1)$$

где n – плотность атомов трития в мишени $TiTi_2$, см^{-3} ; $\sigma_{DT}(E)$ – сечение D-T реакции, см^2 .

Соотношение (1) можно записать в следующем виде:

$$dY_1 = n \cdot \sigma_{DT}(E) dx = \frac{n \cdot \sigma_{DT}(E)}{dE / dx} dE, \text{ neutrons} \quad (2)$$

где dE/dx – линейные потери энергии дейтрона (ЛПЭ) в мишени, эВ/см .

После интегрирования соотношения (2) получим для однородной мишени:

$$Y_1(E) = n \int_0^{E_{\max}} \frac{\sigma_{DT}(E)}{dE / dx} dE, \text{ neutrons} \quad (3)$$

$$Y_1(E) = \frac{9.2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3} \cdot 10^{-24} \text{ см}^2 \cdot 10^3 \text{ эВ}}{10^8 \text{ эВ/см}} \int_0^{E_{\max}} \frac{\sigma_{DT}(E)}{dE / dx} dE = 9.2 \cdot 10^{-7} \int_0^{E_{\max}} \frac{\sigma_{DT}(E)}{dE / dx} dE,$$

На Рисунок 1 приведены экспериментальные значения сечения реакции $T(d,n){}^4He$ [6].

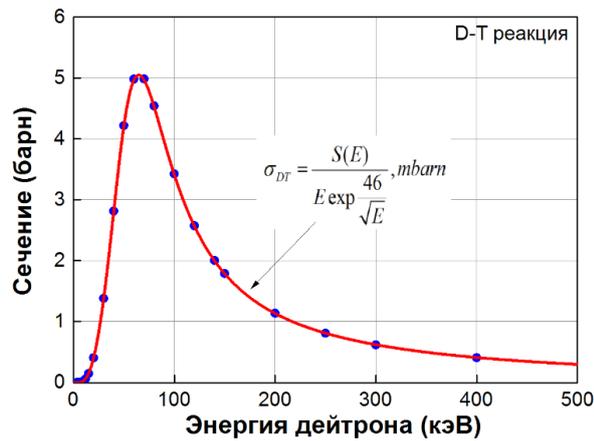


Рисунок 1 – Зависимость сечения D-T реакции от энергии дейтрона (1 барн равен 10^{-24} см²)

Сечение D-T реакции в дальнейшем рассчитывали по соотношению [7]:

$$\sigma_{DT} = \frac{S(E)}{E \exp \frac{46}{\sqrt{E}}}, \text{ barn} \quad (4)$$

где E - энергия дейтрона в кэВ.

$$S = \frac{6.97 \cdot 10^4 + 7.45 \cdot 10^8 \cdot E + 2.06 \cdot 10^6 \cdot E^2 + 5.2 \cdot 10^4 \cdot E^3}{1 + 63.8 \cdot E - 0.995 \cdot E^2 + 6.98 \cdot 10^{-5} \cdot E^3 + 1.73 \cdot 10^{-4} \cdot E^4}$$

Количество атомов трития в 1 см³ мишени равно:

$$n = \frac{f \cdot \rho \cdot N_A}{m} = \frac{2 \cdot 4.12 \cdot 6 \cdot 10^{23}}{53.8} = 9.2 \cdot 10^{22}, \text{ cm}^{-3} \quad (5)$$

где ρ - плотность материала мишени, г/см³; f - коэффициент стехиометрии мишени, $N_a = 6.02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹, m – масса в а.е.м.

При $f = 1$ по соотношению (5) мы рассчитываем количество молекул TiT₂ в 1 см³ мишени. Тогда количество атомов трития в 1 см³ мишени TiT₂ в 2 раза больше, $f = 2$. Результаты расчетов концентрации атомов трития в мишени представлены в Таблица 1.

Таблица 1. Количество атомов в 1 см³ мишени

Мишень	ρ , г/см ³	m , а.е.м	f	A , см ⁻³
TiH ₂	3.76	47.8+2=49.8	2	$9.1 \cdot 10^{22}$
TiD ₂	3.94 [8]	47.8+4=51.8	2	$9.1 \cdot 10^{22}$

TiT ₂	4.12	47.8+6=53.8	2	9.2·10 ²²
Сера S-32	2.07	32	1	3.9·10 ²²

На Рисунок 2 показаны линейные потери энергии дейтрона в мишени из дейтерированного титана. Расчет выполнен по программе SRIM [9].

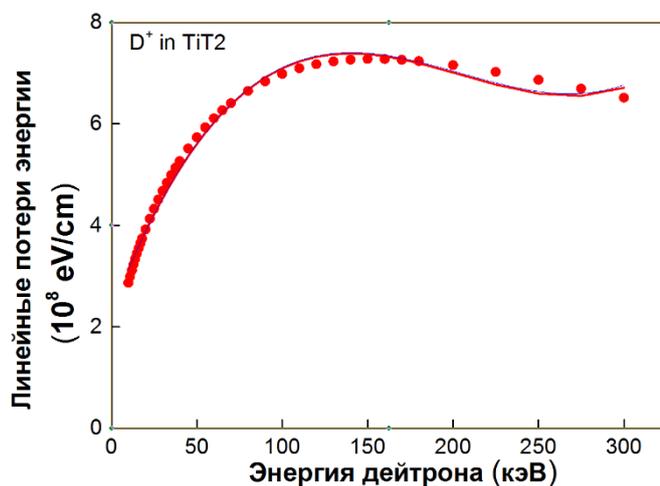


Рисунок 2 – Линейные потери энергии дейтрона в мишени TiT₂. Расчет по программе SRIM (точки) и аппроксимация полиномом третьей степени (линия)

Расчет ЛПЭ дейтрона в мишени TiT₂ выполняли в дальнейшем по соотношению:

$$\frac{dE}{dx} = 10^8 \cdot [2.3 + 0.088 \cdot E - 4.78 \cdot 10^{-4} \cdot E^2 + 7.79 \cdot 10^{-7} \cdot E^3], eV / cm \quad (6)$$

Результаты расчета выхода нейтронов на один дейтрон в D-T реакции по соотношению (3) показаны на Рис. 3.

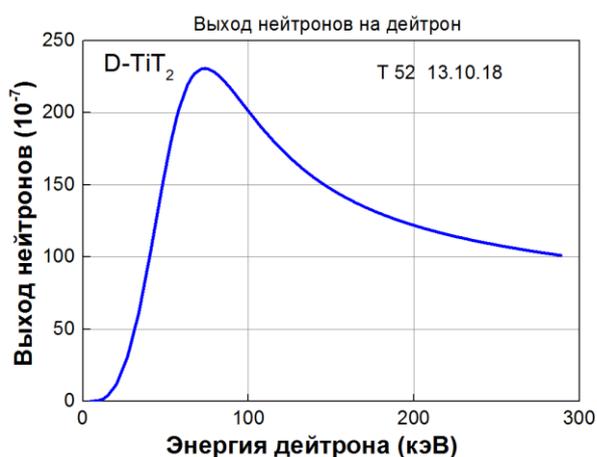


Рис. 3. Зависимость количества нейтронов на один дейтрон (суммарный выход в D-T реакции) от энергии дейтрона

1.2.2 Выход нейтронов за импульс

Для немонотонного импульсного пучка дейтронов полное количество нейтронов в D-T реакции за импульс равно:

$$Y_{puls1} = \int_0^{E_{max}} Y_1(E) \cdot N_D(E) dE, \text{ neutrons} \quad (7)$$

где $Y_1(E)$ – выход нейтронов на один дейтрон с энергией E в D-T реакции, $N_D(E)$ – количество дейтронов с энергией E за импульс (спектр дейтронов).

1.2.3 Спектр протонов

На Рисунок 4 показаны осциллограммы ускоряющего напряжения и плотности ионного тока, коллимированный цилиндр Фарадея (КЦФ) расположен на расстоянии 13 см от диода, в фокусе. На Рисунок 4 показана также плотность тока протонов, рассчитанная по времяпролетной диагностике [10].

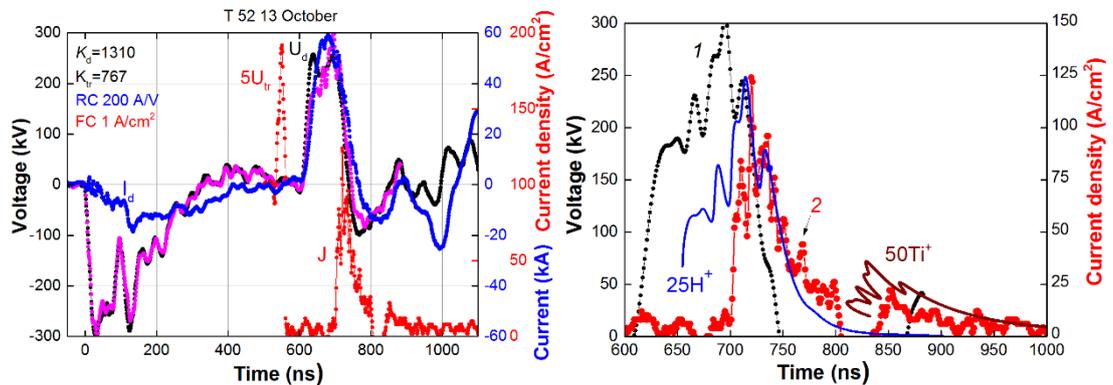


Рисунок 4 – Осциллограммы ускоряющего напряжения, полного тока в диоде, экспериментальные (точки) и рассчитанные по времяпролетной диагностике (линии) значения плотности ионного тока

Спектр импульсного пучка электронов можно корректно рассчитать по осциллограммам ускоряющего напряжения и электронного тока [11]. Однако расчет спектра всех ионов в ионном пучке невозможен из-за влияния низкоэнергетичных электронов. Для эффективной транспортировки и фокусировки ионного пучка необходимо обеспечить его зарядовую компенсацию электронами для предотвращения рассыпания в результате

кулоновского расталкивания. Но при измерении ионного тока с помощью цилиндра Фарадея (ЦФ) необходимо удалить тепловые электроны из ионного пучка. Для этого используют поперечное магнитное поле, которое проникает в плазму на глубину скин-слоя. Скин-слой нейтрализованного электронами мощного ионного пучка (МИП), формируемого ускорителем ТЕМП-6, составляет 4-6 мм [12] при диаметре МИП 5 см и удалить все электроны невозможно. Поэтому необходимо использовать коллимирующее отверстие, в которое проникает часть исследуемого пучка частиц и попадает на коллектор ЦФ. Диаметр отверстия в ЦФ с магнитной отсечкой не должен превышать 3-5 мм для эффективного удаления всех электронов.

Расчет по осциллограмме плотности ионного тока является прямым методом измерения спектра МИП, но содержит систематические погрешности. При измерении плотности ионного тока в фокусе диода из-за низкой скорости дрейфа ионов появляется значительная задержка осциллограммы плотности ионного тока относительно осциллограммы ускоряющего напряжения, см. Рисунок 4, что вносит погрешность в расчет спектра ионов. Кроме того, ионы, которые формируются при большом ускоряющем напряжении ($U > 150$ кВ), на пути дрейфа до КЦФ догоняют медленные ионы, которые формируются в течение переднего фронта импульса напряжения, см. Рисунок 4, кривая 3 ($570 \text{ нс} < t < 640 \text{ нс}$), что также вносит погрешность в расчет спектра ионов.

Погрешности расчета спектра ионов по осциллограмме плотности ионного тока можно устранить при расчете спектра по одномерному соотношению Child-Langmuir (1-D CL) [13]. В режиме ограничения ионного тока зарядом ионов в А-К зазоре, с учетом уменьшения А-К зазора из-за расширения анодной плазмы и эффекта плазменной эрозии при изменении полярности ускоряющего напряжения [14] плотность ионного тока в фокусе диода равна:

$$j(t) = \frac{4K_0 \varepsilon_0 \sqrt{2z}}{9\sqrt{m_i}} \cdot \frac{U^{3/2}}{[d_0 - v_a(t - t_0)]^2}, \text{ A/cm}^2 \quad (8)$$

где m_i и z - масса и заряд иона соответственно; v_a - скорость расширения анодной плазмы; t_0 - момент изменения полярности ускоряющего напряжения ($t_0 = 600$ нс на Рисунок 4); K_0 – коэффициент, учитывающий усиление плотности ионного тока по сравнению с 1-D CL и фокусировку МИП.

Значение коэффициента K_0 определяли из сравнения расчетной плотности ионного тока с экспериментальными данными (см. Рисунок 4), в расчетах он был постоянным в течение импульса.

При расчете интегрального спектра ионов в программе OriginPro 9.0 [15] строили зависимость плотности ионного тока от ускоряющего напряжения, затем в электронной таблице сортировали синхронно значения ускоряющего напряжения и плотности тока в порядке увеличения напряжения («Sort columns/ascending»). В дальнейшем интегрировали плотность ионного тока по ускоряющему напряжению, что позволило суммировать ионы с одинаковой энергией, которые генерируются в течение переднего и заднего фронтов импульса. Затем пересчитывали плотность заряда ионов на их флюенс и строили интегральную зависимость флюенса ионов от их энергии (интегральный спектр).

Результаты расчета интегрального спектра ионов для данных (Рисунок 4) показаны на Рисунок 5. Расчет выполнен по плотности ионного тока, поэтому спектр соответствует флюенсу ионов с определенной энергией. Дифференцирование интегрального спектра позволяет получить распределение флюенса протонов по энергии в пучке (дифференциальный спектр), см. Рисунок 5.

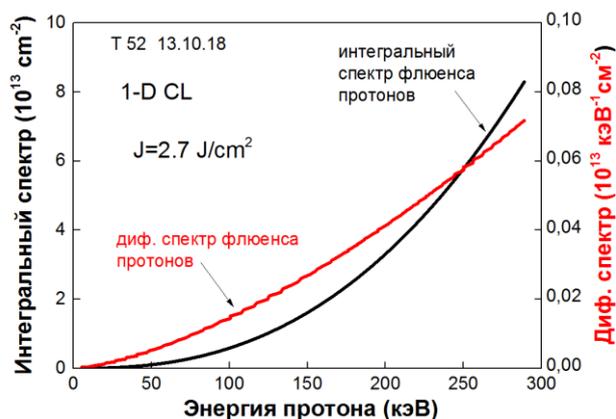


Рисунок 5 – Интегральный и дифференциальный спектры флюенса ионов

Для расчета полного спектра ионов в ионном пучке рассчитаем плотность энергии МИП по дифференциальному спектру флюенса ионов. Для этого в программе OriginPro 9.0 выполним численное интегрирование произведения дифференциального флюенса ионов на энергию ионов по всем энергиям ионов в пучке. Для данных (Рисунок 5) плотность энергии составила 2.7 Дж/см². Результаты измерения плотности энергии МИП показаны на Рисунок 6.

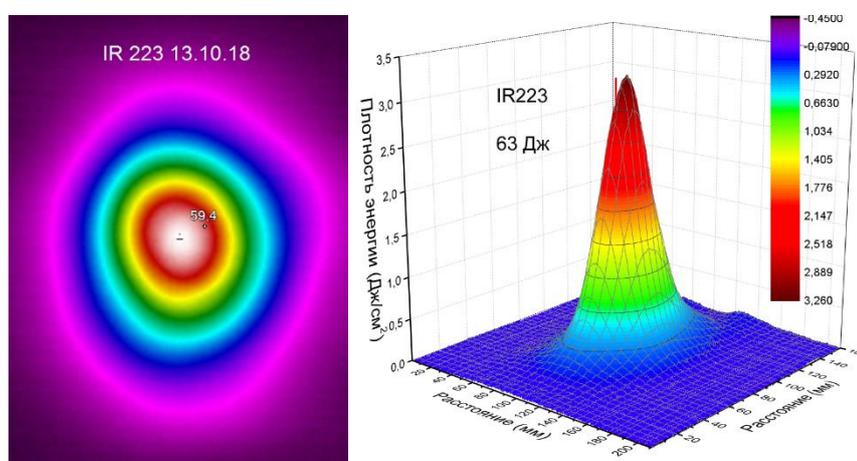


Рисунок 6 – Термограмма МИП и распределение плотности энергии в фокусе

Плотность энергии МИП рассчитывали по соотношению [16]:

$$q_{\text{exp}}(x, y) = K_1 K_2 K_3 c_v d \rho \Delta T(x, y), \quad J / \text{cm}^2 \quad (9)$$

,где c_v - удельная теплоемкость материала мишени; d и ρ - толщина и плотность мишени; ΔT - изменение температуры мишени после облучения; K_1 - коэффициент прозрачности оптического окна; K_2 – коэффициент, учитывающий вклад радиационных дефектов в погрешность тепловизионной диагностики [17, 18]; K_3 - коэффициент, учитывающий вклад абляции материала мишени в погрешность тепловизионной диагностики [Ошибка! Закладка не определена].]

K_1 равен 1.4 для окна из BaF_2 толщиной 8 мм, K_2 равен 1.22 для мишени из нержавеющей стали, K_3 зависит от плотности энергии МИП и описывается аппроксимирующей функцией [Ошибка! Закладка не определена].

Для экспериментальных данных на Рисунок 5 плотность энергии МИП, рассчитанная по результатам времяпролетной диагностики (для протонов), составляет 2.7 Дж/см², что на 20% меньше результатов тепловизионной диагностики (см. Рисунок 6). Расхождение связано с регистрацией тепловизионной диагностикой нагрева мишени ионами и ускоренными атомами, образованными при перезарядке ионов [19].

Полная энергия пучка протонов (интеграл плотности энергии МИП по сечению, см. Рисунок 6) составляет 63 Дж. Тогда полный спектр ионов в пучке можно рассчитать по дифференциальному спектру флюенса ионов (см. Рисунок 5) умножением на коэффициент, равный отношению полной энергии МИП за импульс к плотности энергии МИП, рассчитанной по дифференциальному спектру флюенса ионов. Результаты расчетов показаны на Рисунок 7.

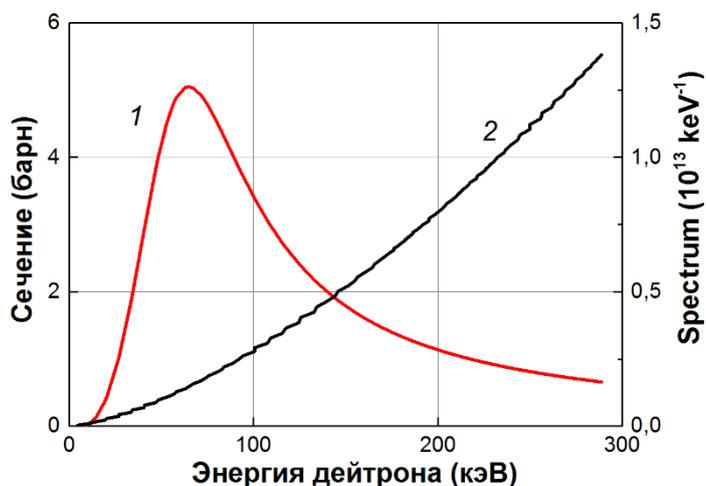


Рисунок 7 – Сечение D-T реакции (1) и спектр протонов в пучке, генерируемом ускорителем ТЕМП-6 за импульс (2)

Полное количество протонов за импульс (интеграл спектра протонов) составило $2 \cdot 10^{15}$. Интеграл произведения количества протонов на их энергию составляет 64 Дж, что соответствует полной энергии пучка протонов (интеграл плотности энергии МИП по сечению, см. Рисунок 6).

1.2.4 Выход нейтронов за импульс

На Рисунок 8 показана зависимость выхода нейтронов в D-T реакции за импульс от энергии дейтрона. Расчет выполнен по спектру пучка протонов (см. Рисунок 7) по соотношению (7).

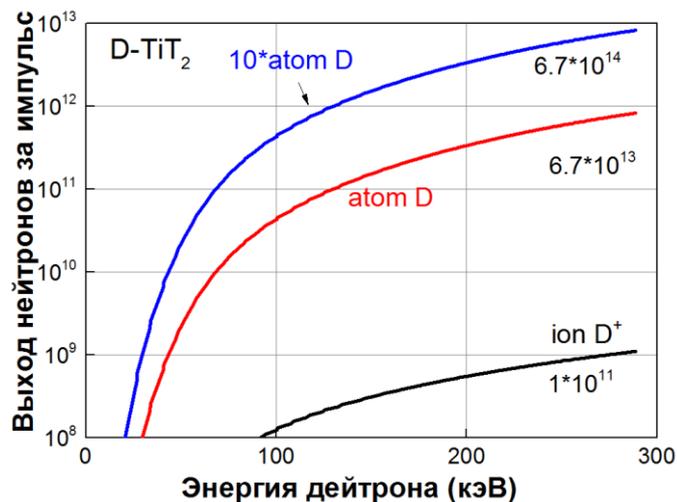


Рисунок 8 – Зависимость выхода нейтронов в D-T реакции от энергии дейтрона для спектра протонов, генерируемого ускорителем ТЕМП-6 за импульс

При интегрировании зависимости выхода нейтронов за импульс от энергии дейтрона по всему спектру дейтронов (равного экспериментальным значениям спектра протонов) получили, что при облучении дейтронами мишени из $TiTi_2$ на ускорителе ТЕМП-6 может образоваться $1.1 \cdot 10^{11}$ нейтронов за импульс, результаты расчетов приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Выход нейтронов за импульс при различных режимах генерации нейтронов

№	Режим генерации нейтронов	Выход нейтронов за импульс
1	Облучение дейтронами мишени $TiTi_2$	$1.1 \cdot 10^{11}$
2	Облучение мишени $TiTi_2$ атомами дейтерия	$6.7 \cdot 10^{13}$
3	Облучение мишени $TiTi_2$ атомами дейтерия с учетом изменения спектра энергии $\times 10$	$6.7 \cdot 10^{14}$

Выполненные исследования показали, что ускоритель ТЕМП-6 при облучении дейтронами мишени TiT_2 может формировать пучок нейтронов с энергией 14 МэВ и интегральным выходом $1.1 \cdot 10^{11}$ нейтронов за импульс длительностью 0.15 μs , что соответствует лучшим портативным импульсным генераторам нейтронов с вакуумными и газонаполненными трубками при использовании D-T реакции.

1.2.5 Выход нейтронов при иницировании атомами дейтерия

При поглощении ионов в металлической мишени основная часть их энергии тратится на неупругие потери при взаимодействии с электронами мишени (электронные потери), см. Рисунок 9. Расчеты проводили по программе SRIM [20] для энергии связи решетки 3 эВ и пороговой энергии дефектообразования 30 эВ.

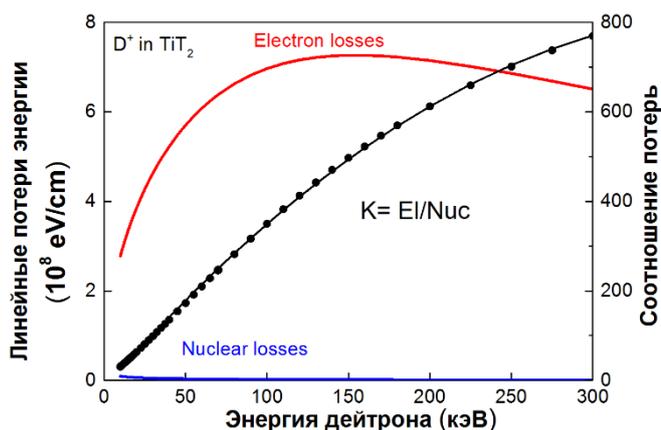


Рисунок 9 – Зависимость ЛПЭ дейтрона в мишени TiT_2 от энергии дейтрона: 1 – электронные потери, 2 - потери при упругих столкновениях

При облучении мишени атомами дейтерия электронные потери значительно меньше. На Рис. 10 показаны энергозатраты первичного выбитого атома (ПВА) в мишени на образование радиационных дефектов, расчет выполнен методом молекулярной динамики [21]. Радиационные дефекты образуются только при упругом столкновении ПВА с атомом мишени. На Рис. 10 показаны также потери энергии при упругом рассеянии дейтронов в мишени TiD_2 , расчет по данным Рисунок 9.

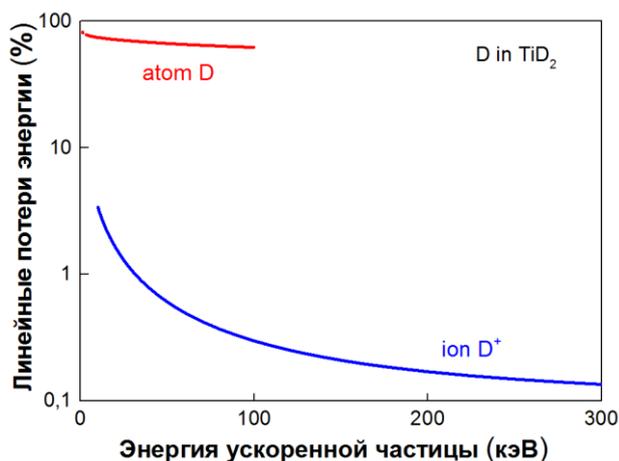


Рис. 10. Зависимость линейных потерь энергии дейтрона и атома дейтерия от энергии частицы при упругих столкновениях в мишени TiD_2 (ядерные потери)

Для учета повышения выхода нейтронов при облучении атомами дейтерия мишени TiD_2 используем в соотношении (7) коэффициент K_A , учитывающий повышение эффективности передачи кинетической энергии ускоренным атомом дейтерия атому мишени (см. Рисунок 9):

$$K_A = \frac{(dE/dx)_{electr}}{(dE/dx)_{nucl}}, \quad (10)$$

где $(dE/dx)_{electr}$ – линейные потери энергии дейтрона в TiD_2 мишени при взаимодействии с электронами (электронные потери), $(dE/dx)_{nucl}$ – линейные потери энергии дейтрона в TiD_2 мишени при упругом рассеянии (ядерные потери).

Тогда полное количество нейтронов за импульс равно:

$$Y_{puls2} = \int_0^{E_{max}} K_A \cdot Y_{1D}(E) \cdot N_D(E) dE \quad (11)$$

На Рисунок 8 показаны результаты расчета по соотношению (9). Выполненные исследования показали, что при облучении мишени быстрыми атомами дейтерия выход нейтронов может быть значительно больше за счет уменьшения электронных потерь энергии и составит $6.7 \cdot 10^{13}$, см. Рисунок 8.

1.2.6 Выход нейтронов при облучении атомами дейтерия с учетом изменения энергии

При облучении мишени быстрыми атомами дейтерия суммарный выход нейтронов может быть еще больше за счет уменьшения вероятности малоуглового рассеяния. На Рисунок 11 показана эффективность передачи энергии при торможении в мишени TiD_2 различных ускоренных частиц [22, 23].

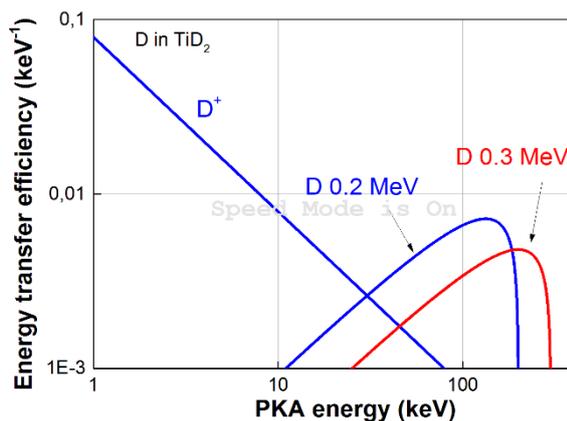


Рисунок 11 – Зависимость эффективности передачи кинетической энергии при столкновении дейтрона или атома дейтерия с атомом дейтерия в мишени TiD_2 от энергии ПВА ($\gamma=1$)

Эффективность передачи кинетической энергии нормализована, интеграл по энергии ПВА более 1 эВ равен единице.

Энергия 98% атомов дейтерия в мишени после столкновения с ускоренным атомом дейтерия (с энергией 0.2 – 0.4 МэВ) превышает 10 кэВ. Энергия 63% атомов дейтерия в мишени после столкновения с ускоренным дейтроном (с энергией 0.2-0.4 МэВ) менее 10 кэВ. Для учета повышения количества нейтронов при облучении мишени TiD_2 атомами дейтерия используем в соотношении (12) коэффициент усиления, учитывающий повышение эффективности передачи кинетической энергии ускоренным атомом дейтерия к атому мишени (см. Рисунок 11):

$$K_D = \frac{F_A}{F_{ion}}, \quad (12)$$

где F_A - эффективность передачи энергии при столкновении ускоренного атома дейтерия с атомом дейтерия мишени, F_{ion} - эффективность передачи энергии при столкновении дейтрона с атомом дейтерия мишени.

Нормированная эффективность передачи энергии при торможении ускоренного атома в мишени равна:

$$F_a^{norm} = \frac{15E_{ПВА}(\gamma E_0 - E_{ПВА})^{0.5}}{4(\gamma E_0)^{2.5}}, \quad \text{где} \quad \gamma = \frac{4m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (13)$$

Нормированная эффективность передачи энергии при торможении иона в мишени равна:

$$F_{ion}^{norm} = \frac{1}{12.6E_{ПВА}} \quad (14)$$

Тогда:

$$K_D = \frac{F_A}{F_{ion}} = \frac{12.6 \cdot 15E_{ПВА}^2(\gamma E_0 - E_{ПВА})^{0.5}}{4(\gamma E_0)^{2.5}} = \frac{47.3E_{ПВА}^2(\gamma E_0 - E_{ПВА})^{0.5}}{(\gamma E_0)^{2.5}}, \quad (15)$$

Таблица 3. Расчет приведенной массы при бинарном столкновении

Ускоренная частица		Мишень		$\frac{4m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2}$
	масса m_1		масса m_2	
Fe	56	Fe	56	1
C	12	Fe	56	0.58
N	14	Fe	56	0.64
N	14	TiH ₂	1	0.25
N	14	TiD ₂	2	0.44
C	12	TiD ₂	2	0.49
D	2	TiD ₂	2	1

На Рисунок 12 показана зависимость коэффициента K_D от энергии ПВА.

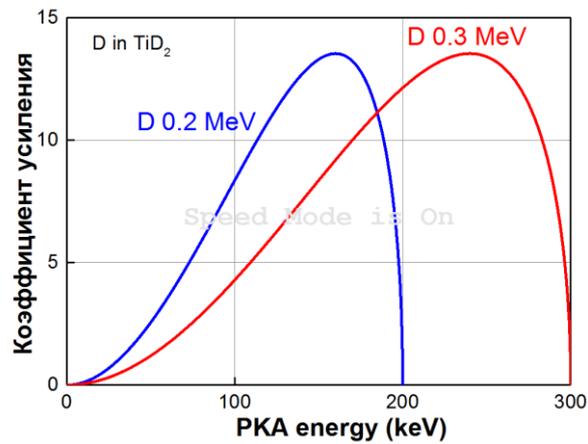


Рисунок 12 – Зависимость коэффициент усиления от энергии ПВА

Тогда для немонотонного пучка ускоренных атомов дейтерия полное количество нейтронов в D-D реакции за импульс равно:

$$Y_{puls3} = \int_0^{E_{max}} K_A \cdot K_D \cdot Y_{1D}(E) \cdot N_D(E) dE \quad (16)$$

При этом суммарный выход нейтронов может увеличиться более чем в 10 раз и составить $6.7 \cdot 10^{12}$ за импульс, см. Рисунок 8.

Ускоритель ТЕМП-6 при генерации импульсного пучка атомов дейтерия может формировать импульсы нейтронов с энергией 14 МэВ и интегральным выходом нейтронов за импульс $6.7 \cdot 10^{14}$, что превышает интегральный выход у лучших портативных генераторов нейтронов с вакуумными и газонаполненными трубками при использовании D-D реакции (10^7 - 10^8).

3. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Цель выпускной квалификационной работы является моделирование генерации нейтронов в D-T реакции, с последующим применением нейтронов в реакции синтеза короткоживущего изотопа фосфор 32

Фосфор широко распространен в биологических системах, и, поскольку радиоактивный изотоп почти химически идентичен стабильным изотопам того же элемента, фосфор-32 можно использовать для маркировки биологических молекул. Бета-излучение, испускаемое фосфором-32, достаточно проникающее, чтобы его можно было обнаружить вне организма или ткани

Моделирование осуществлялось на персональном компьютере (ПК). Рабочая зона – аудитория 227-1, 11-го корпуса НИ ТПУ, оборудованная системами отопления, пожарной и охранной сигнализации. В аудитории имеются источники естественного и искусственного освещения. Рабочее место – стационарное, оборудованное ПК.

3.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К нормативным актам, регулирующим вопросы охраны труда, в первую очередь относится Трудовой кодекс Российской Федерации [45].

Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда возлагаются на работодателя (статья 212 «Трудового кодекса Российской Федерации» от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)) [46].

Нормативная продолжительность рабочего времени согласно статье 91 Трудового кодекса РФ не может превышать 40 часов в неделю.

Согласно статье 111 Трудового кодекса РФ работникам необходимо предоставить один выходной день при шестидневном рабочем графике.

В соответствии с СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03 [47] виды трудовой деятельности разделяются на 3 группы: группа А - работа по считыванию информации с экрана ВДТ (видеодисплейный терминал) с предварительным запросом; группа Б - работа по вводу информации; группа В - творческая работа в режиме диалога с ПЭВМ.

При выполнении в течение рабочей смены работ, относящихся к разным видам трудовой деятельности, за основную работу с ПЭВМ следует принимать такую, которая занимает не менее 50% времени в течение рабочей смены или рабочего дня.

Таблица 11 – Суммарное время регламентированных перерывов в зависимости от продолжительности работы, вида и категории трудовой деятельности с ПЭВМ.

Категория работы с ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ			Суммарное время регламентированных перерывов, мин	
	группа А, количество знаков	группа Б, количество знаков	группа В, ч	при 8-часовой смене	при 12-часовой смене
I	до 20 000	до 15 000	до 2	50	80
II	до 40 000	до 30 000	до 4	70	110
III	до 60 000	до 40 000	до 6	90	140

Согласно ГОСТ 12.2.032-7 [48] конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации и т.д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы.

Общие требования к организации рабочих мест пользователей ПЭВМ приведены в СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5-0,7. Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680-800 мм.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ. Поверхность сиденья, спинки

и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

3.2 Производственная безопасность

В данном разделе рассматривается рабочая зона – аудитория 227-1, находящаяся в 11 корпусе ТПУ.

В аудитории расположено: 6 ПК, система охраны и сигнализации, маршрутизатор локальной сети (LAN), розетки и проводка сети АС 220 В, освещение.

- Составим обобщающую таблицу «Возможные опасные и вредные факторы» (Таблица 12), которая необходима для целостного представления обо всех характерных для рабочего места вредных и опасных факторах, связи их с запроектированными видами работ.

- Для идентификации потенциальных опасных и вредных факторов используем ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [49].

Таблица 12 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка модели	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
2. Повышенный уровень шума на рабочем месте	+	+	+	ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация
3. Недостаточная	+	+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное

освещенность рабочей зоны				освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
4. Повышенный уровень электромагнитных излучений	+	+	+	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	Правила устройств электроустановок - 7-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 2001-640с.

3.2.1 Анализ вредных и опасных факторов производственной среды

Отклонение показателей микроклимата

Высокая температура воздуха способствует быстрой утомляемости работающего, может привести к перегреву организма, тепловому удару. Низкая температура воздуха может вызвать местное или общее охлаждение организма, стать причиной простудного заболевания либо обморожения. Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой же температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи, что ведет к переохлаждению.

Санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения, в соответствии с «СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [50].

Таблица 13 – Оптимальные величины показателей микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia* (до 139)	22 - 24	60 - 40	0,1

Теплый	Ia* (до 139)	23 - 25	60 - 40	0,1
--------	--------------	---------	---------	-----

* К категории Ia относятся работы с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт), производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением

Таблица 14 – Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	20,0-25,0	15-75	0,1
Теплый	Ia (до 139)	21,0-28,0	15-75	0,1-0,2

Таблица 15 – Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тел работающих от производственных источников

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м ² , не более
50 и более	35
25-50	70
Не более 25	100

При наличии теплового облучения работающих температура воздуха на рабочих местах не должна превышать 25°С - при категории работ Ia.

В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата используется: механизация и автоматизация технологических процессов; устройство систем вентиляции, системы местного кондиционирования воздуха и отопления; установка регламента времени работы [51].

Повышенный уровень шума на рабочем месте

Источником возникновения шума в аудитории 227-1 являются 6 ПК (процессор, охлаждение внутри системного блока, оптические приводы, DVD-ROM).

Длительное воздействие повышенного шума на рабочем месте способно привести к развитию у работника потери слуха, увеличению риска артериальной гипертензии, болезней сердечно-сосудистой, нервной системы и др. [52].

- Таблица 16 – Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука, создаваемого ПЭВМ [53]

Вид трудовой деятельности, рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц	Уровни звука и
--	--	----------------

	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	эквива- лентные уровни
Творческая деятельность, руководящая работа с повышенными требованиями, научная деятельность, конструирование и программирование	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Уровень шума блока питания компьютера составляет примерно 5–10 дБА, уровень шума охлаждающего устройства процессора 15–20 дБА, а остальные элементы охлаждения имеют незначительный уровень шума, поэтому их можно не учитывать.

Для защиты от шума согласно «ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация» [54] применяется рациональное размещение оборудования.

Недостаточная освещенность рабочей зоны

В аудитории 227-1 предусматривается естественное (окно) и искусственное освещение.

Неудовлетворительное в количественном или качественном отношении освещение не только утомляет зрение, но и вызывает утомление организма в целом. Нерационально организованное освещение может, кроме того явиться причиной травматизма. Вредной для человека является как недостаточная освещенность, так и чрезмерная.

Общее освещение при использовании люминесцентных светильников следует выполнять в виде сплошных или прерывистых линий светильников, расположенных сбоку от рабочих мест, параллельно линии зрения пользователя при рядном расположении видеодисплейных терминалов.

СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [55] – определяет нормы освещенности.

Таблица 17 – Нормативные показатели освещения основных помещений общественных, жилых и вспомогательных зданий

Плоскость (Г-горизонтальная, В-вертикальная) нормирования освещенности и КЕО	Разряд и подразряд зрительно й работы	Искусственное освещение		Естественное освещение		Совмещенное освещение	
		Освещенность, лк		КЕО* e_n , %			
		при систем е комбин ирован ного освеще ния	при системе общего освещени я	при верхнем или комбини рованно м освещен ии	при боково м освеще нии	при верхнем или комбини рованно м освещен ии	при боко вом осве щении
В-1,2 – на экране дисплея	Б-2	-	200	-	-	-	-
Г-0,8 – на рабочих столах	А-2	500/300	400	3,5	1,2	2,1	0,7

Таблица 18 – Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ

Освещенность на рабочем столе:	300-500 лк
Освещенность на экране ПЭВМ:	не выше 300лк
Блики на экране:	не выше 40 кд/м ²
Прямая блескость источника света:	200 кд/м ²
Показатель ослепленности:	не более 20
Показатель дискомфорта:	не более 15
Отношение яркости	
- между рабочими поверхностями:	3:1-5:1
- между поверхностями стен и оборудования:	10:1
Коэффициент пульсации:	не более 5%.

Рабочее место соответствует нормам, кратко обозначенным в таблице 17.

Для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях с ПЭВМ следует проводить чистку стекол оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп.

Повышенный уровень электромагнитных излучений

В аудитории 227-1 расположено: 6 ПК, система охраны и сигнализации, маршрутизатор локальной сети (LAN), розетки и проводка сети АС 220 В, освещение

Источники ЭМ полей (излучения): 1. Монитор персонального компьютера; 2. Системный блок ПК; 3. Электрооборудование (сетевые фильтры, люминесцентные лампы, проводка, розетки, выключатели, система охраны и

сигнализации); 4. Различные периферийные устройства (клавиатура, мышь); 5. Соседние ПК.

Мероприятия по снижению электромагнитного излучения:

1. Заземление аппаратуры;
2. Оптимальная расстановка рабочих мест;
3. Удаленность расположения электрооборудования;
4. Использование ЖК-экранов, на которых не образуется статического потенциала;
5. Экранирование электроники корпусом. Для снижения влияния внешних излучений и для снижения выхода собственных излучений во внешнюю среду;
6. Использование сетевых фильтров, для снижения влияния кондуктивных помех (которые передаются по проводам);
7. Гальваническая развязка (система питания компонентов соединена звездой).

Система охраны получает питание постоянным напряжением 10-25 В. Световая и звуковая сигнализация 12 В. Как источником помех ими можно пренебречь.

Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Организационные мероприятия: выбор рациональных режимов работы оборудования, соблюдение правил безопасной эксплуатации источников ЭМП, ограничение места и времени нахождения персонала в зоне воздействия ЭМП.

Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Основными причинами воздействия тока на человека являются: появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции, ошибочно поданное напряжение на рабочее место; отсутствие заземления, замыкание в результате аварии.

Электрический ток, протекая через тело человека, производит термическое, электролитическое, биологическое, механическое действие. Термическое действие характеризуется нагревом кожи, тканей вплоть до ожогов. Электролитическое действие заключается в разложении жидкостей, в изменении их состава и свойств. Биологическое действие проявляется в нарушении биологических процессов, протекающих в организме человека. Механическое действие приводит к разрыву тканей в результате электродинамического эффекта.

Электрические установки, к которым относятся ЭВМ, представляют для человека большую потенциальную опасность. В процессе эксплуатации или при проведении профилактических работ человек может коснуться частей, находящихся под напряжением.

Согласно классификации помещений по опасности поражения электрическим током ВКР разрабатывался в помещении без повышенной опасности (ПУЭ)[56], характеризующимся наличием следующих условий: напряжение питающей сети 220 В, частота 50 Гц; относительная влажность воздуха не более 75 %; средняя температура не более 35 °С.

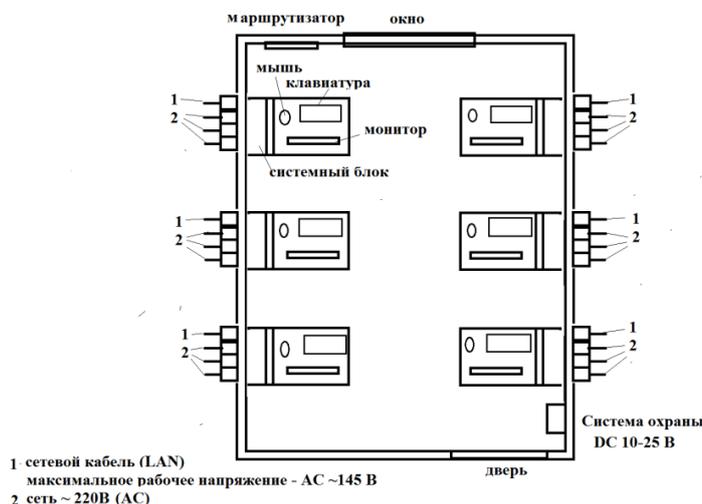
При нормальном режиме работы оборудования опасность электропоражения невелика, однако, возможны режимы, называемые аварийными, когда происходит случайное электрическое соединение частей оборудования, находящихся под напряжением с заземленными конструкциями.

Основными техническими способами и средствами защиты от поражения электрическим током являются: защитное зануление; выравнивание потенциалов; защитное заземление; электрическое разделение сети; изоляция токоведущих частей; оградительные устройства и другое.

К средствам защиты от повышенного уровня статического электричества относятся: заземляющие устройства; нейтрализаторы; увлажняющие устройства; антиэлектростатические вещества.

3.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия вредных и опасных факторов на исследователя

- Рабочая зона – аудитория 227-1, 11-го корпуса ОМ ИШНПТ ТПУ, оборудованная системами отопления, пожарной и охранной сигнализации. В аудитории имеются источники естественного и искусственного освещения. Рабочее место – стационарное, оборудованное ПК.



- Рисунок 20 – План аудитории 227-1

- Для поддержания нормальных параметров микроклимата в рабочей зоне применяются следующие основные мероприятия: устройство систем вентиляции; кондиционирование воздуха и отопление. Кроме того, большое значение имеет правильная организация труда и отдыха работников.

Нормируемые уровни шума обеспечиваются путем использования малошумного оборудования, применением незвуковых материалов (например, пластмассы), рациональным размещением оборудования, проведением периодического контроля шума на рабочих местах.

Для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях с ПЭВМ проводится чистка стекол, оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводится своевременная замена перегоревших ламп. Рабочий стол рекомендуется устанавливать таким образом, чтобы световой поток был направлен слева от работника.

3.3 Экологическая безопасность

Влияние объекта исследования на окружающую среду

Каждый ПК содержит не только ценные цветные металлы, но и целый набор опасных для окружающей среды веществ. Это производные газов, тяжелые металлы, среди которых кадмий, ртуть и свинец. Попадая на свалку, все эти вещества под воздействием внешней среды постепенно проникают в почву, отравляют воздух и воду.

Также в процессе утилизации из техники извлекаются и материалы, которые могут быть использованы для вторичной переработки.

Техника, подвергающаяся процессу утилизации, проходит специальную процедуру: непосредственный процесс переработки; отправку некоторых частей оргтехники на аффинаж (это металлургический процесс изъятия высокочистых благородных металлов при отделении от них загрязняющих примесей, один из видов извлечения металлов). Полную процедуру утилизации офисной техники могут осуществлять только специализированные зарегистрированные предприятия.

Отходы, содержащие в себе части цветных металлов, относятся к категории металлолома и попадают под соответствующий регламент ГОСТ Р 54565-2011 [57].

ЖК-экраны один из источников парниковых газов, которые намного вреднее диоксида углерода.

К воздействию на литосферу можно отнести и образование отходов в виде использованной бумаги. Бумага используется в процессе проведения всей научной работы и требуется в больших количествах. После использования, бумага выносится в специальные контейнеры, предназначенные для сбора макулатуры на переработку для вторичного использования. Вторсырье, находящееся в специальных контейнерах, отвозится на склад компании, на складе весь собранный материал преобразовывается: сортируется по типу и цвету, измельчается и превращается в полуфабрикат. Утилизируется бумага на специальных предприятиях, которые занимаются переработкой макулатуры.

Методы обеспечения экологической безопасности: совершенствование технологических процессов и разработка новой техники с меньшим уровнем

негативного воздействия на окружающую среду; вовлечение образовавшихся отходов во вторичное производство.

3.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятная ЧС: пожар.

Вопросы обеспечения пожарной безопасности производственных зданий и сооружений имеют большое значение и регламентируются специальными государственными постановлениями и указами ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда «Пожарная безопасность. Общие требования» (ред. от 12.09.2018) [58].

В соответствии с «НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» аудитория 227-1, 11го корпуса ТПУ относится к категории «В4», так как в аудитории находятся твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы [59].

Источниками возникновения пожара могут быть электрические схемы от ЭВМ, устройства электропитания, кондиционирования воздуха. В данных объектах по некоторым причинам (снижение сопротивления изоляции, ослабление контактов, перегрузка сетей, короткое замыкание) возникает перегрев элементов, что приводит к появлению искр и возгоранию.

Горючие компоненты в помещении – строительные материалы для акустической и эстетической отделки помещений, перегородки, двери, полы, перфокарты и перфоленты, изоляция кабелей и др.

Пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты. В рабочей зоне размещены таблички с указанием номера телефона вызова пожарной охраны, кроме того, размещен схематичный план эвакуации людей при пожаре; дополнительно разработана инструкция, определяющая действия персонала в случае возникновения очага возгорания.

На рисунке 28 приведен план эвакуации людей в случае возникновения ЧС. Работы проводятся в аудитории 227.



Рисунок 21 – План эвакуации для 2 этажа 11 корпуса ТПУ

В аудитории находится памятка о соблюдении правил пожарной безопасности.

В целях обеспечения пожарной безопасности **ЗАПРЕЩЕНО**: курить; пользоваться неисправными электронагревательными приборами; использовать временную электропроводку и/или удлинители для питания электроприборов; перегружать электрическую сеть; скручивать, завязывать электрические провода; накрывать горючими материалами включенные электрические лампы; закрывать датчики пожарной сигнализации посторонними предметами. Нельзя загромождать пути эвакуации.

Необходимо знать: порядок эвакуации; место нахождения первичных средств пожаротушения.

Помещение оснащено первичными средствами пожаротушения: огнетушители и системой пожарной сигнализации.

В случае пожара звонить по телефону 01, 101, 112: назвать точный адрес; оповестить всех о случившемся; организовать эвакуацию граждан, документов и материальных ценностей; принять меры к ликвидации пожара.

В случае возникновения пожара, необходимо предпринять следующие меры: обесточить помещение, вызвать службу пожарной охраны. Если горит электроприбор (ПК) – накрыть его асбестовым одеялом или другим плотным

материалом и дождаться прекращения горения из-за отсутствия доступа кислорода. Затем воспользоваться порошковым огнетушителем.

Вывод по разделу

Проанализировав условия труда на рабочем месте, где была разработана дипломная работа, можно сделать вывод, что компьютерный класс удовлетворяет необходимым нормам и в случае соблюдения техники безопасности и правил пользования компьютером работа в данном помещении не приведет к ухудшению здоровья работника.

Само помещение и рабочее место в нем удовлетворяет всем нормативным требованиям. Кроме того, действие вредных и опасных факторов сведено к минимуму. Деятельность, осуществляемая в помещении, не представляет опасности окружающей среде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении дипломной работы выполнен расчет выхода изотопа фосфор 32 за импульс, при облучении мишени нейтронами с энергией 14 МэВ. При энергии нейтрона 14 МэВ сечение реакции $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ составляет 0.35 барн. Тогда выход изотопа фосфор-32 за импульс при выходе нейтронов за импульс $6.7 \cdot 10^{14}$ составит $9 \cdot 10^{13}$ атомов. Расчет выхода изотопа фосфор-32 на один нейтрон в реакции $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ показал, что при энергии нейтрона 2.45 МэВ выход составляет 0.005, а при энергии нейтрона более 7 МэВ все нейтроны участвуют в реакции ядерного синтеза.

При выполнении литературного обзора была определена доза, необходимая для половой стерилизации жуков и личинок союзного короеда – 150 Гр. На основе полученных данных был произведен расчет количества жуков и их личинок, простерилизованных под действием β излучения при распаде изотопа фосфор 32, наработанного за один импульс. Стерилизации при таких условиях подвергаются $1.2 \cdot 10^4$ жуков и их личинок.

Выполненные исследования показали, что ускоритель ТЕМП-6 подходит для генерации изотопа фосфор-32. С 2017 года по текущий момент изотоп фосфор-32 нарабатывался только на исследовательском реакторе в ТПУ. Ускоритель ТЕМП-6 обладает такими преимуществами как мобильность, компактность и простота использования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. Работа была представлена на “XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» Россия, Томск, 27–30 апреля 2021 г.”. Статья “ АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ ПОЛОВОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ ЖУКОВ-КОРОЕДОВ С ПОМОЩЬЮ КОРОТКОЖИВУЩИХ ИЗОТОПОВ” будет опубликована в сборнике материалов конференции в сентябре 2021 года.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A.T. Baranik, M.A. Abuzeid, M.I. El-Zaiki, I.I. Zaloubovsky. Investigation of the (d,p) reaction on ^{31}P in the deuteron energy range 1.3-2.5 MeV // Nuclear Physics, 1965, Vol.72, p.49.
2. Пушкарев А.И., Исакова Ю.И., Хайлов И.П. Импульсный ионный ускоритель, патент на изобретение № 2559022. Приоритет от 12 марта 2014 года. Зарегистрирован в Госреестре изобретений РФ 10 июля 2015 г.
3. Пушкарев А.И., Исакова Ю.И., Хайлов И.П. Ионный диод с магнитной самоизоляцией, Патент РФ № 2606404, приоритет от 30.06.05. Опубликовано 10.01.2017, бюл. №1.
4. Pushkarev A.I., Isakova Yu.I. A gigawatt power pulsed ion beam generator for industrial application // Surface and Coatings Technology Vol. 228, Supplement 1, 15 August 2013, Pages S382–S384. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.094
5. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: Учебник. В 3-х тт. Т. 2. Физика ядерных реакций. 7-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2009. — 319 с.
6. A.S. Ganeev, A.M. Govorov, G.M. Osetinskii, A.N. Rakivnenko, I.V. Sizov, V.S. Saksin. The D-D reaction in the deuteron energy range 100 - 1000 keV // Atomnaya Energiya, 1957. Supplement Issue.5, p.26.
7. H.-S. BOSCH, G.M. HALE. Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities // Nuclear fusion, Vol.32, No.4 pp. 611-632. (1992).
8. Jiping Liu, Xiaobo Liu Deuteride Materials. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019
9. J.F. Ziegler - SRIM & TRIM. URL: <http://www.srim.org/>
10. A.I. Pushkarev, Y.I. Isakova, A.I. Prima. High-intensity pulsed ion beam composition and the energy spectrum measurements using the time-of-flight method // Laser and Particle beams (2018), Volume 36, Issue 2, pp. 210-218.

11. P. Bystrov, A.R. Prokopenko, Y. Pavlov, and N. Rozanov, Computer program "BEAM SCANNING" for calculation of irradiation processes in radiation-technological installations, *Procedia Computer Science* 145, 123-133 (2018).
12. Pushkarev A.I., Isakova Y.I., and Khailov I.P. Analysis of correctness of intense ion beam diagnostics based on the ion-current density // *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, Vol. 58, No. 5, pp. 667–674.
13. Langmuir I. The Effect of Space Charge and Residual Gases on Thermionic Currents in High Vacuum. *Phys. Rev.* 1913, Vol. 2. – P.45–51.
14. Humphries S. *Charged Particle Beams*. Wiley, New York. - 1990. - 847 p.
15. <https://www.originlab.com>.
16. Y.I. Isakova, A.I. Pushkarev. Visualization and analysis of pulsed ion beam energy density profile with infrared imaging // *Infrared Physics & Technology* (2018), v. 89, p. 140–146.
17. Ю.И. Исакова, А.И. Прима, Сао-Пэн Чжу, Лянь Динь, А.И. Пушкарев, Мин-Кай Лэй. Влияние радиационных дефектов в металлической мишени на погрешность тепловизионной диагностики мощных ионных пучков // *Приборы и техника эксперимента*, 2019, No. 2, с. 67-74.
18. А.И. Пушкарев, А.И. Прима, Ю.И. Егорова, В.В. Ежов. Диагностика импульсных пучков электронов, ионов и атомов // *ПТЭ* 2020, №3, с. 5-24.
19. Пушкарев А.И., Исакова Ю.И., Сазонов Р.В., Холодная Г.Е. Генерация пучков заряженных частиц в диодах со взрывоэмиссионным катодом. М: Физматлит, 2013.
20. J.F. Ziegler - SRIM & TRIM. URL: <http://www.srim.org/>
21. R.E. Stoller. Primary radiation damage formation. In *Comprehensive nuclear materials*. Vol. 1. Elsevier: Amsterdam. 2012. pp. 293-329.
22. А.И. Прима, А.И. Пушкарёв, С. Zhang, Y. Li, X.P. Zhu, M.K. Lei Лабораторный стенд для иммитационного радиационного облучения ускоренными атомами // XVI Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа. Москва, 2019, с. 132.

23. A. Pushkarev, A. Prima, V. Myshkin, N. Chistyakova, V. Ezov. Comparison of influence of the fast atoms beam and ion beam on the metal target // *Journal of Nuclear Materials*
24. Curves and tables of neutron cross sections. JAERI-M, 1990; JAERI-M, 1992.
25. R. Ricamo, E. Luescher, P. Scherrer, W. Zuenti Elastic scattering and (n,p) resonances of P-31 and S-32 // *Nuovo Cimento*, 1951, Vol.8, p.383
26. L. Allen, W.A. Biggers, R.J. Prestwood, R.K. Smith. Cross sections for the $S^{32}(n,p)P^{32}$ and the $S^{34}(n,\alpha)$ // *Physical Review*, 1957, Vol.107, p.1363.
27. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: Учебник. В 3-х тт. Т. 2. Физика ядерных реакций. 7-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2009. — 319 с.
28. G.J. Hallman, Y.M. Henon, A.G. Parker, C.M. Blackburn. Phytosanitary irradiation: An overview // *Florida Entomologist*, 2016, Volume 99, Special Issue 2, p. 1-
29. Стриганова Б. Р., Захаров А. А. Пятиязычный словарь названий животных: Насекомые (латинский-русский-английский-немецкий-французский) / Под ред. д-ра биол. наук, проф. Б. Р. Стригановой. — М.: РУССО, 2000. — С. 184.
30. Li, H., Li, T. Bark beetle larval dynamics carved in the egg gallery: a study of mathematically reconstructing bark beetle tunnel maps. *Adv Differ Equ* 2019, 513 (2019). <https://doi.org/10.1186/s13662-019-2452-2>
31. Батурицкий, М.А.. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом : учебное пособие. – Мн.: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2005. – 118 с.
32. The First Research Group. Low energy cross-sections measurement of d-d and d-t reactions // *High Energy Physics and Nucl. Physics*, Chinese ed. 1985, Vol.9, Issue.6, p.723.
33. А. Давиденко, А. М. Кучер, И. С. Погребов, Ю. Ф. Тутуров. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНЫХ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИИ $D(d,n)He^3$ В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 20—220 кэВ. // ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ НА ЛЕГКИХ ЯДРАХ. АТОМИЗДАТ МОСКВА —1957. ПРИЛОЖЕНИЕ № 5 К ЖУРНАЛУ АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ» ЗА 1957 г., с. 7-14.

34. Preston G., Shaw P. F. D., Young S. A. The cross-sections and angular distributions of the D-D reactions between 150 and 450 keV //Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1954. – Т. 226. – №. 1165. – С. 206-216.
35. A.S. Ganeev, A.M. Govorov, G.M. Osetinskii, A.N. Rakivnenko, I.V. Sizov, V.S. Siksin. The D-D reaction in the deuteron energy range 100 - 1000 keV // Atomnaya Energiya, 1957. Supplement Issue.5, p.26.
36. С.А. Кривец. Проблемы защиты кедровых лесов Сибири от союзного короеда // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах / Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Санкт-Петербург: 2020. – 452 с.
37. Г. А. Бегляров, А. А. Смирнова, Т. С. Баталова. Химическая и биологическая защита растений. М. : Колос, 1983.
38. А.В. Селиховкин, Б.Г. Поповичев. Возможность создания самцового вакуума для контроля плотности популяции короеда типографа: оценка биологической и экономической перспективы // Вредители и болезни древесных растений России - Санкт-Петербург, 25–27 ноября 2013 г. – 85-86 с.
39. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО— 2002);
40. Тарифы на электроэнергию 2021 Томск (электронный ресурс) URL: <https://www.gorsetitomsk.ru/> Дата обращения: 10.05.2021;
41. Тарифы на водоснабжение и водоотведение 2021 Томск (электронный ресурс) <https://www.vodokanal.tomsk.ru/> Дата обращения: 10.05.2021;
42. Сульфат аммония оптом (электронный ресурс) URL: https://chemsales.ru/products/sulfat_ammoniya/ Дата обращения: 20.05.2021;
43. И.А. Керчев, С.А. Кривец, Н.А. Смирнов, Анализ популяционных характеристик союзного короеда *Ips amitinus* (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в районах инвазии в Западной Сибири / Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах (СПб., 2020

г.) / Материалы Всероссийской конференции с международным участием.
Санкт-Петербург: 2020

44. Закупки союзный короед (электронный ресурс) URL:
<https://zakupki.gov.ru/epz/order/extendedsearch/results.html?searchString=%D1%81%D0%BE%D1%8E%D0%B7%D0%BD%D1%8B%D0%B9+%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%B4+&morphology=on> / Дата обращения:
17.05.2021.

45. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)

46. Статья 212 «Трудового кодекса Российской Федерации» от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)

47. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы (ред. от 21.06.2016)

48. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

49. ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

50. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений

51. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие/ О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 178 с.

52. ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

53. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

54. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.

55. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*

56. Правила устройств электроустановок - 7-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 2001-640с.
57. ГОСТ Р 54565-2011 Лом и отходы цветных металлов и сплавов. Термины и определения
58. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда «Пожарная безопасность. Общие требования» (ред. от 12.09.2018)
59. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности

ПРИЛОЖЕНИЕ А

1.2 Calculating the neutron yield

This section presents the calculation of the neutron yield in the D-T reaction under irradiation with deuterons and deuterium atoms of a TiT₂ target:



1.2.1 Neutron yield per deuteron

For a thick target, the neutron yield in the D-T reaction per deuteron with energy E on a unit path (within which $\sigma \approx \text{const}$) is [5]:

$$\frac{dY_1}{dx} = n \cdot \sigma_{DT}(E), \text{ cm}^{-1} \quad (1)$$

where is n- the density of tritium atoms in the TiT₂ target, cm², $\sigma_{DT}(E)$ - cross section for D-T reaction, cm².

Relation (1) can be written in the following form

$$dY_1 = n \cdot \sigma_{DT}(E) dx = \frac{n \cdot \sigma_{DT}(E)}{dE / dx} dE, \text{ neutrons} \quad (2)$$

where is dE/dx - linear energy loss of deuteron (LEL) in the target, eV/cm

After integrating relation (2), we obtain for a homogeneous target:

$$Y_1(E) = n \int_0^{E_{\max}} \frac{\sigma_{DT}(E)}{dE / dx} dE, \text{ neutrons} \quad (3)$$

$$Y_1(E) = \frac{9.2 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3} \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \cdot 10^3 \text{ eV}}{10^8 \text{ eV / cm}} \int_0^{E_{\max}} \frac{\sigma_{DT}(E)}{dE / dx} dE = 9.2 \cdot 10^{-7} \int_0^{E_{\max}} \frac{\sigma_{DT}(E)}{dE / dx} dE,$$

Figure 3 shows the experimental values of the reaction T(d,n)⁴He [6] cross section

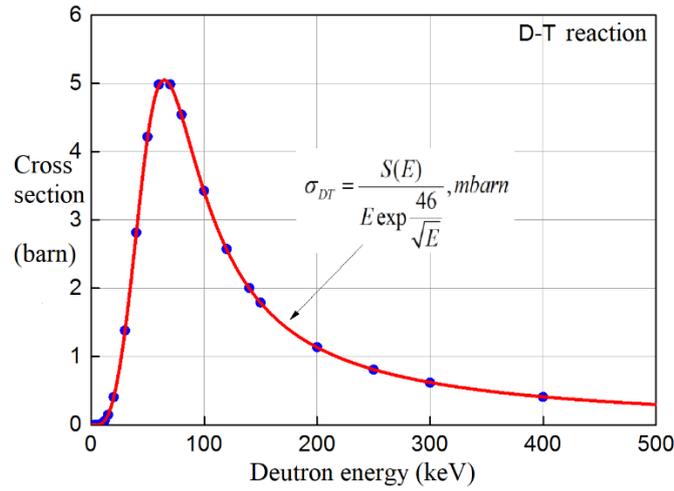


Figure 3 - Dependence of the cross section of the D-T reaction on the deuteron energy (1 barn is equal to 10^{-24} cm^2)

The cross section of the D-T reaction was further calculated by the ratio [7]:

$$\sigma_{DT} = \frac{S(E)}{E \exp \frac{46}{\sqrt{E}}}, \text{ barn} \quad (4)$$

where is E- deuteron energy in keV.

$$S = \frac{6.97 \cdot 10^4 + 7.45 \cdot 10^8 \cdot E + 2.06 \cdot 10^6 \cdot E^2 + 5.2 \cdot 10^4 \cdot E^3}{1 + 63.8 \cdot E - 0.995 \cdot E^2 + 6.98 \cdot 10^{-5} \cdot E^3 + 1.73 \cdot 10^{-4} \cdot E^4}$$

The number of tritium atoms in 1 cm^3 of the target is:

$$n = \frac{f \cdot \rho \cdot N_A}{m} = \frac{2 \cdot 4.12 \cdot 6 \cdot 10^{23}}{53.8} = 9.2 \cdot 10^{22}, \text{ cm}^{-3} \quad (5)$$

where is ρ - target material density, g/cm^3 , f - stoichiometry coefficient, $N_a = 6.02 \cdot 10^{23}$, mole^{-1} , m – mass in a.m.u,

At $f = 1$, using relation (5), we calculate the number of TiT_2 molecules in 1 cm^3 of the target. Then the number of tritium atoms in 1 cm^3 of the TiT_2 target is twice as large, $f = 2$. The results of calculations of the concentration of tritium atoms in the target are presented in Table 1.

Table 1. - The number of atoms in 1 cm^3 of the target

Target	ρ , g/cm ³	m, a.m.u,	f	A, cm ⁻³
TiH ₂	3.76	47.8+2=49.8	2	9.1·10 ²²
TiD ₂	3.94 [8]	47.8+4=51.8	2	9.1·10 ²²
TiT ₂	4.12	47.8+6=53.8	2	9.2·10 ²²
Sulfur S-32	2.07	32	1	3.9·10 ²²

Figure 4 shows the linear energy loss of a deuteron in a deuterated titanium target. The calculation was performed using the SRIM program [9].

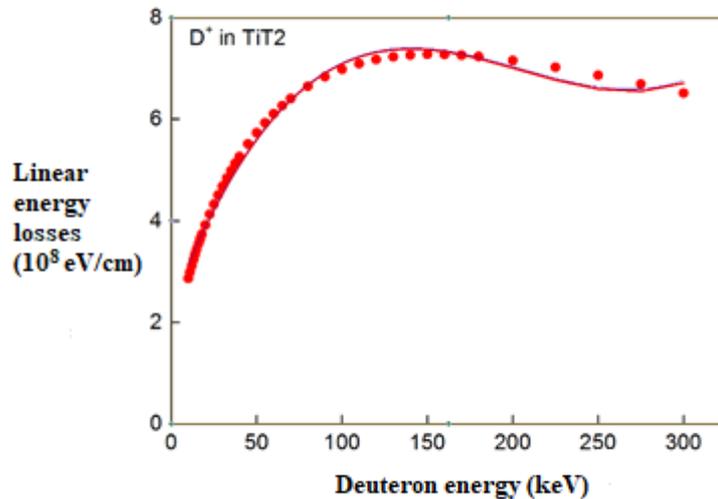
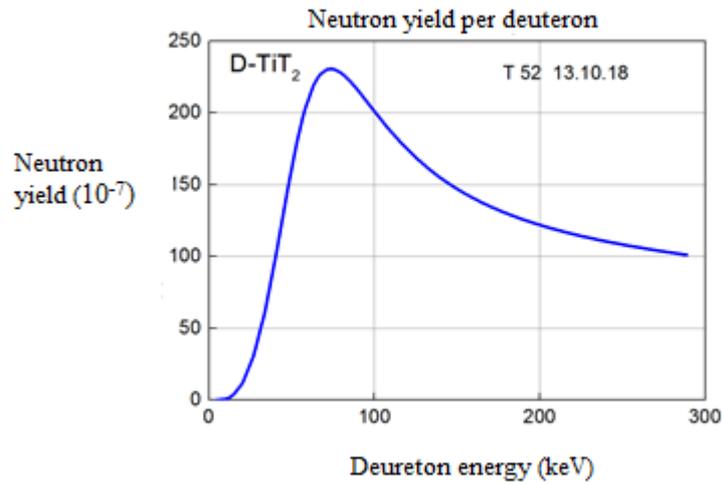


Figure 4. - Figure 4 - Linear deuteron energy losses in the TiT₂ target. SRIM calculation (points) and third degree polynomial approximation (line)

The calculation of the LEL of the deuteron in the TiT₂ target was carried out further according to the relation:

$$\frac{dE}{dx} = 10^8 \cdot [2.3 + 0.088 \cdot E - 4.78 \cdot 10^{-4} \cdot E^2 + 7.79 \cdot 10^{-7} \cdot E^3], eV / cm \quad (6)$$

The results of calculating the neutron yield per one deuteron in the D-T reaction according to relation (3) are shown in Figure 5.



Picture. 5. Dependence of the number of neutrons per deuteron (total yield in the D-T reaction) on the deuteron energy

1.2.2. Neutron output per pulse

For a non-monoenergetic pulsed deuteron beam, the total number of neutrons in the D-T reaction per pulse is:

$$Y_{puls1} = \int_0^{E_{max}} Y_1(E) \cdot N_D(E) dE, \text{ neutrons} \quad (7)$$

where is $Y_1(E)$ - neutron yield per deuteron with energy E in the D-T reaction, $N_D(E)$ - the number of deuterons with energy E per pulse (spectrum of deuterons).

1.2.3 Proton spectrum

Figure 6 shows the oscillograms of the accelerating voltage and ion current density, the collimated Faraday cup (CFC) is located at a distance of 13 cm from the diode, in focus. Figure 6 also shows the proton current density calculated from time-of-flight diagnostics [10].

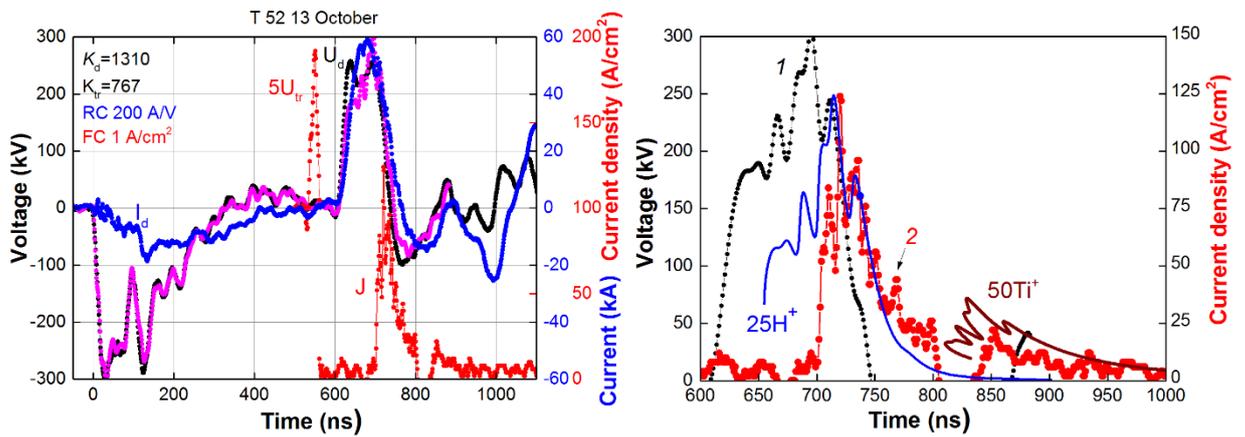


Figure 6 - Oscillograms of the accelerating voltage, total current in the diode, experimental (points) and calculated by time-of-flight diagnostics (lines) values of the ion current density

The spectrum of a pulsed electron beam can be correctly calculated from the oscillograms of the accelerating voltage and electron current [11]. However, the calculation of the spectrum of all ions in the ion beam is impossible due to the influence of low-energy electrons. For efficient transportation and focusing of the ion beam, it is necessary to provide its charge compensation with electrons to prevent scattering as a result of Coulomb repulsion. But when measuring the ion current using a Faraday cup (FC), it is necessary to remove thermal electrons from the ion beam. For this, a transverse magnetic field is used, which penetrates the plasma to the depth of the skin-layer. For this, a transverse magnetic field is used, which penetrates the plasma to the depth of the skin layer. The skin layer of a high-power ion beam (HIP) neutralized by electrons, formed by the TEMII-6 accelerator, is 4-6 mm [12] with a MIB diameter of 5 cm, and it is impossible to remove all electrons.

The calculation of the ion current density from the oscillogram is a direct method for measuring the IIP spectrum, but it contains systematic errors. When measuring the ion current density at the diode focus, due to the low ion drift velocity, a significant delay appears in the ion current density oscillogram relative to the accelerating voltage oscillogram, see Figure 6, which introduces an error in the calculation of the ion spectrum. In addition, ions that are formed at a high accelerating voltage ($U > 150$ kV), on the way of the drift to the CFC, catch up with slow ions that are formed during the

leading edge of the voltage pulse, see Figure 6, curve 3 (570 ns < t < 640 ns), which also introduces an error in the calculation of the ion spectrum.

The errors in calculating the ion spectrum from the oscillogram of the ion current density can be eliminated by calculating the spectrum using the one-dimensional relation (1-D CL) [13]. In the mode of limiting the ion current by the charge of ions in the A-K gap, taking into account the decrease in the A-K gap due to the expansion of the anode plasma and the effect of plasma erosion with a change in the polarity of the accelerating voltage [14], the density of the ion current at the focus of the diode is equal to:

$$j(t) = \frac{4K_0\varepsilon_0\sqrt{2z}}{9\sqrt{m_i}} \cdot \frac{U^{3/2}}{[d_0 - v_a(t-t_0)]^2}, \text{ A/cm}^2 \quad (8)$$

where is m_i and z - the mass and charge of the ion, respectively; v_a - anode plasma expansion rate; t_0 - moment of accelerating voltage polarity reversal ($t_0=600$ ns on Fig. 6); K_0 - coefficient taking into account the enhancement of the ion current density in comparison with 1-D CL and focusing of the PIB.

The value of the coefficient K_0 was determined by comparing the calculated ion current density with the experimental data (see Figure 6); in the calculations, it was constant during the pulse.

When calculating the integral spectrum of ions in the OriginPro 9.0 [15], the dependence of the ion current density on the accelerating voltage was plotted, then the accelerating voltage and current density were sorted synchronously in a spreadsheet in order of increasing voltage («Sort columns/ascending»). In future integrated ion current density on the accelerating voltage, which allowed summarize ions with the same energy, which are generated for the front and rear edges of the pulse. Then, the charge density of ions was recalculated into their fluence, and the integral dependence of the ion fluence on their energy was plotted (integral spectrum).

The results of calculating the integral spectrum of ions for the data (Figure 6) are shown in Figure 7. The calculation was performed using the ion current density,

therefore the spectrum corresponds to the fluence of ions with a certain energy. Differentiation of the integral spectrum allows to obtain the energy distribution of the proton fluence in the beam (differential spectrum), see Figure 7.

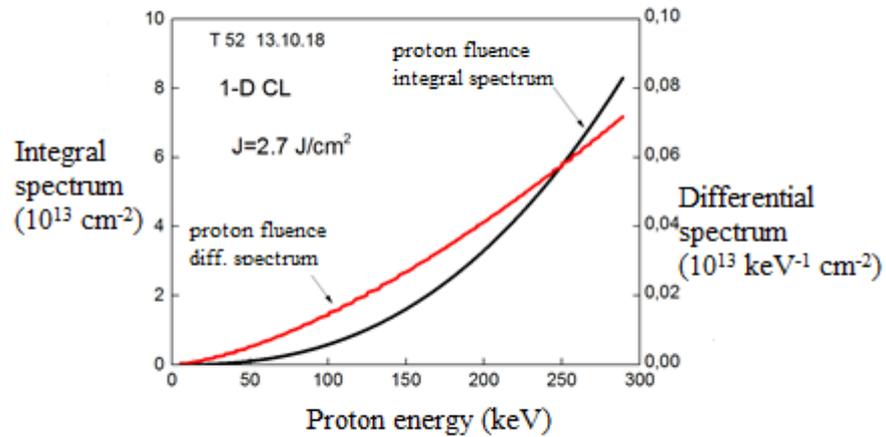


Figure 7 - Integral and differential spectra of ion fluence

To calculate the full spectrum of ions in the ion beam, the energy density of the PIB is calculated from the differential spectrum of the ion fluence. For this, the OriginPro 9.0 was used to numerically integrate the product of the differential ion fluence by the ion energy over all ion energies in the beam. For the data (Figure 7), the energy density was 2.7 J/cm^2 .

The results of measuring the energy density of the PIB are shown in Figure 8.

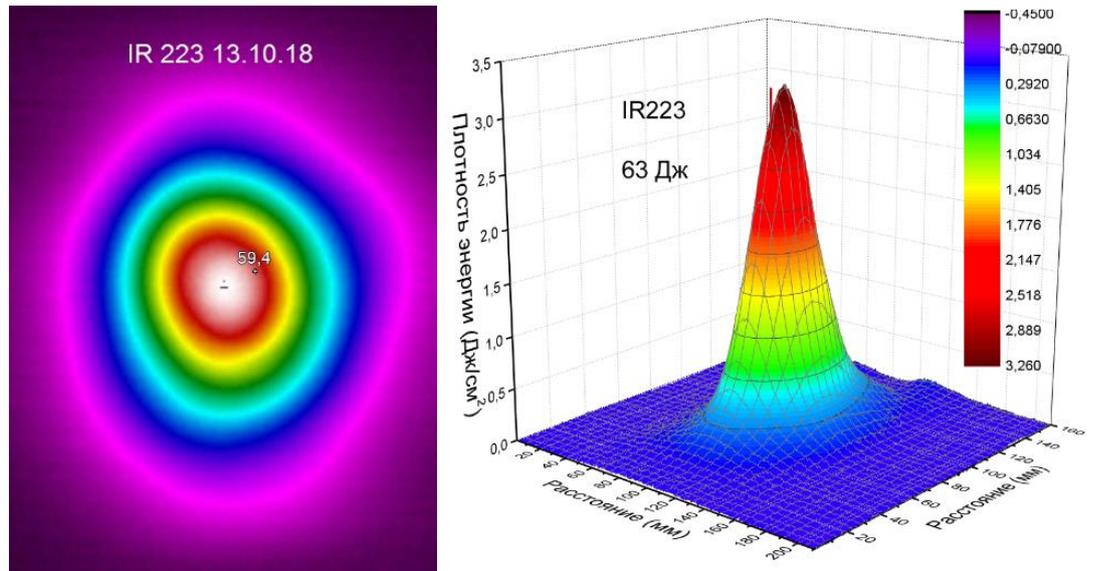


Figure 8 - PIB thermogram and energy density distribution in focus

The energy density of the PIB was calculated using the ratio [16]:

$$q_{\text{exp}}(x, y) = K_1 K_2 K_3 c_v d \rho \Delta T(x, y), \quad J / \text{cm}^2 \quad (9)$$

where is c_y - specific heat of target material; d and ρ - target thickness and density; ΔT - change in target temperature after irradiation; K_1 - the transparency coefficient of the optical window; K_2 - coefficient that takes into account the contribution of radiation defects to the error of thermal imaging diagnostics [17, 18]; K_3 - coefficient that takes into account the contribution of ablation of the target material to the error of thermal imaging diagnostics [18].

K_1 is 1.4 for a BaF_2 window with a thickness of 8 mm, K_2 is 1.22 for a stainless steel target, K_3 depends on the PIB energy density and is described by an approximating function [18].

For experimental data in Fig. 7, the PIB energy density calculated from the results of time-of-flight diagnostics (for protons) is 2.7 J/cm^2 , which is 20% less than the results of thermal imaging diagnostics (see Fig. 8). The discrepancy is associated with the registration by thermal imaging diagnostics of heating the target by ions and accelerated atoms formed during ion charge exchange [19].

The total energy of the proton beam (the integral of the energy density of the PIB over the cross section, see Figure 8) is 63 J. Then the total spectrum of ions in the beam can be calculated from the differential spectrum of the ion fluence (see Figure 7) by multiplying by a factor equal to the ratio of the total energy of the PIB for pulse to the energy density of the PIB, calculated from the differential spectrum of the ion fluence. The calculation results are shown in Figure 9.

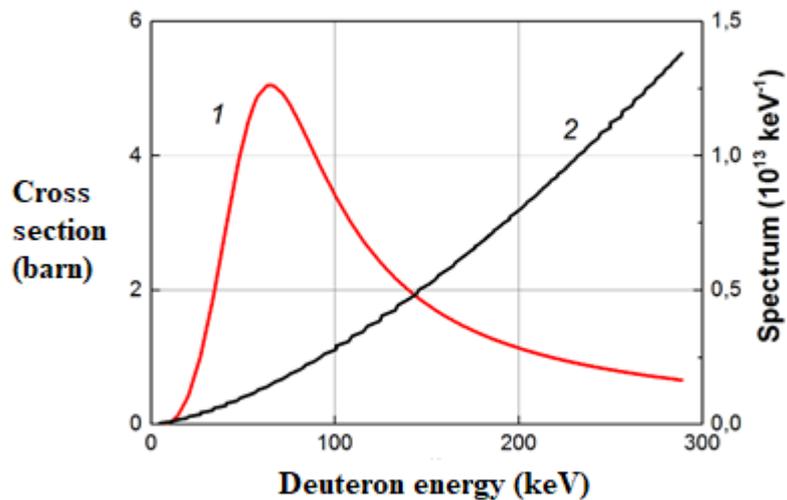


Figure 9 - Cross section of the D-T reaction (1) and the spectrum of protons in the beam generated by the TEMII-6 accelerator per pulse (2)

The total number of protons per pulse (integral of the proton spectrum) was $2 \cdot 10^{15}$. The integral of the product of the number of protons and their energy is 64 J, which corresponds to the total energy of the proton beam (the integral of the energy density of the PIB over the cross section, see Figure 8).