

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра физики плазмы

Журов Евгений Владимирович

КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
На соискание степени бакалавра

НАПЫЛЕНИЕ ЛИТИЕВОГО СЛОЯ  
НЕЙТРОНОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ МИШЕНИ

Научный руководитель:  
к.ф.-м.н., доцент НГУ, снс ИЯФ СО РАН  
Таскаев Сергей Юрьевич

Новосибирск, 2006 г.

## Оглавление

Введение.....	3
1. Экспериментальная установка.....	8
2. Методика измерения толщины литиевого слоя.....	10
3. Эксперимент.....	14
Заключение.....	18
Список литературы.....	19

## Введение

В настоящее время в Институте Ядерной физики СО РАН сооружается пилотный источник эпитепловых нейтронов на основе компактного тандемного ускорителя, рассматриваемого как возможное решение проблемы проведения нейтронозахватной терапии рака в онкологической клинике.

Концепция нейтронозахватной терапии рака была предложена в 1936 году [1], спустя 4 года после открытия нейтрона. Её физический принцип прост и элегантен. Раствор, содержащий стабильный изотоп бор-10, вводят в кровь человека и через некоторое время бор сорбируется в клетках. Затем опухоль облучают потоком эпитепловых нейтронов. В результате поглощения нейтрона стабильным изотопом  $^{10}\text{B}$  происходит ядерная реакция (Рис. 1), и образующиеся энергичные  $\alpha$ -частица и ион  $^7\text{Li}$  быстро тормозятся и выделяют энергию  $\sim 2,3$  МэВ в пределах именно той клетки, которая содержала ядро бора, что приводит к её поражению. Т.о., если обеспечить более высокую концентрацию  $^{10}\text{B}$  в раковой клетке по сравнению со здоровой, то бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) позволит осуществить избирательное поражение клеток злокачественных опухолей.

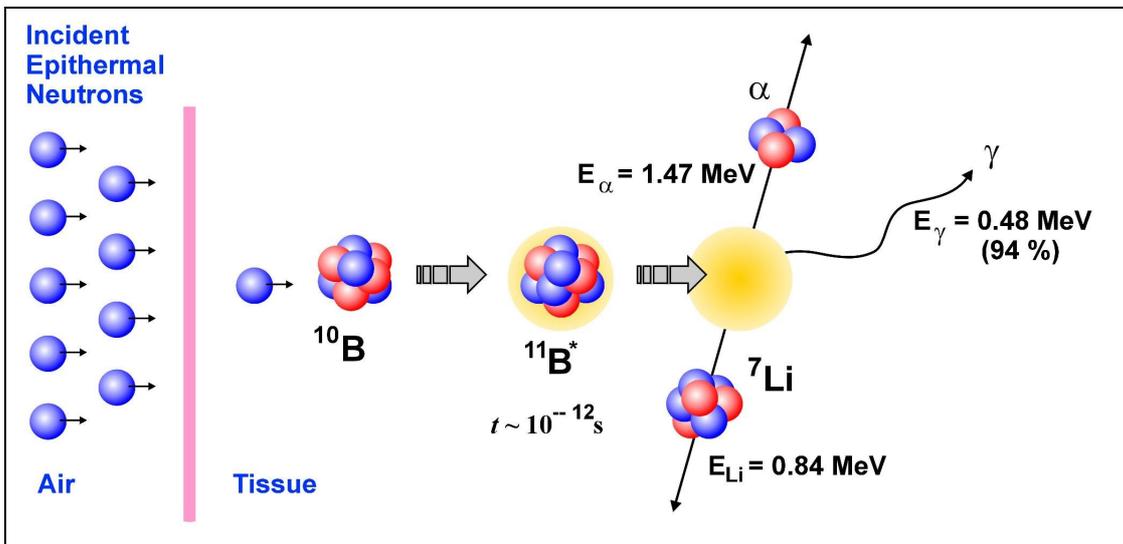


Рис. 1. Схематическое изображение бор-нейтронозахватной терапии.

В 1951 году было впервые продемонстрировано [2], что определенные соединения бора позволяют получить более высокую концентрацию бора в клетках раковой опухоли по сравнению со здоровой клеткой. В течение 1950-х и в начале 1960-х гг. в Брукхевене

[3, 4] и Массачусетсе [5] на специально построенных медицинских реакторах были проведены первые клинические испытания. Эти испытания, к сожалению, не продемонстрировали терапевтической эффективности данного метода и были прекращены. Причина, как выяснилось впоследствии, заключалась в низкой концентрации бора. Дело в том, что нейтроны также упруго рассеиваются и поглощаются ядрами азота и водорода. Поглощение и упругое рассеяние нейтронов приводит к ядерным реакциям  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ ,  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  и появлению ядер отдачи и  $\gamma$ -квантов. Хотя сечения взаимодействия нейтронов с водородом и азотом во много раз меньше сечения поглощения нейтрона изотопом  $^{10}\text{B}$ , водород и азот присутствуют в такой большой концентрации, что это дополнительное неизбежное "фоновое" облучение протонами отдачи и  $\gamma$ -квантами вносило значительный вклад в поглощенную дозу.

Несмотря на неудачу, японский нейрохирург Хатанака, который участвовал в клинических испытаниях в США, вернувшись в Японию в 1968 году, продолжил развитие этой методики. Он трепанировал череп, на открытом мозге проводил хирургическую операцию, а затем облучал опухоль пучком тепловых нейтронов. Такой методикой несколько групп в Японии на различных реакторах пролечили более 200 пациентов с очень обнадеживающими результатами [6, 7].

Параллельно большой прогресс был достигнут в синтезе содержащих изотоп  $^{10}\text{B}$  препаратов. Получены препараты, которые создают концентрацию изотопа  $^{10}\text{B}$  в опухолевой ткани до 40 мкг/г, что в 3,5 раза больше, чем в здоровой ткани. Такая концентрация позволяет сделать вклад фонового облучения приемлемо малым и действительно обеспечить возможность избирательного поражения раковой опухоли.

Достижения Хатанаки и прогресс в синтезе эффективных препаратов привели к тому, что в 1994 году возобновилось лечение пациентов с глиобластомой мозга на реакторах в Брукхевене и Массачусетсе, а позднее началось на многих других реакторах во всем мире. Очень обнадеживающие результаты получены при терапии меланомы и печени, временно удаляемой из пациента для облучения. В стадии изучения находится бор-нейтронозахватная терапия рака полости рта, рака щитовидной железы и неонкологическое применение — лечение ревматического артрита.

Целесообразность развития технологии нейтронозахватной терапии обусловлена тем, что она ориентирована на лечение таких видов злокачественных опухолей, которые практически не поддаются никаким другим методам, — глиобластомы мозга и метастазы меланомы. Так, ежегодно примерно 1 человек из каждых 20000 поражается глиобластомой мозга. Исход всегда фатальный и обычно наступает через полгода.

Хирургия или традиционная радиотерапия не останавливают распространение опухоли по всему мозгу и позволяют разве что продлить жизнь на год.

Прогресс бор-нейтронозахватной терапии в клинических испытаниях на реакторах и потенциальная востребованность методики привели к интенсивному обсуждению проблем разработки и создания нейтронного источника на основе компактного и недорогого ускорителя, которым можно было бы оснастить практически каждую онкологическую клинику.

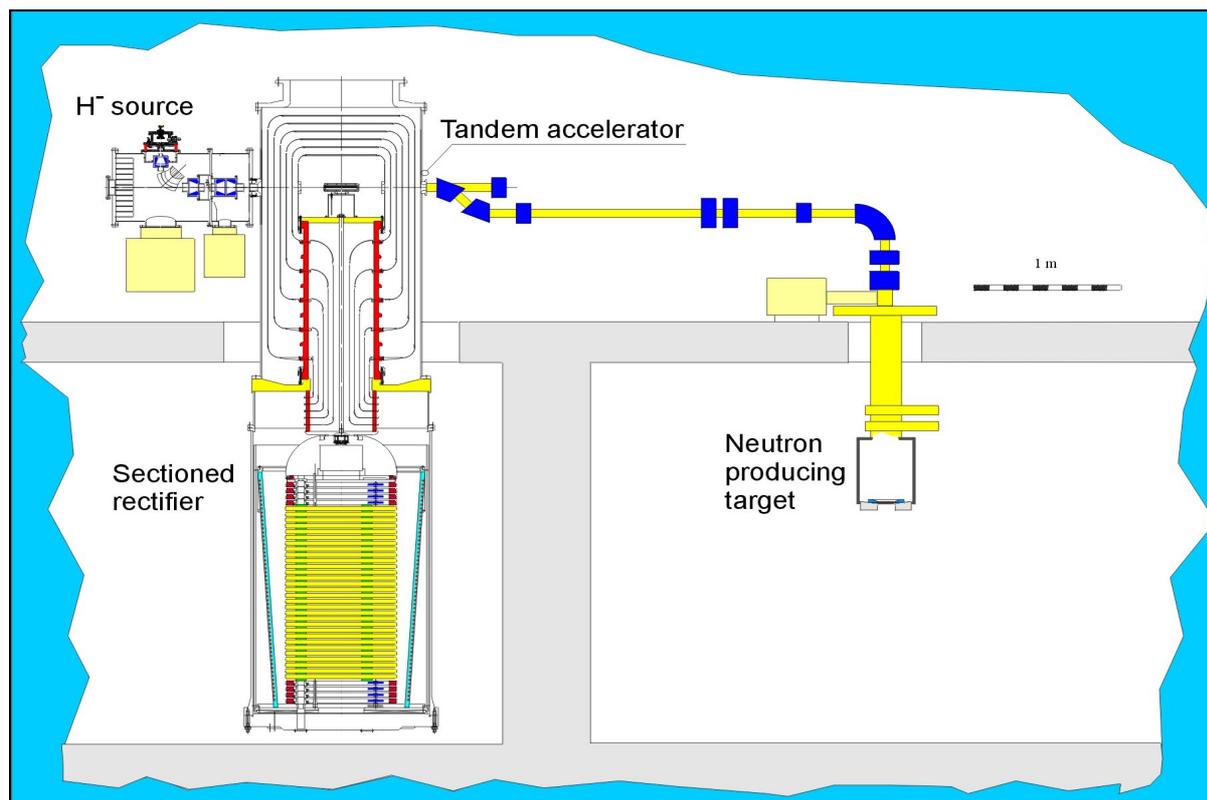


Рис. 2. Источник тепловых нейтронов на основе тандемного ускорителя с вакуумной изоляцией.

В 1998 году сотрудниками Института ядерной физики (Новосибирск), Физико-энергетического института и Медицинского радиологического научного центра (Обнинск) был предложен источник тепловых нейтронов на основе ускорителя для нейтронозахватной терапии рака в клинике (Рис. 2) [8]. Новаторский подход базируется на использовании электростатического тандемного ускорителя с вакуумной изоляцией и припорогового режима генерации нейтронов [9]. Стационарный пучок отрицательных ионов водорода инжектируется в электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией и после перезарядки отрицательных ионов водорода в протоны в перезарядной мишени на выходе из тандема формируется протонный пучок, ускоренный до энергии, соответствующей удвоенному потенциалу высоковольтного электрода. При

сбросе протонного пучка на литиевую мишень в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  генерируются нейтроны. Наиболее привлекательный режим генерации нейтронов реализуется при энергии протонов 1,915 МэВ, что на 33 кэВ выше порога реакции. В этом случае кинематически коллимированный вперед нейтронный пучок со средней энергией 40 кэВ может быть использован для БНЗТ после небольшого замедления. Во втором режиме при энергии протонов 2,5 МэВ образующиеся нейтроны имеют более сложный и широкий спектр вплоть до энергии 790 кэВ, и потому требуется достаточно протяженный замедлитель.

Одним из основных элементов установки является литиевая мишень, генерирующая нейтроны в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  при сбросе на мишень 1,915-2,5 МэВ 10 мА протонного пучка. При выборе мишени учитывались такие факторы как:

- 1) для нейтронозахватной терапии идеален энергетический спектр, в котором отсутствуют нейтроны с энергией ниже 0,5 эВ и выше 10 кэВ. Важно и отсутствие  $\gamma$ -излучения;
- 2) реакция  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  является наилучшей для генерации эпитепловых нейтронов, однако литий имеет низкую температуру плавления, плохую теплопроводность и высокую химическую активность;
- 3) каждый акт рождения нейтрона в результате реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  сопровождается появлением радиоактивного ядра изотопа бериллия. Генерация нейтронов в течение нескольких часов уже может приводить к наведенной активности, препятствующей простому обращению с мишенью;
- 4) неупругое рассеяние протонов на ядрах лития приводит к излучению  $\gamma$ -квантов энергией 0,477 МэВ. В случае, если протоны полностью поглощаются в слое лития, поток  $\gamma$ -квантов сравним с потоком нейтронов и даже может его превосходить. Существенного понижения этого паразитного потока  $\gamma$ -квантов можно достичь созданием литиевого слоя такой толщины, чтобы при прохождении этого слоя энергия протонов уменьшалась только до 1,882 МэВ – энергии порога реакции генерации нейтронов. При начальной энергии протонов 2,5 МэВ толщина этого слоя должна быть 88  $\mu\text{м}$ , при 1,915 МэВ – 4,3  $\mu\text{м}$  [10]. Дальнейшее поглощение протонов должно осуществляться в веществе, в котором упругое рассеяние протонов не приводит к излучению  $\gamma$ -квантов;
- 5) при имплантации 2 МэВ-ных протонов в твердые тела поверхностный слой может деформироваться вплоть до образования блистеров и отслаивания чешуек [11]. Появление развитой поверхности мишени может не только приводить к

усиленному испарению лития из-за уменьшения теплопроводности, но и вообще делать мишень непригодной. Оцениваемая доза по блистерингу достигается за время, сравнимое со временем планируемого облучения (около 10 мин);

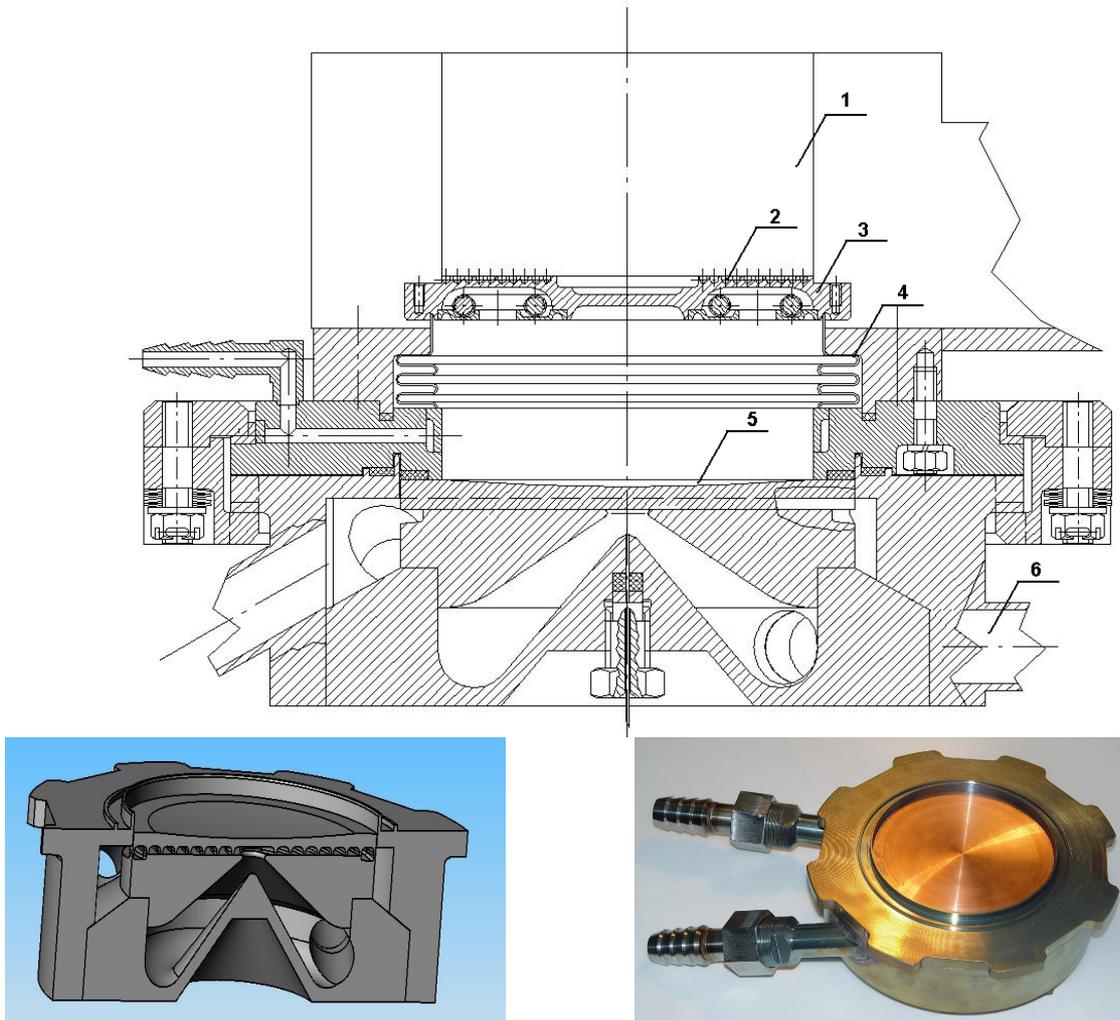
- б) чистый литий более эффективен для генерации нейтронов по сравнению с гидридом, оксидом, нитридом или фторидом лития, обладает более высоким коэффициентом теплопроводности, однако имеет несравненно меньшую температуру плавления и потому требует эффективного теплосъема при желательной более низкой температуре литиевого слоя. Возможно использование мишени с жидким литиевым слоем, однако существенное испарение лития повлечет за собой не только снижение высоковольтной электрической прочности из-за поступления паров лития, но и распространение возникающего радиоактивного изотопа бериллия по всей установке.

После проведения расчетов и тепловых испытаний на прототипах мишени было определено, что оптимальной мишенью для сооружаемого источника нейтронов является неподвижная мишень с интенсивным охлаждением водой [12].

Данная работа связана с дальнейшей разработкой мишени и посвящена напылению литиевого слоя и определению его параметров: толщины, плотности, состава. На стенде, созданном для разработки нейтроногенерирующей мишени, была отработана технология нанесения литиевого слоя, предложена оригинальная методика определения толщины лития, проведено напыление лития на мишень и измерено радиальное распределение толщины лития.

В первой главе работы описывается мишень и экспериментальная установка, во второй – предложенный метод измерения толщины литиевого слоя, в третьей приводятся и обсуждаются результаты измерений. В заключении представляются основные результаты работы.

## 1. Экспериментальная установка



*Рис. 3. Нейтроногенерирующая мишень: 1 – протонопровод; 2 – нагреватель, установленный на тарелку шибера; 3 – тарелка шибера; 4 – сильфон; 5 – приемник пучка, на который напыляется литиевый слой; 6 – ввод воды для охлаждения. Внизу приведены разрез и фотография изготовленной мишени.*

Разработанный прототип нейтроногенерирующей мишени представлен на Рис. 3. Стационарная мишень представляет собой тонкий металлический диск, на который со стороны протонного пучка напыляется тонкий слой чистого лития, а обратная сторона диска интенсивно охлаждается турбулентным потоком воды с тем, чтобы поддерживать литиевый слой в твердом состоянии. Металлический диск является приемником пучка; он изготовлен из меди и с обратной стороны имеет 4 двухоборотных спиралевидных канала для охлаждения. Система напыление лития позволяет производить напыление непосредственно на установке; при ее изготовлении был использован промышленно производимый шибера. На тарелку шибера был помещен нагреватель, а под тарелку был

установлен испаритель с круговой щелью, в который закладывается контейнер с литием. Перед напылением тарелка шибера выезжает в протонопровод и сдвигается в направлении к мишени на 5 мм, используя механизм уплотнения шибера. В результате такого сдвига тарелка упирается в сильфон, что ограничивает объем напыления. Затем включается нагреватель и происходит процесс напыления. Поскольку сильфон теплоизолирован и в процессе напыления нагревается, то напыления на сильфон не происходит. Напыление осуществляется только на мишень, которая охлаждается водой.

Исследования по напылению лития проводились на стенде, фотография которого представлена на Рис.4. Установка оснащена турбомолекулярным насосом ТМН-150, форвакуумным ЗНВП-1ДУХЛ 4.2, азотной ловушкой, манометром Pfeiffer PKR 251, системой напыления лития с нагревателем и термопарами. Мишень охлаждается водой.

Поскольку, как упоминалось ранее, при начальной энергии протонов 2,5 МэВ торможение протонов до пороговой энергии 1,882 МэВ происходит на толщине лития 88 мкм, при 1,915 МэВ – 4,3 мкм, то для генерации нейтронов требуется напылять литиевый слой толщиной от 10 до 100 мкм.



Рис. 4. Стенд для напыления лития.

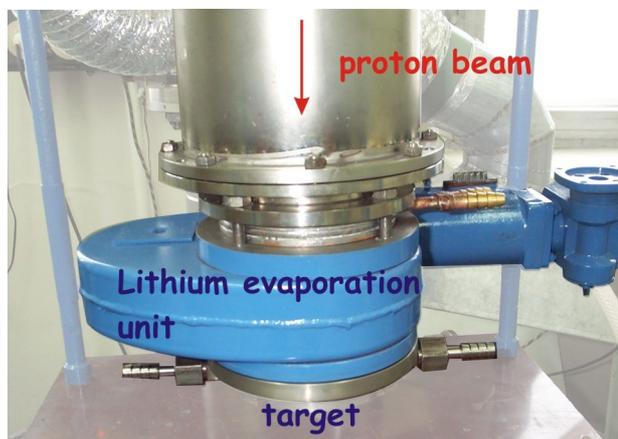


Рис. 5. Устройство напыления лития.

## 2. Методика измерения толщины литиевого слоя

Для измерения радиального распределения толщины напыленного литиевого слоя предложена новая методика. Необходимость данного предложения связана с тем, что, во-первых, литий очень активный металл, моментально образующий соединения при помещении его в воздушную среду, а во вторых, многие стандартные методики измерения в вакууме не применимы, поскольку в непосредственной близости от охлаждаемой мишени находится испаритель под высокой температурой. Так, невозможно использовать метод определения массы лития, напыленного на пьезокерамику, по изменению собственной частоты колебаний керамики, поскольку процесс напыления на керамику существенно отличается от напыления на охлаждаемую медную подложку вследствие разных температур.

Суть предлагаемого метода состоит в измерении проводимости дистиллированной воды, в которой растворяются слои лития, напыленные на тонкие свидетели из того же самого материала, что и мишень, и находящиеся в хорошем тепловом контакте с мишенью в процессе напыления. Очевидное преимущество этого метода, как будет показано ниже, состоит в том, что проводимость воды зависит только от массы растворенного лития и не зависит от того, является ли литий чистым или является каким-либо соединением (гидридом, нитридом или оксидом лития). Измерения проведены на промышленно производимом оборудовании – иономере-кондуктометре Анион 410.

Для калибровки этого метода был проведен следующий эксперимент. Из сиффона, в котором хранится литий, была выдавлена порция лития в виде стержня диаметром 4 мм длиной 34,5 мм, завернута в алюминиевую фольгу известной массы и взвешена. Из объема этой литиевой колбаски, равного  $0,433 \text{ см}^3$ , следует, что масса лития должна быть 0,234 г. Весы показали, что масса колбаски без оболочки действительно равна 0,234 г. Такое удивительное совпадение говорит о том, что значительная часть лития за непродолжительное время нахождения в воздухе не превратилась в нитрид или оксид лития, что и было видно по его виду.

Весь этот литий (0,234 г) был растворен в 100 мл воды и получилось  $100,433 \text{ см}^3$  раствора. Далее бралась часть этого раствора, объем доводился до 250 мл и измерялась удельная электрическая проводимость при контролируемой температуре (Табл. 1). На Рис. 6 представлена зависимость удельной проводимости воды от объема раствора с литием, пропорционального массе растворенного лития, и видно, что она с высокой достоверностью линейна.

Табл. 1. Зависимость удельной проводимости воды  $\sigma$  от объема раствора с литием  $V$ .

Объем раствора, мл	Объем, мл	Удельная электрическая проводимость, $\mu\text{См}/\text{см}$	$T, ^\circ\text{C}$
1	250	320	19,5
2	250	643-646	19,5
3	250	942-946	19,5
4	250	1240-1247	19,4
5	250	1548-1558	19,4
10	250	3040	19,1

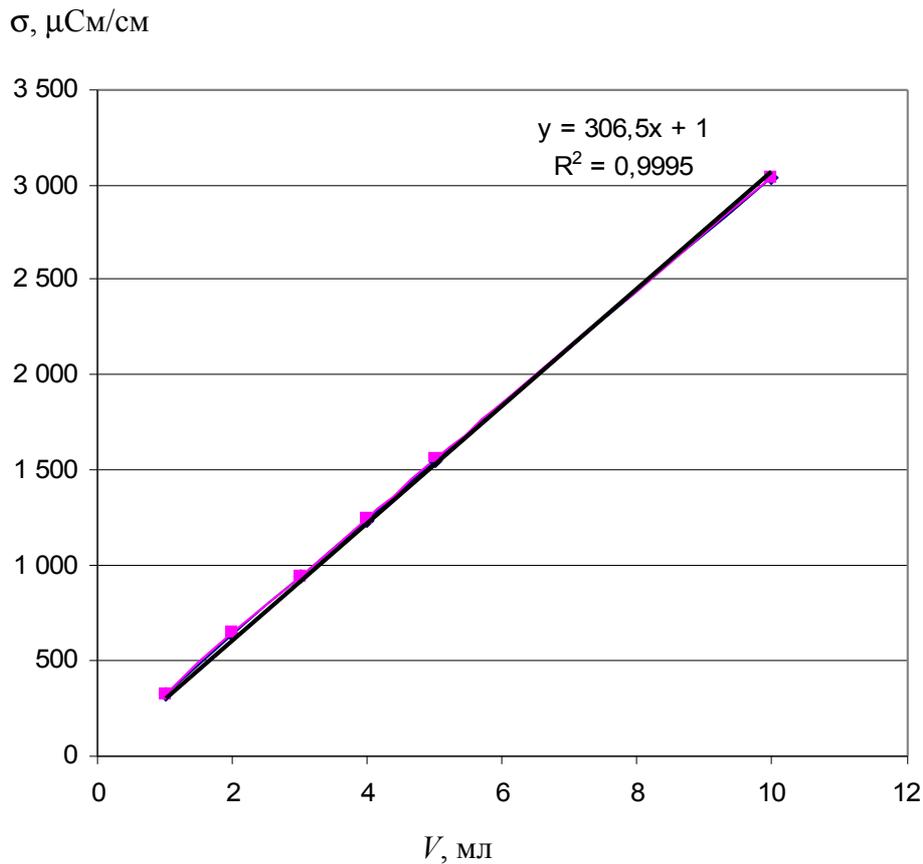


Рис. 6. Зависимость удельной проводимости  $\sigma$  от объема раствора с литием  $V$ , который пропорционален массе растворенного лития.

На рис. 7 представлена зависимость гипотетической толщины равномерного литиевого слоя (в микронах) на площади  $1 \text{ см}^2$  от измеренной удельной проводимости при растворении лития в 250 мл дистиллированной воды.

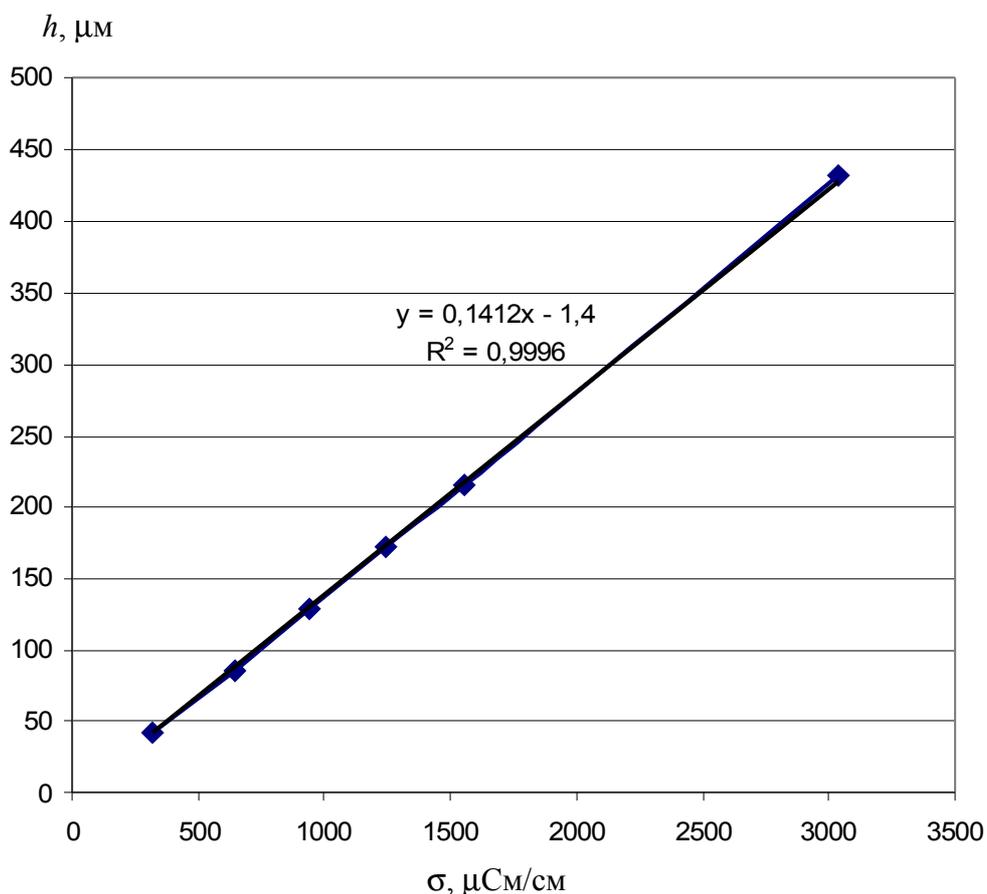


Рис. 7. Зависимость толщины литиевого слоя  $h$  от измеренной удельной проводимости  $\sigma$  250 мл дистиллированной воды, в которой был растворен литий с площади  $1 \text{ см}^2$ .

Т. о., пересчет толщины литиевого слоя  $h$  (в микронах) в предположении, что плотность лития в слое соответствует плотности металлического лития  $0,54 \text{ г}/\text{см}^3$ , от удельной проводимости  $\sigma$  (в  $\mu\text{См}/\text{см}$ ) дается следующим выражением, в котором учитывается, что удельная проводимость дистиллированной воды равна  $1 \mu\text{См}/\text{см}$ :

$$h = 0,141 (\sigma - 1).$$

Также было исследовано влияние других факторов, как то: зависимость проводимости воды от вида соединения лития и возможный вклад в проводимость индий-галлиевого соединения, обеспечивающего хороший тепловой контакт между свидетелем и мишенью и неизменно присутствующий в некотором количестве на свидетеле.

Для выяснения влияния вида соединения лития на проводимость воды, в которой он растворяется, был проведен следующий эксперимент. Из сильфона, в котором хранится литий, был выдавлен литий в виде трубочки и специальным устройством отрезаны три максимально одинаковые образца. Первый образец, который сохранял металлический блеск, был растворен сразу. Второй образец был растворен через 4 часа и

к этому времени его цвет стал черным, что возможно говорит о появлении слоя нитрида лития. Последний образец через сутки выглядел беловато-сероватым, что возможно говорит о замещении азота кислородом и о превращении лития или его значительной части в оксид лития. Результаты измерений представлены в Табл. 2. Видно, что проводимость воды не изменилась, несмотря на изменение вида лития, что делает применение этого метода безусловно привлекательным.

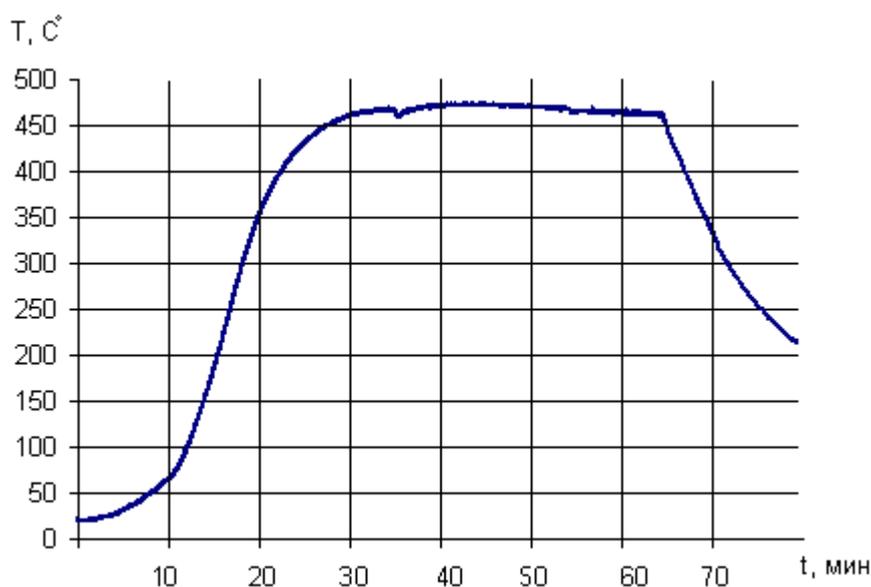
*Табл. 2. Зависимость проводимости воды от времени нахождения лития в воздухе перед растворением.*

№ образца	Время экспозиции в воздухе, час	Проводимости воды, µСм/см
1	5 мин.	2000
2	4 часа	2000
3	28 часов	2020
без образца	—	1

Очень важным преимуществом данной методики также является то, что нанесённое с обратной стороны свидетеля индий-галлиевое соединение не дает никакого вклада в изменение проводимости и потому не влияет на определение количества растворённого лития. Для проверки этого утверждения в 250 мл воды был помещен примерно грамм индий-галлиевого соединения, что на порядок больше того количества, которое может присутствовать на свидетеле, но показания проводимости не отклонились от эталона.

### 3. Эксперимент

Для определения толщины литиевого слоя на охлаждаемую мишень диаметром 10 см в два ряда (крестом) были выложены свидетели площадью  $1 \text{ см}^2$  каждый, которые через индий-галлиевое соединение имели хороший тепловой контакт с мишенью. Следует заметить, что если свидетеля просто положить на поверхность, то напыляется значительно более тонкий слой, что связано с бóльшей температурой свидетеля. После заложения в тарелку шибера контейнера с литием и откачки до вакуума  $10^{-5}$  Торр включался нагреватель. Временная зависимость температуры испарителя представлена на Рис.8.



*Рис. 8. Зависимость температуры от времени, снятая с термопары, которая расположена на тарелке шибера.*

Контейнер с литием представляет собой чистый литий, завёрнутый в тонкую алюминиевую фольгу [13]. Алюминиевая фольга предотвращает взаимодействие лития с воздухом и позволяет отказаться от необходимости работать в инертной среде для закладки лития в нагреватель. Выяснено, что для испарения лития не требуется нагревать контейнер до температуры плавления алюминия  $660 \text{ }^\circ\text{C}$  – достаточно нагревать до меньшей температуры, поскольку, вероятнее всего, при нагревании литий вступает во взаимодействие с алюминием и этот сплав расплавляется при меньшей температуре.

Пары лития вылетают со сферически симметричного отверстия диаметром 7 см шириной 0,6 см, вырезанного внизу тарелки шибера (Рис.9). Как показал расчет

бесстолкновительного разлета паров лития, такая геометрия позволяет обеспечить распределение лития по поверхности, представленное на Рис. 10.

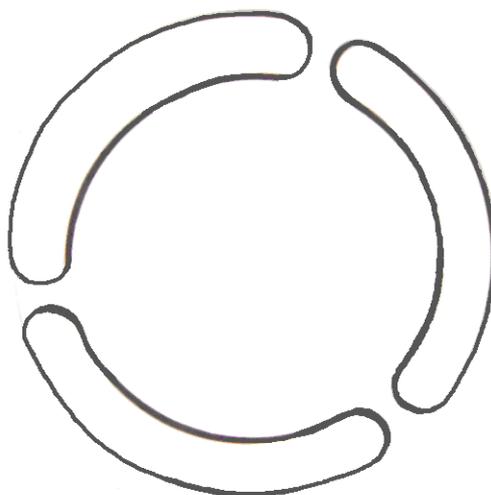


Рис 9. Вид на испаритель со стороны мишени.

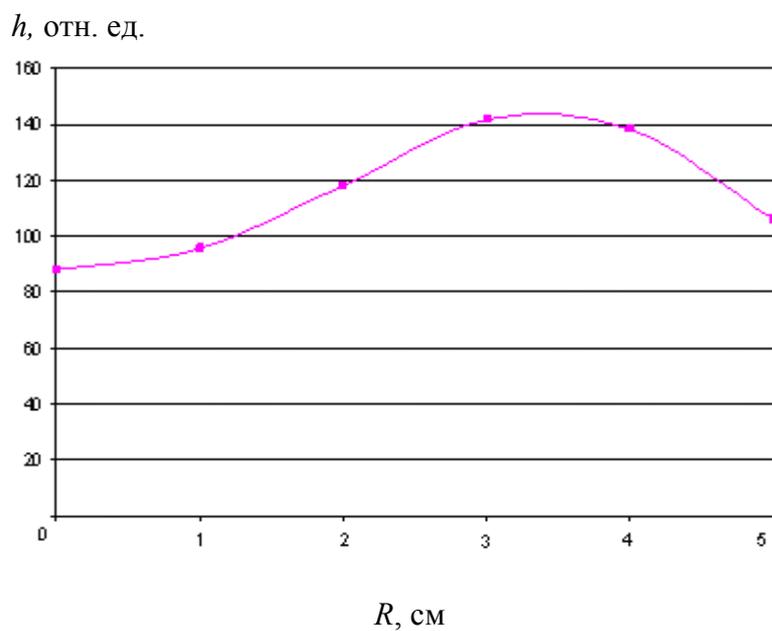
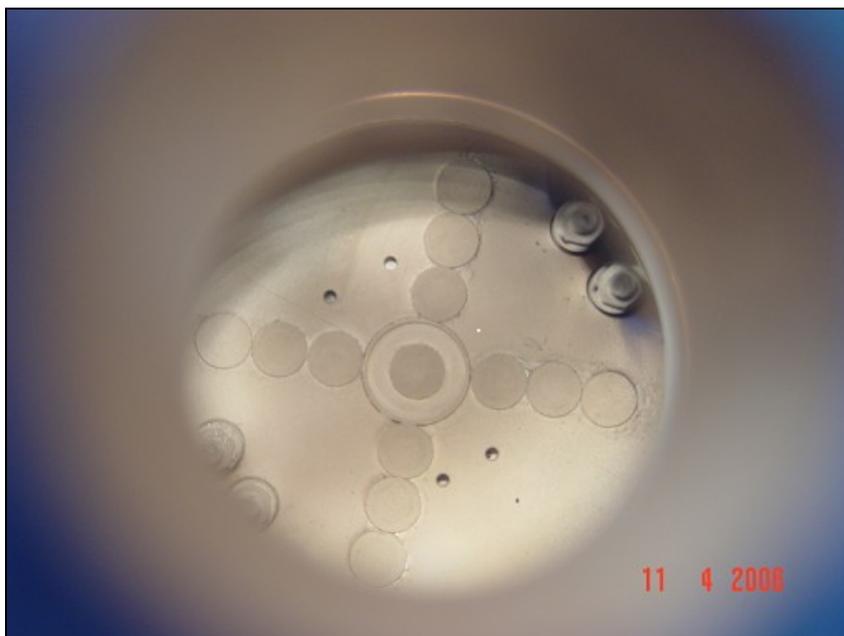


Рис. 10. Расчетное радиальное распределение толщины напыленного слоя.



*Рис 11. Фотография, сделанная сразу после напыления лития через окно в камере.*

На рис. 11 приведена фотография мишени, на которой расположены свидетели, после окончания процедуры напыления.

После напыления рабочий объём заполняется воздухом. Мишень, на которую напылён литий, снимается и свидетели растворяются в воде. По проводимости воды измеряется количество лития, напыленного на свидетеля.

На рис. 12 приведено измеренное распределение толщины литиевого слоя. Видно, что распределение достаточно хорошо согласуется с простым расчетом бесстолкновительного разлета паров лития из щели. Из Рис. 12 видно, что статистический разброс имеет величину порядка 10 % и он меньше расчетной разницы толщины слоя в 20 %. Поскольку этот статистический разброс скорее всего связан с разными тепловыми контактами между свидетелем и мишенью, то однородность слоя может быть только лучше. В любом случае, для получения более равномерного слоя следует доработать напылитель, например, сделав отверстие для напыления посередине и немного увеличив диаметр щели напылителя.

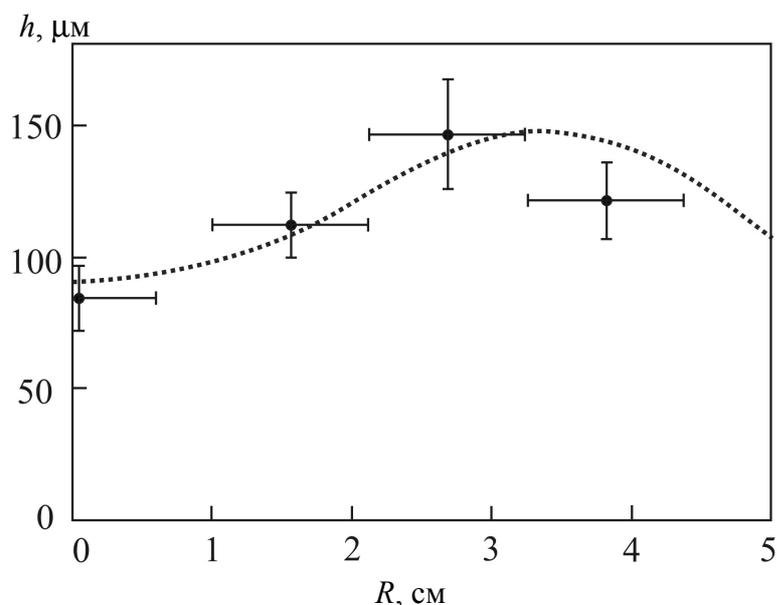


Рис. 12. Радиальное распределение литиевого слоя: ● – измеренное, ..... – расчетное.

Также были проведены прямые измерения толщины литиевого слоя путем измерения микрометром толщины свидетеля до растворения слоя в воде и после. Результаты этих измерений и результаты определения толщины слоя по проводимости воды представлены в Табл. 3. Видно их совпадение, что говорит о том, что получаемый литиевый слой не пористый и его плотность соответствует плотности металлического лития  $0,54 \text{ г/см}^3$ .

Табл. 3. Сравнение толщины литиевого слоя из измерений микрометром с толщиной из измерений проводимости воды.

№ свидетеля	Толщина по измерения микрометром, $\mu\text{m}$			Толщина литиевого слоя по измерению проводимости, $\mu\text{m}$
	Свидетель с литием	Свидетеля без лития	Литиевый слой	
1	825	735	90	97,57
2	855	745	110	94,75
3	825	730	95	94,47

## Заключение

В настоящее время в Институте ядерной физики сооружается источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя для осуществления возможности проведения бор-нейтронозахватной терапии рака в условиях онкологической клиники. Одной из основных составляющих частей установки является мишень, генерирующая нейтроны в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ .

В процессе работы отработана методика напыления литиевого слоя на подложку мишени и достигнуто равномерное напыление лития. Предложена оригинальная методика определения толщины литиевого слоя и измерено радиальное распределение толщины слоя. Выяснено, что напыляемый слой состоит из чистого лития и является плотным с плотностью металлического лития. Определено, что толщина слоя с достаточной точностью может хорошо предсказываться расчетом бесстолкновительного испарения лития и массой лития, закладываемого в испаритель.

В результате проделанной работы получена уверенность в том, что необходимый плотный литиевый слой толщиной от 10 до 100  $\mu\text{м}$  может быть получен на установке для генерации нейтронов.

Хочу выразить благодарность Баянову Борису Федоровичу за неоценимую помощь в проведение экспериментов, а также поблагодарить моего научного руководителя, Таскаева Сергея Юрьевича, за обширное участие в обработке данных, за понимание и помощь, оказанную при подготовке дипломной работы.

## Список литературы

1. G.Locher, *Biological Effects and Therapeutic Possibilities of Neutrons*, Am. J. Roentgenol. Radium Ther. **36** (1936) 1.
2. W. Sweet, M. Javid, *The possible Use of Neutron-capturing Isotopes such as boron-10 in the treatment of neoplasms*, I. Intracranial Tumors, J. Neurosurg., **9** (1952) 200-209.
3. L. Farr, *et al. Neutron Capture Therapy with Boron in the Treatment of Glioblastoma Multiforme*, Am. J. Roentgenol. **71** (1954) 279-291.
4. J. Godwin, *et al. Pathological study of eight patients with glioblastoma multiforme treated with by neutron capture radiation using boron 10*, Cancer (Phila.), **8** (1955) 601-615.
5. Asbury, *et al. Neuropathologic Study of Fourteen Cases of Malignant Brain Tumor Treated by Boron-10 Slow Neutron Capture. Therapy*, J. Neuropathol. Exp. Neurol. **31** (1972) 278-303.
6. H. Hatanaka, *Clinical results of boron neutron capture therapy*. Basic Life Sci. **54** (1990) 15-21.
7. H. Hatanaka, Y. Nakagawa, *Clinical results of long-surviving Brain Tumor Patients who underwent boron neutron capture therapy*. Int J Radiat Oncol Biol Phys **28** (1994) 1061-1066.
8. B. Bayanov, *et al. Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital*. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A **413** (1998) 397-426.
9. V. Kononov, *et al. Proc. 1<sup>st</sup> Workshop on Accelerator-Based Neutron Sources for BNCT*, Sept. 11-14, 1994, Jackson, USA, CONF-94096, v. **2**, p. 447.
10. H. Andersen (Ed.). *Hydrogen stopping powers and ranges in all elements*. Pergamon Press Inc., 1977.
11. *Распыление твердых тел ионной бомбардировкой*. Под ред. Р. Бериша. М., "Мир", 1986.
12. B. Bayanov, *et al. Lithium neutron producing target for BINP accelerator-based neutron source*. Applied Radiation and Isotopes **61** (2004) 817-821.
13. Б. Баянов, С. Таскаев. Заявка на патент ROI 355, 2006.