

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет \_\_\_\_\_ физический \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ физика плазмы \_\_\_\_\_

Направление подготовки \_\_\_\_\_

Образовательная программа: \_\_\_\_\_

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

\_\_\_\_\_ Колесников Ярослав Александрович \_\_\_\_\_

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы \_\_\_\_\_ Изучение электрической прочности отдельных изоляторов с различной  
формой поверхности \_\_\_\_\_

**«К защите допущен»**

Заведующий кафедрой,

ученая степень, звание

...../.....

(фамилия, И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

**Научный руководитель**

ученая степень, звание

должность, место работы

...../.....

(фамилия, И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 20\_\_

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Обзор литературы.....	7
1.1 Темновые токи. ....	7
1.2 Тренировка пробоями.....	7
Глава 2. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. ....	10
2.1 Описание ускорителя.....	10
2.2 Проходной изолятор. ....	11
2.3 Модернизация проходного изолятора. ....	13
Глава 3. Экспериментальный стенд. ....	15
3.1 Описание экспериментального стенда. ....	15
Глава 4. Оценочные расчеты.....	20
4.1 Электростатические расчеты. ....	20
4.2 Оценка мощности дозы тормозного излучения.....	22
4.3 Оценка предельно достижимого вакуума на стенде. ....	23
Глава 5. Результаты экспериментов. ....	25
5.1 Эксперименты с гладким керамическим изолятором.....	25
5.2 Эксперименты с ребристым керамическим изолятором. ....	27
5.3 Эксперимент с ребристым поликарбонатным изолятором. ....	29
5.4 Обсуждение результатов.....	31
Заключение .....	33
Список литературы. ....	34

## Введение

Нейтронная терапия благодаря высокой биологической эффективности нейтронов в лечении злокачественных новообразований в последние годы привлекает все большее внимание. Особенно перспективной представляется бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ). Клинические испытания методики, проведенные на ядерных реакторах, показали, что БНЗТ позволяет лечить опухоли, считающиеся практически неизлечимыми, применяемыми в настоящее время методами. Однако реакторы в силу разных причин не подходят для широкого внедрения методики в практику. Требуется компактный, недорогой и безопасный источник нейтронов, который можно будет разместить в онкологических клиниках. Такой источник может быть сделан на основе ускорителя заряженных частиц.

В 1998 году для получения сильноточных протонных пучков в ИЯФ СО РАН был предложен новый тип ускорителя – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. В настоящее время на созданном источнике нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией проводятся различные эксперименты для развития БНЗТ. Принцип методики БНЗТ прост и элегантен: пациенту вводят внутривенно борсодержащий агент, после этого часть тела с опухолями облучается потоком нейтронов. В ходе ядерной реакции  $n(^{10}\text{B}, ^7\text{Li})\alpha + \gamma$  большая часть энергии (94%) выделяется локально в радиусе  $6 \div 10$  мкм, что соответствует с размерам клеток млекопитающих. Иллюстрация идеи БНЗТ представлена на рисунке 1.

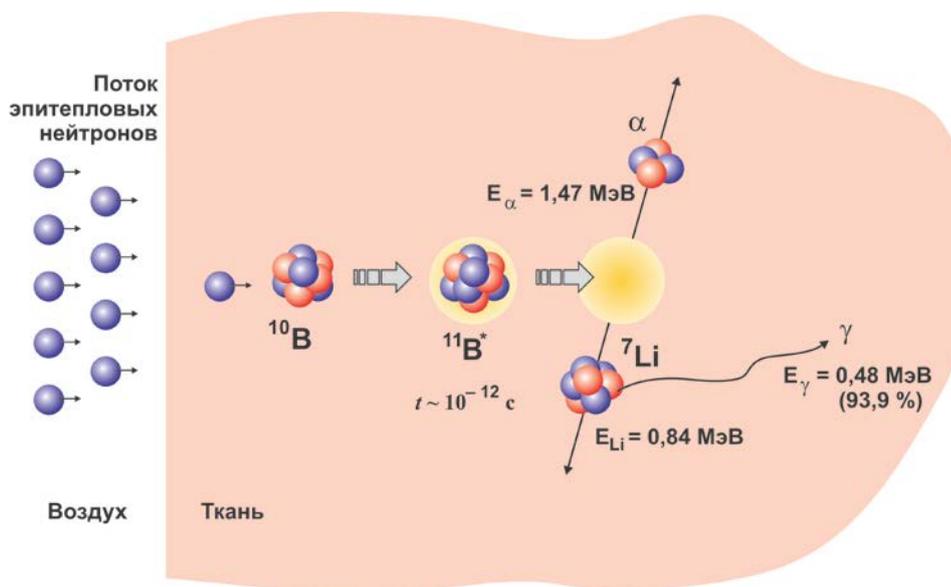


Рис. 1. Идея методики БНЗТ.

Данная методика дает возможность лечить такие тяжелые формы онкологических заболеваний, как меланома и глиобластома, неизлечимые другими методами.

В ноябре 2015 года и феврале-марте 2016 были проведены совместные эксперименты *in vitro* с коллегами из университета г. Цукуба (Япония) и ИМКБ. На установке облучались нейтронами 4 вида опухолевых клеток: 2 - глиобластома человека и 2 - фибробласты легкого китайского хомячка. Образцы получали разные экспозиционные дозы, которые отслеживались по току протонов, нейтронному детектору [1] и активации мишеней.

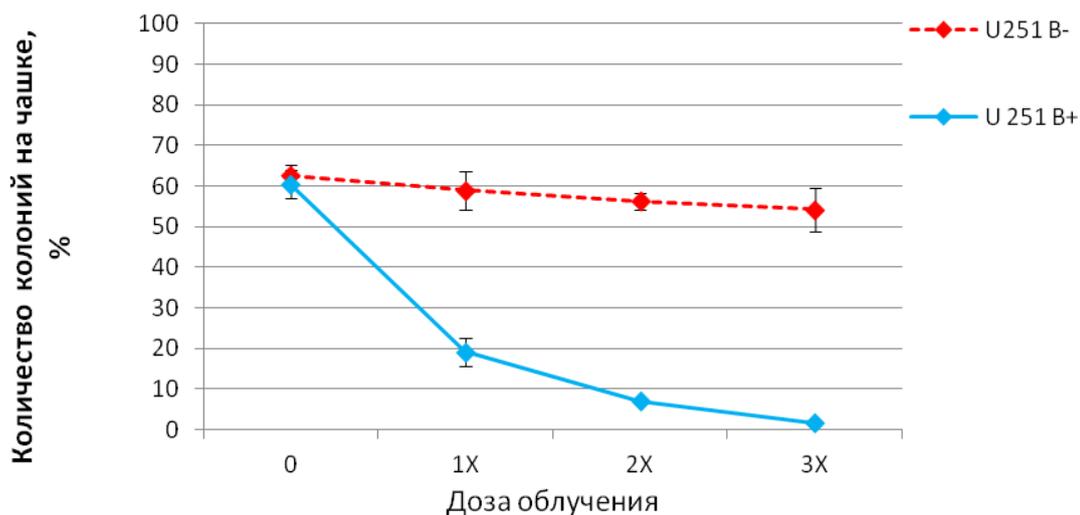


Рис. 2. Зависимость колонеобразуемости клеток U251 с бором (1) и без (2) от полученной дозы облучения.

На рисунке 2 представлена зависимость колонеобразуемости клеток U251 (глиобластома человека) с бором и без от полученной дозы облучения. X означает  $1 \pm 0,1 \text{ мА} \cdot \text{ч}$  протонного тока. Как видно из графика, сопутствующее  $\gamma$ -излучение снижает колонеобразуемость клеток на малую величину (3-4%), в то время как наличие нейтронов ведет к резкому снижению колонеобразуемости [2].

Одним из основных элементов конструкции ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией является секционированный разборный проходной изолятор. Напряжение от высоковольтного источника распределяется по электродам с помощью резистивного делителя. Из-за малой величины тока (сотни микроампер), текущего по делителю, темновые токи, возникающие в ускоряющих зазорах, способны значительно повлиять на равномерное распределение потенциала вдоль ускорительного канала, а, следовательно, и на транспортировку пучка. В связи с этим возникает необходимость изменений в конструкции проходного изолятора, которые позволят задавать потенциалы на электродах непосредственно от секций высоковольтного выпрямителя.

Целью данной работы является исследование электрической прочности отдельных изоляторов с различной формой поверхности из поликарбоната и керамики в соответствующих газовой-вакуумных условиях для выяснения возможности их использования в новой конструкции проходного изолятора. Для этого создается высоковольтный экспериментальный стенд с напряжением до 120 кВ. По результатам проведенных исследований планируется модернизация ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и уменьшение его высоты в 1,5 раза, что повысит возможность размещения нового нейтронного источника на его основе в клинических условиях.

# Глава 1. Обзор литературы

## 1.1 Темновые токи

Природа темновых токов до сих пор не раскрыта полностью. Не существуют единого взгляда на причину появления темновых токов в вакууме и при повышенном напряжении внутри. Многочисленные эксперименты показали, что при напряженностях, достаточно превышающих значения  $0,1$  кВ/мм, электронный ток в 100 и более раз преобладает над ионным [3]. Соответственно, при теоретических расчетах и оценок процессов в присутствии высокого напряжения влиянием ионного тока можно пренебречь.

## 1.2 Тренировка пробоями

Разряд с резкопадающей вольтамперной характеристикой – пробой – сопровождается изменением поверхности, где он локализован. Условно выделяют две категории пробоев – тренирующих и детренирующих. Тренирующие пробойи повышают пробивное напряжение системы, в то время как детренирующие разрушают поверхность электродов и изоляторов, уменьшая при этом пробивное напряжение.

Электрическая прочность оттренированных элементов системы, к примеру, изоляторов, существенно отличается от неоттренированных. Тренировка пробоями – процесс, имеющий предел. Для приближения к предельному пробивному напряжению необходимо сотни, а иногда и тысячи тренирующих пробоев (рисунок 3). Поэтому первая тренировка наиболее трудоемкий процесс, тогда как повторная тренировка может начинаться практически с того же напряжения, на котором была закончена первая (таблица 1).

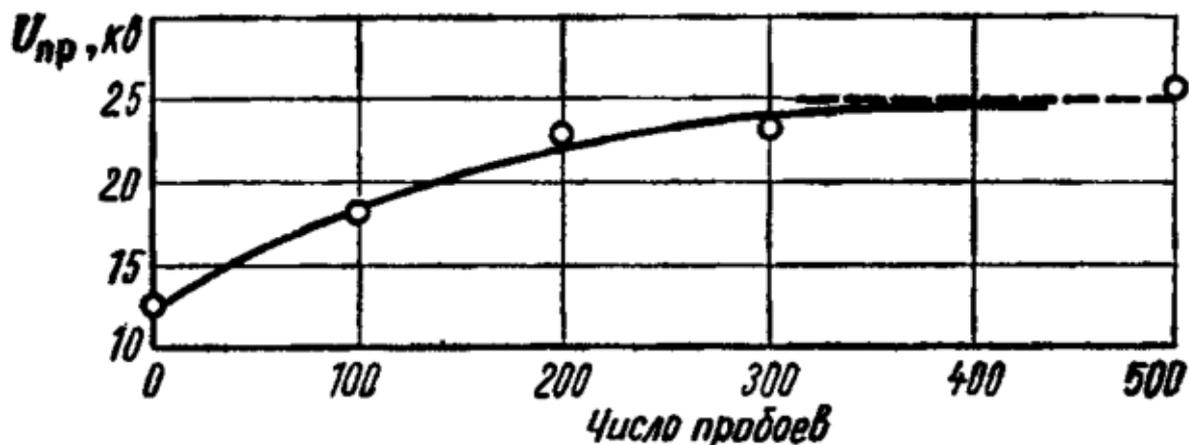


Рис. 3. Зависимость пробойного напряжения от числа пробоев [3].

Табл. 1. Пробивное напряжение в зависимости от перерыва в подаче напряжения [3].

Длительность перерыва в подаче напряжения, ч	Пробивное напряжение при первом пробое, кВ	Среднее из пяти последующих пробоев пробивное напряжение
0,1	22,5	26,7±1,0
0,5	19,5	25,9±0,9
2	22,5	25,8±1,2
4	21,5	25,4±1,1
6	17,5	25,7±1,1
7	17	25,3±1,1

При подаче высокого напряжения в системе генерируется тормозное излучение, мощность дозы которого зависит от величины темновых токов, протекающим в системе, напряжению, поданному на электроды, и зарядовому числу  $Z$  элементов системы. В процессе тренировки темновые токи, текущие внутри установки, уменьшаются, а соответственно, и мощность дозы тормозного излучения.

Измерение темновых токов напрямую во многих случаях невозможно. Однако, если имеются дозиметрические приборы, то, зная зависимость мощности дозы тормозного излучения от времени, можно сказать об уровне протекающих темновых токов (при неизменном

напряжении). Если значения токов со временем убывают, то происходит процесс тренировки. Если же значение пробивного напряжения практически не меняется со временем или уменьшается, тренировка не происходит и есть вероятность протекания процесса детренировки.

Одним из методов надежной работы высоковольтных элементов установки на заданном напряжении является тренировка на напряжении, превышающем заданное на 10 %. После тренировки на повышенном напряжении при проведении экспериментов значительно уменьшаются темновые токи и вероятность пробоя.

## Глава 2. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией

### 2.1 Описание ускорителя

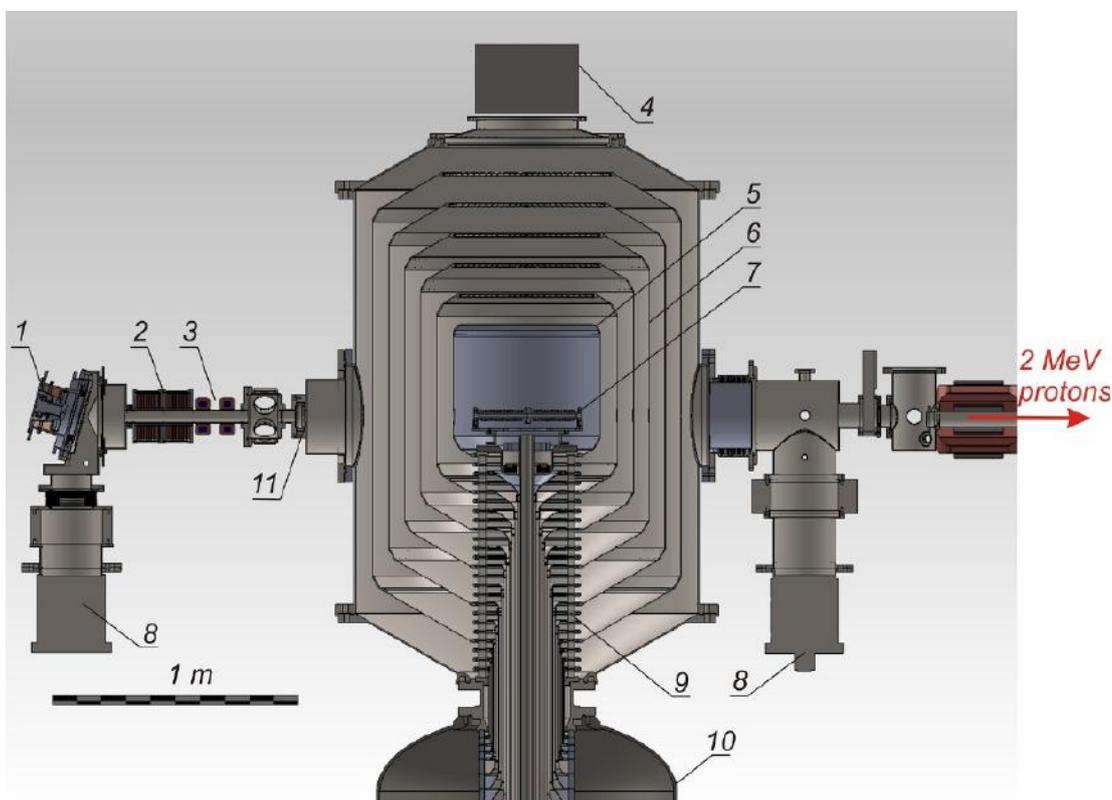


Рис. 4. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией: 1 — источник отрицательных ионов водорода, 2 — магнитные линзы, 3 — корректоры, 4 — криогенный насос, 5 — высоковольтный электрод, 6 — промежуточные электроды, 7 — газовая обдирочная мишень, 8 — турбомолекулярный насос, 9 — проходной изолятор, 10 — высоковольтный источник питания, 11 — место размещения диафрагмы или детектора.

На рисунке 4 представлена схема ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Выходящий из источника 1 пучок отрицательных ионов водорода с энергией 23 кэВ и током до 5 мА поворачивается в магнитном поле на угол  $15^\circ$ , фокусируется парой магнитных линз 2, инжектируется в ускоритель и ускоряется в нем до 1 МВ. В газовой (аргоновой) обдирочной

мишени 7, установленной внутри высоковольтного электрода 5, отрицательные ионы водорода превращаются в протоны, которые затем тем же потенциалом 1 МВ ускоряются до энергии 2 МэВ. Потенциал на высоковольтный электрод 5 и пять промежуточных электродов ускорителя 6 подается от высоковольтного источника напряжения 10 через проходной изолятор 9, в котором установлен омический делитель. Откачка газа осуществляется турбо-молекулярными насосами 8, установленными у источника ионов и на выходе ускорителя, и криогенным насосом 4 через жалюзи электродов [4].

На ускорителе получен стационарный протонный пучок с энергией 2 МэВ и током 1,6 мА с высокой монохроматичностью по энергии 0,1% и стабильностью по току 0,5% [5]. При сбросе пучка на литиевую мишень осуществлена генерация нейтронов [6] и проведено исследование влияния нейтронного излучения на клеточные культуры [7]. Для проведения терапии необходимо увеличить напряжение до 1,15 МВ и ток протонного пучка как минимум до 3 мА.

## **2.2 Проходной изолятор**

На рисунке 5 показан один из основных элементов ускорителя – секционированный разборный проходной изолятор, с помощью которого напряжение от высоковольтного выпрямителя подаётся на центральный электрод и промежуточные электроды-экраны.

Изолятор находится вне области прохождения и ускорения пучка. Изолятор состоит из двух частей – газовой, наполненной элегазом ( $\text{SF}_6$ ), и вакуумной.



Рис. 5. Проходной изолятор.

Вакуумная часть проходного изолятора собрана из 24 кольцевых стеклянных изоляторов, вакуумно плотно стянутых с промежуточными электродами через резиновые уплотнители. Высота стеклянных колец, внешняя боковая поверхность которых находится в вакууме, равна 35 мм.

Газовая часть проходного изолятора, расположенная в баке высоковольтного выпрямителя, состоит из 14 керамических колец, склеенных со своими электродами. Высота разновысоких керамических колец, боковые поверхности которых находятся в среде элегаза 30 и 60 мм. Диаметр керамических, как и диаметр стеклянных, колец составляет ~ 400 мм.

Распределение потенциала по электродам-экранам задается резистивным делителем, расположенным внутри верхней и снаружи нижней части газонаполненного проходного изолятора через систему внутренних коаксиальных цилиндров, соединяющих электроды одного потенциала нижней (газовой) и верхней (вакуумной) частей проходного изолятора.

Распределение потенциала по электродам вакуумной части изолятора, гальванически не связанным с коаксиальными трубами, задается резисторами, расположенными внутри вакуумной части проходного изолятора.

Темновые токи в ускоряющих зазорах способны значительно повлиять на равномерное распределение потенциала вдоль ускорительного канала, а, следовательно, и на транспортировку пучка, ввиду использования маломощного активного делителя напряжения и малой (сотни микроампер) величины тока по этому делителю.

### **2.3 Модернизация проходного изолятора**

Проведенные на ускорителе эксперименты показали, что необходимо поднять уровень высокого напряжения до 1,2 МВ, что в свою очередь приведет к повышению напряженности электрического поля на элементах проходного изолятора. В этом случае могут возникать токи утечки по гладкой вакуумной поверхности отдельных изоляторов, что может привести к пробоям и потере электрической прочности. Путем решения данной проблемы может стать изменение и оптимизация геометрии вакуумной поверхности отдельных изоляторов. Применение ребристой поверхности по сравнению с гладкой при неизменной высоте изолятора увеличивает длину пути тока утечки и поверхностное сопротивление изолятора.

Исследования геометрии поверхности с различными радиусами ребер и впадин [8] показали, что при оптимальных радиусах ребер и впадин выигрыш в электрической прочности ребристых изоляторов относительно гладких составляет до 100 %.

Для удаления из вакуумной части проходного изолятора резистивного делителя напряжения необходимо убрать промежуточные электроды, гальванически не связанные с электродами нижней газовой части внутренними коаксиальными трубами. Так же необходимо в вакуумной части увеличить высоту единичных изоляторов (с учетом высоты промежуточных электродов).

На рисунке 6 представлен вариант вакуумной части проходного изолятора, на котором 10 изоляторов высотой 73 мм и 4 высотой 35 мм. Газовая часть остается прежней. Таким образом, 14 электродов вакуумной части соединяются гальванически через коаксиальные трубы с 14-ю электродами газовой части.

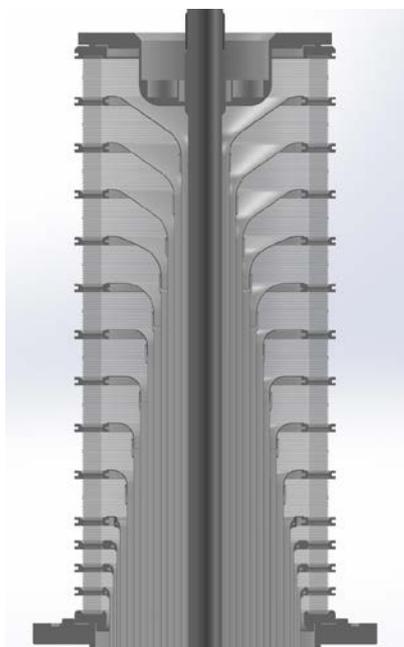


Рис. 6. Эскиз предлагаемого варианта верхней вакуумной части проходного изолятора в разрезе.

## Глава 3. Экспериментальный стенд

### 3.1 Описание экспериментального стенда

Для испытания на электрическую прочность изоляторов с высотой 73 мм из разных материалов (поликарбонат и керамика) и с различной формой наружной поверхности (ребристая и гладкая) был создан экспериментальный стенд (рисунок 7).



Рис. 7. Общий вид экспериментального стенда

Схема эксперимента на стенде представлена на рисунке 8.

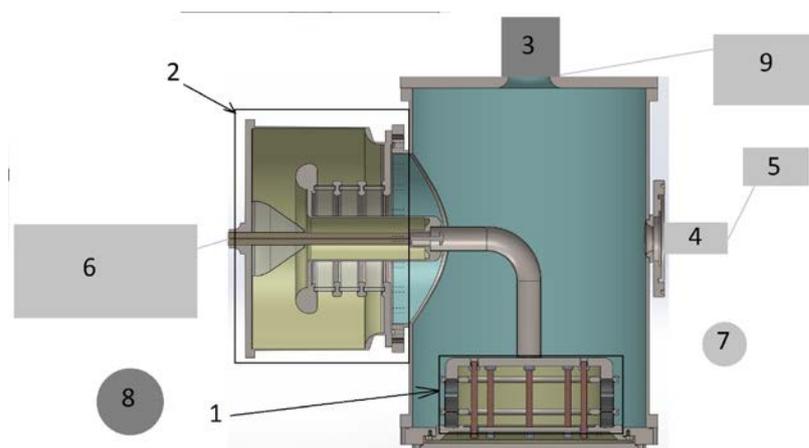


Рис. 8. Схема эксперимента. 1 – испытуемый модуль, 2 – высоковольтный ввод, 3 – турбомолекулярный насос, 4 – вакуумная лампа, 5 – блок управления вакуумной лампой, 6 – источник напряжения, 7 – блок детектирования, 8 – веб-камера, 9 – форвакуумный насос.

Испытуемый модуль 1 на рисунке 8 является главным элементом стенда. В нее входят два электрода и испытуемый изолятор. Сборка электрод-изолятор-электрод стягивается с двух сторон восемью изолированными шпильками. Собранный испытуемый модуль показан на рисунке 9. В показанной сборке стоит изолятор из поликарбоната.



Рис. 9. Испытуемый модуль стенда.

Были испытаны три различных изолятора: ребристый поликарбонатный, гладкий керамический и ребристый керамический. Их фотографии представлены ниже.



Рис. 10. Керамический (слева) и поликарбонатный (справа) ребристые изоляторы и гладкий керамический изолятор.

Внутри испытуемого изолятора давление 0,3 МПа ( $\text{SF}_6$ ), а снаружи - от  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$  Па в зависимости от материала изолятора.

Высоковольтный ввод 2 на рисунке 8 предназначен для передачи высокого напряжения внутрь экспериментального стенда. Внутри ввода во время экспериментов давление газа ( $\text{SF}_6$ )  $0,2 \div 0,25$  МПа.



Рис. 11. Высоковольтный ввод



Рис. 12. Турбомолекулярный насос Edwards nEXT 240D.

Турбомолекулярный насос 3 питается и управляется одним блоком питанием, имеет систему блокировки при сильном наклоне насоса, выходит на режим за 3 минуты, останавливается примерно за 20 минут.

Вакуумная лампа 4 на рисунке 8 управляется блоком 5.

Источник напряжения 6 (Spellman STR150N6/200/1PHASE) способен выдавать напряжения до 150 кВ. После включения высокого напряжения за секунду выходит на настроенное значение напряжения. Источник полностью сбрасывает напряжение, если за 20 последних секунд произошло четыре пробоя.

Блок детектирования системы АСРМ 7 (автоматизированная система радиационного мониторинга), разработанной в ИЯФ-е, позволяет измерять мощность дозы рентгеновского излучения и сохранять данные в файле в режиме реального времени.



Рис. 13. Блок детектирования системы АСРМ.

Контроль за значением вакуума стенда осуществляется с помощью веб-камеры 8 на рисунке 8.

Программное обеспечение управления источником напряжения позволяет настраивать максимальный ток, задавать значения напряжения и показывает текущее напряжение источника.

## Глава 4. Оценочные расчеты

### 4.1 Электростатические расчеты

Перед проведением экспериментов было проведено моделирование распределения тангенциальной и нормальной компонент напряженности электрического поля вдоль поверхностей гладкого и ребристого изоляторов [9]. Результаты расчетов представлены на рис.14 и 15.

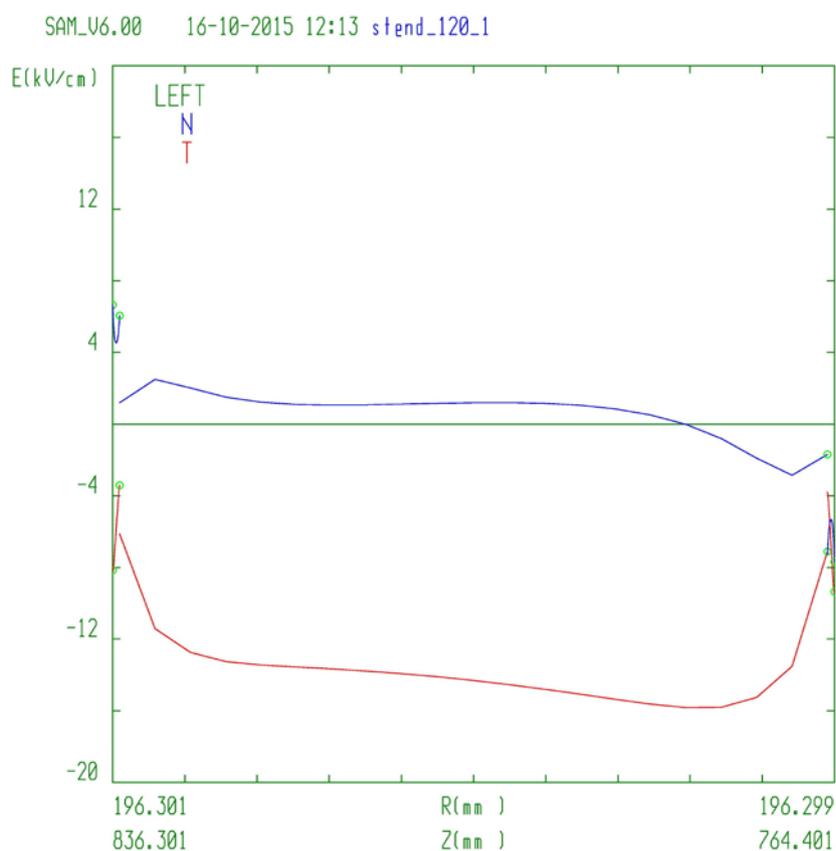


Рис. 14. Промоделированное распределение тангенциальной и нормальной компонент напряженности электрического поля вдоль поверхности гладкого изолятора.

Основным фактором, влияющим на электрическую прочность, является тангенциальная компонента поля, поскольку разряд проходит вдоль поверхности изолятора. Для гладкого изолятора, как видно на

графике, тангенциальная компонента принимает максимальные значения  $\sim 15$  кВ/см ближе к центру изолятора. Для ребристого изолятора распределение напряженности поля существенно изменяется. На каждой впадине изолятора тангенциальная компонента напряженности поля уменьшается практически до нуля, что препятствует свободному прохождению стримера вдоль поверхности изолятора. Также за счет ребристой формы изолятора его поверхность увеличивается в  $\sim 1,6$  раза. Однако максимальное значение напряженности возрастает до 23 кВ/см.

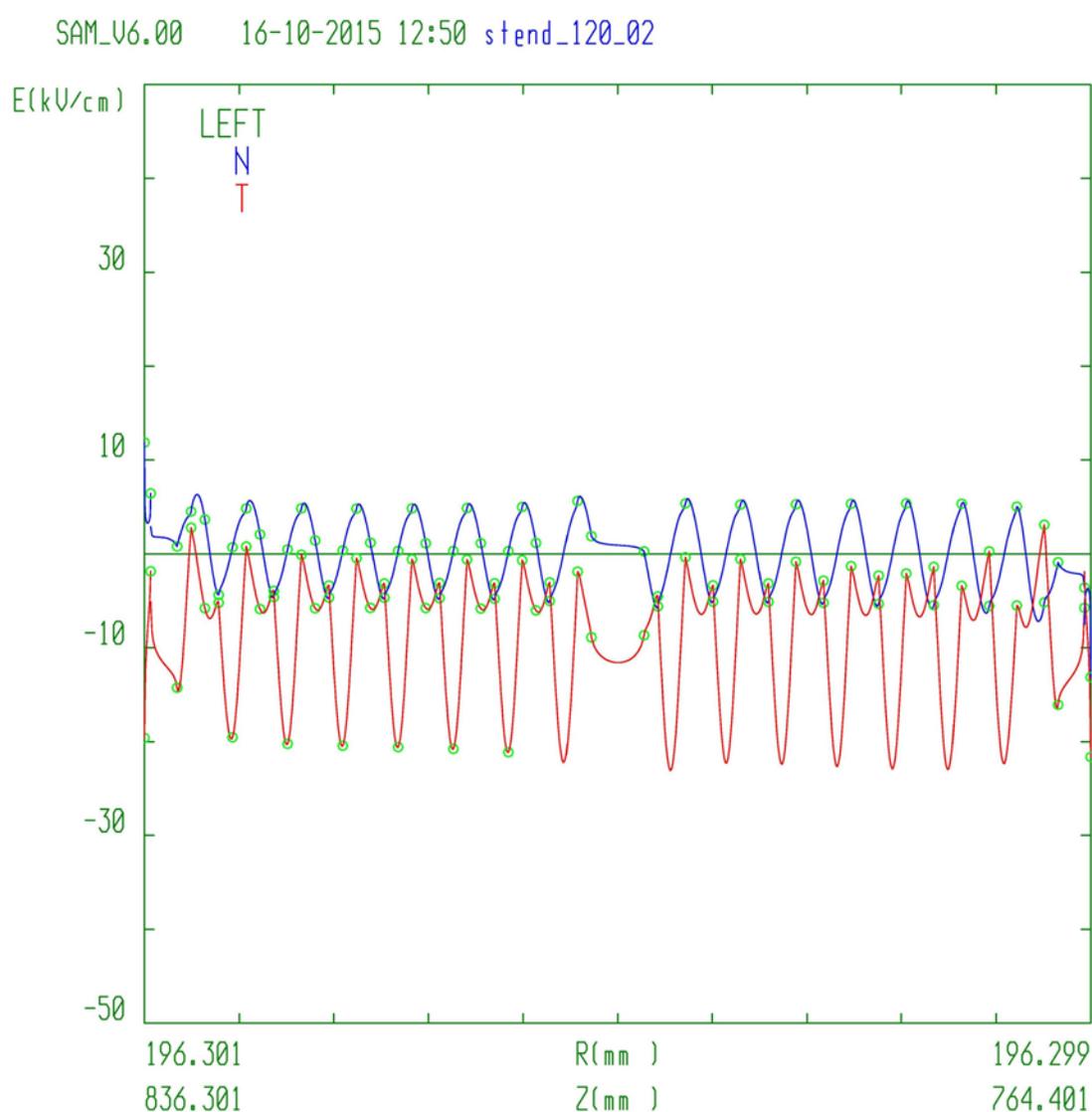


Рис. 15. Промоделированное распределение тангенциальной и нормальной компонент напряженности электрического поля вдоль поверхности ребристого изолятора.

## 4.2 Оценка мощности дозы тормозного излучения

Оценка мощности дозы тормозного излучения стенда была проведена на расстоянии 1 м от стенда. При энергиях порядка 100 кэВ основной вклад в радиацию даёт тормозное излучение электронов темнового тока. Максимальное значение темнового тока, зарегистрированного на тандеме, было 600 мкА. Если принять значение темнового тока равным 100 мкА, можно получить оценку максимальной мощности дозы тормозного излучения.

Относительный выход тормозного излучения при полном торможении электронов с энергией  $E$ , измеряемой в кэВ, на элементах с различным зарядовым числом  $Z$  равен  $\eta = 3 \cdot 10^{-6} Z E^{0,75}$  [10]. Тогда, с учетом того, что энергия 100 кэВ, относительный выход тормозного излучения получается:

Энергия, нормированная на площадку в  $1 \text{ см}^2$ , попадающая с расстояния 1 метр от стенда (который считается точечным источником радиации в данной модели), за одну секунду работы стенда оценивается выражением:

$$\dot{E} = \frac{\eta * \dot{W}}{4 * \pi * R^2} = \frac{2,47 * 10^{-3} * 10}{4 * \pi * 100^2} = 1,97 * 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$$

ослабление радиации стенками стенда ещё не учтено,  $W \approx 10 \text{ Вт}$  (по аналогии с тандемом, максимальное значение мощности на котором было зарегистрировано 60 Вт). Тогда для мощности дозы имеем

$$D = E * \gamma_{\text{eff}} = 5,9 * 10^{-9} \frac{\text{Вт}}{\text{г}} = 5,9 * 10^{-6} \frac{\text{Гр}}{\text{с}} = 5,9 \frac{\text{мкЗв}}{\text{с}} = 21,24 \frac{\text{мЗв}}{\text{ч}}$$

где  $\gamma_{\text{eff}}$  - эффективный массовый коэффициент поглощения энергии излучения в воздухе или в тканеэквивалентной среде [10]. При учете

ослабления излучения стенками стенда – 12 мм нержавеющей стали – мощность дозы рентгеновского излучения снизится в примерно 200 раз [11] и станет  $D = 0,11$  мЗв/ч.

### 4.3 Оценка предельно достижимого вакуума на стенде

Предельно достижимый вакуум рассчитывается как отношение суммарного поступающего газа в объем к суммарной откачке вакуумного объема

$$p = \frac{I_0 + I_1 + I_2}{S},$$

где  $I_0$ ,  $I_1$ , и  $I_2$  газоотделение материалов деталей вакуумной системы, газопроницаемость стенок элементов системы и натекание газа через неплотности и соединения в системе, а  $S$  – скорость откачки системы. Скорость откачки турбомолекулярного насоса по водороду  $0,165 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ , а по азоту  $0,240 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . Тогда скорость откачки по воздуху  $0,18 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ .  $I_0$ ,  $I_1$ , и  $I_2$  определяются как

$$I_0 = \sum q_0 * F, I_1 = \sum q_1 * \frac{F}{d} * \Delta p \text{ и } I_2 = \sum q_2 * l$$

соответственно, где  $q_0$ ,  $q_1$  и  $q_2$  – удельные коэффициенты газоотделения, газопроницаемости и натекания,  $F$  – площадь поверхности,  $d$  – толщина стенки,  $l$  – длина, а  $\Delta p$  – разность давлений, в случае вакуума равная  $10^5$  Па. Удельные коэффициенты газоотделения и газопроницаемости для стали марки 12Х18Н10Т и натекания через сварные швы равны соответственно  $1,3 * 10^{-6} \div 1,3 * 10^{-4} \text{ Па} * \text{м} * \text{с}^{-1}$ ,  $1,1 * 10^{-14} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$  и  $2,7 * 10^{-7} \text{ Па} * \text{м}^3 * \text{с}^{-1} * \text{м}^{-1}$  [12]. Площадь поверхности стали для стенда можно оценить, как площадь цилиндра

$$F = 2 * \pi * R * H = 2 * 3.14 * 0.6 * 1.5 \approx 7.3 \text{ м}^2,$$

толщина стали примерно 0,01 м, а длина сварного шва примерно окружность радиуса 0,5 м, то есть 3 м. При подстановке значений

газопроницаемость стенок и натекание газа через соединения становятся пренебрежительно малыми по сравнению со значением газоотделением стали, равным  $9,5 \cdot 10^{-6} \div 9,5 \cdot 10^{-4}$ . Тогда искомое предельно достижимый вакуум равен

$$p = \frac{9.5 * 10^{-6} \div 9.5 * 10^{-4}}{0.18} = 5.3 * 10^{-5} \div 5.3 * 10^{-3} \text{ Па.}$$

Полученный оценочный диапазон вакуума примерно равен вакууму в верхней (вакуумной) части проходного изолятора при проведении экспериментов на ускорителе-тандеме и был подтвержден экспериментами на самом стенде.

## Глава 5. Результаты экспериментов

Основной целью экспериментов было изучить возможность надежной работы без пробоев изоляторов с различной формой поверхности на напряжении 100 кВ в течение часа. Также интересовало поведение остаточного давления и мощности дозы рентгеновского излучения при тренировке и выстойки изоляторов на заданном напряжении.

### 5.1 Эксперименты с гладким керамическим изолятором

Первая тренировка гладкого керамического изолятора шла на протяжении 3 часов и закончилась на 105 кВ. За это время произошло ~ 220 пробоев, больше половины из которых было в период с 83 до 95 кВ.

Последующая тренировка и выстойка на протяжении полутора часов изолятора при напряжении 100 кВ (соответствующая напряженность электрического поля 13,7 кВ/см) показаны на рисунке 16.

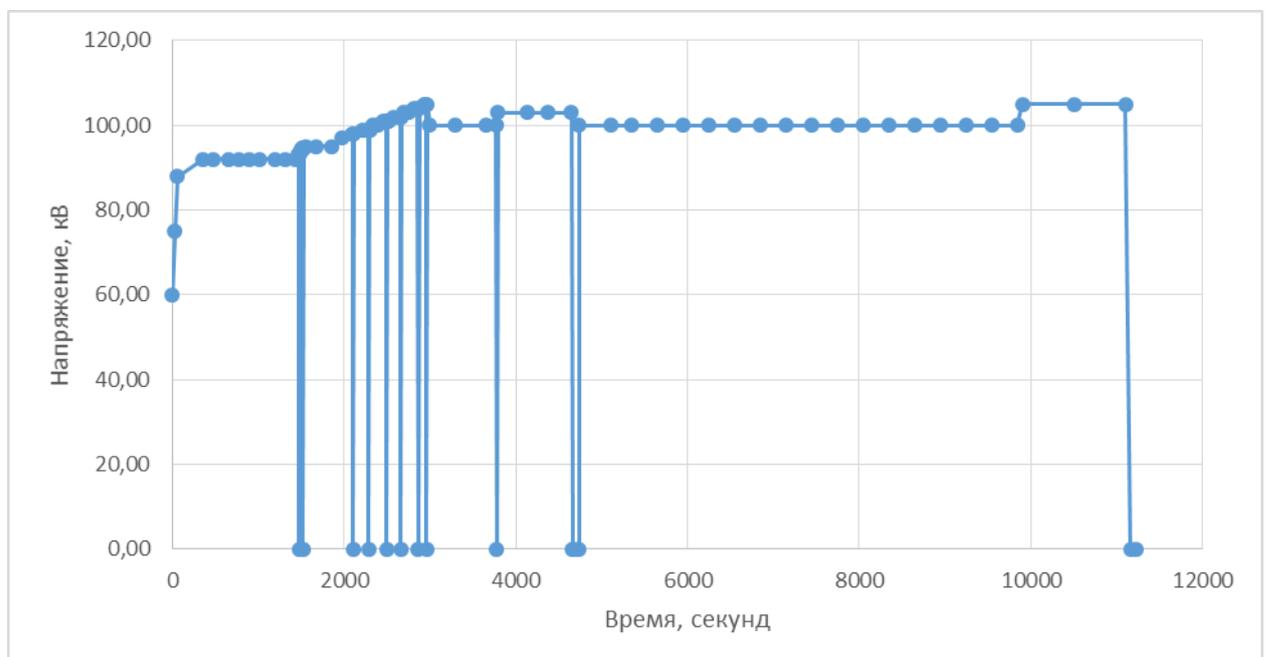


Рис. 16. Зависимость напряжения от времени при тренировке и последующей выстойки гладкого керамического изолятора на напряжении 100 кВ.

После выстойки напряжение было поднято до 105 кВ и, спустя ~20 минут, изолятор пробился.

Спустя месяц был проведен повторный эксперимент с этим изолятором. Подъем напряжения до 104 кВ длился 20 минут, как показано на рисунке 17. Это в 9 раз быстрее, чем при первой тренировке. С учетом времени подъема напряжения, изолятор простоял около часа без пробоев.

Скорость подъема напряжения была 1 кВ/мин. При каждом шаге подъема напряжения мощность дозы рентгеновского излучения возрастал, а к концу минуты падал до 0,5 мкЗв/ч. Это отображено на рисунке 18.

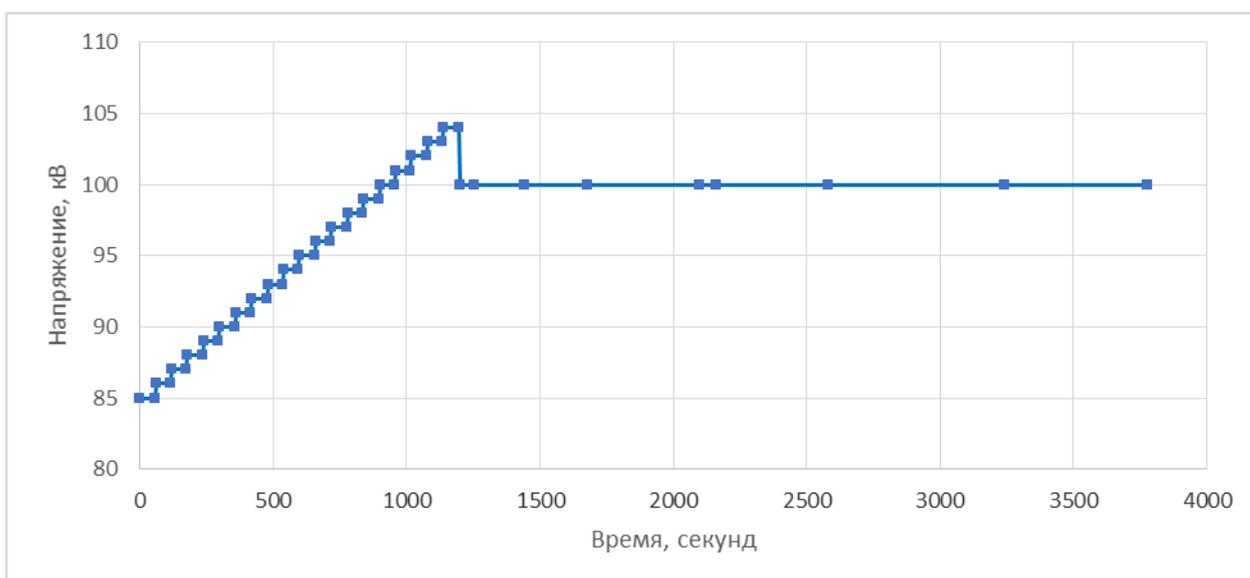


Рис. 17. Зависимость напряжения от времени при повторной тренировке и выстойки гладкого керамического изолятора на напряжении 100 кВ.

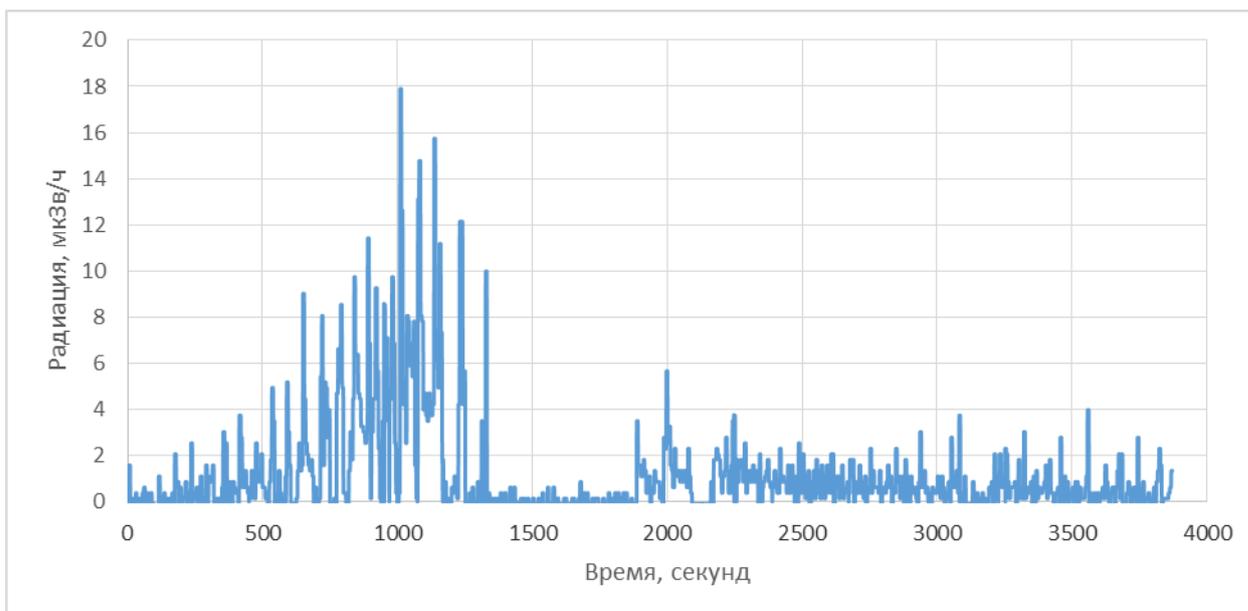


Рис. 18. Зависимость мощности дозы от времени при повторной тренировке и выстойки гладкого керамического изолятора на напряжении 100 кВ.

Максимальное напряжение, при котором изолятор стоял без пробоев 15 минут – 115 кВ, что соответствует напряженности 15,8 кВ/см. Максимальное пробивное напряжение на изоляторе с гладкой поверхностью – 120 кВ.

## 5.2 Эксперименты с ребристым керамическим изолятором

Вторая серия экспериментов была проведена с ребристым керамическим изолятором. За 40 минут тренировки удалось поднять напряжение до 83,2 кВ. После 40-минутного перерыва за 15 минут было достигнуто напряжение в 100 кВ.

Следующая тренировка до 110 кВ прошла за 20 минут. Изолятор простоял 80 минут без пробоев на напряжении 100÷105 кВ. Это показано на рисунке 19.

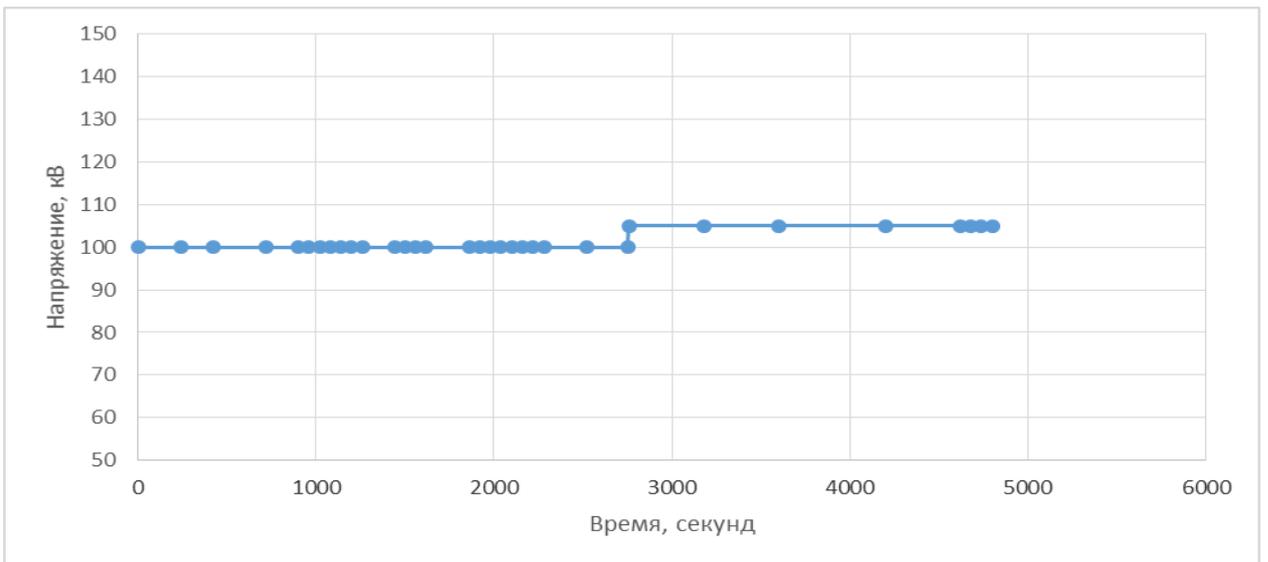


Рис. 19. Зависимость напряжения от времени при выстойки ребристого керамического изолятора на напряжениях 100 и 105 кВ.

Мощность дозы тормозного излучения во время выстойки на 100 и 105 кВ показана на рисунке 20. Она на порядок выше дозы, которая генерировалась во время выстойки на 100 кВ гладкого керамического изолятора.



Рис. 20. Зависимость мощности дозы от времени при выстойки ребристого керамического изолятора на напряжениях 100 и 105 кВ.

После выстойки напряжение было увеличено до 140 кВ (19,2 кВ/см), пока не стали появляться пробой.

### 5.3 Эксперимент с ребристым поликарбонатным изолятором

Для третьей серии экспериментов был поставлен ребристый изолятор из поликарбоната. Первая тренировка до 105 кВ прошла за 30 минут. Из графика 21 видно уменьшение радиации со временем при выстойки изолятора при напряжении 100 кВ в течении часа.

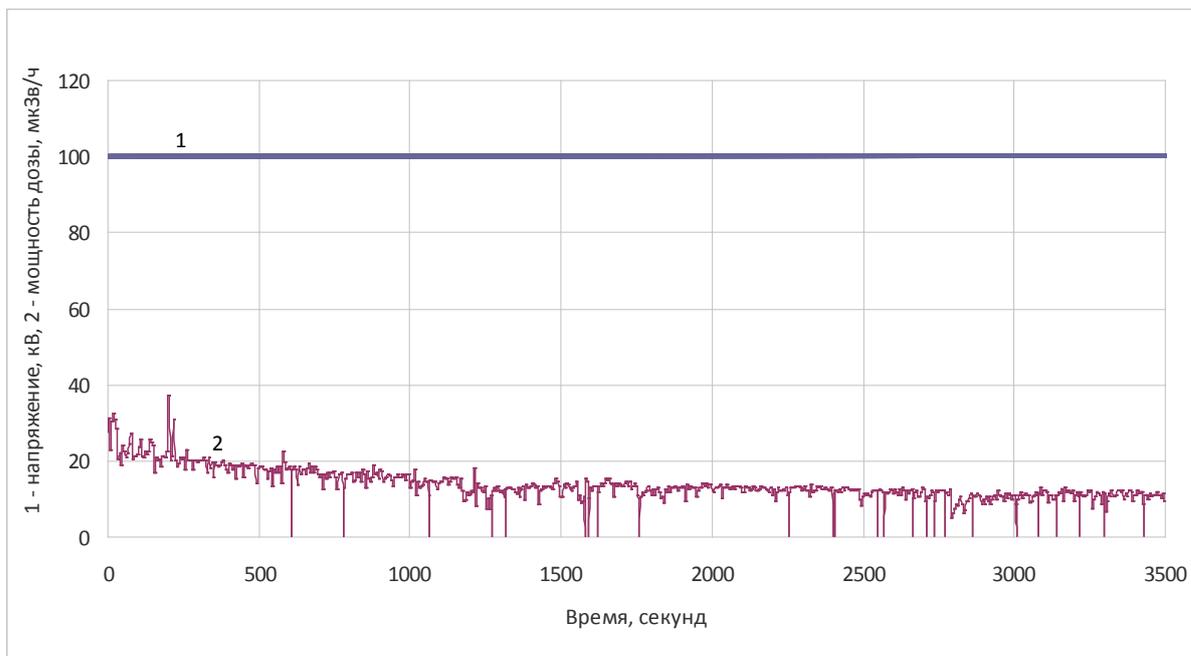


Рис. 21. Зависимость напряжения и мощности дозы рентгеновского излучения от времени при выстойки ребристого поликарбонатного изолятора на напряжении 100 кВ.

Значения вакуума во время серии экспериментов с ребристым поликарбонатным изолятором были на порядок хуже значений вакуума при проведении экспериментов с керамическими изоляторами.

После разборки испытательной части стенда на изоляторе был обнаружен след, который может быть следом от пробоя. Этот след был обнаружен на внутренней газовой ( $\text{SF}_6$ ) части изолятора. Этот след показан на фотографии ниже (рисунок 22).

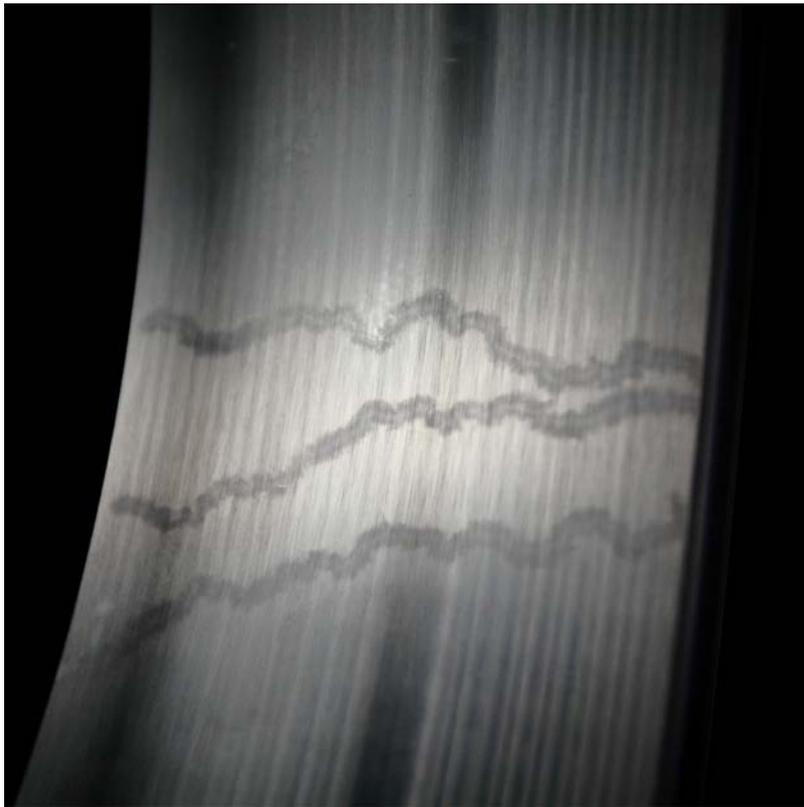


Рис. 22. След на поликарбонатном изоляторе. Справа – сторона, прижимаемая высоковольтным электродом, слева – земляным.

## 5.4 Обсуждение результатов

Результаты проведенных экспериментов показаны в таблице 2.

Таблица 2. Сводная таблица параметров изоляторов по итогам экспериментов.

Параметр/изолятор	Гладкая керамика	Ребристая керамика	Ребристый поликарбонат
Выдержка при 100 кВ	1,5 часа	1,5 часа	1 час
Максимальное пробивное напряжение, кВ	120	>140	115
Вакуум при оттренированном изоляторе, Па	$2 \cdot 10^{-4}$	Как и гладкий, но релаксация до предельного уровня происходит быстрее	$3 \cdot 10^{-3}$
Мощность дозы неоттренированного изолятора при 100 кВ, мкЗв/ч	10	130	30
Мощность дозы оттренированного изолятора при 100 кВ, мкЗв/ч	0,6	40	10
Мощность дозы вблизи максимального пробивного напряжения, мкЗв/ч	50	5000	150
Состояние изолятора	Никаких следов пробоев не обнаружено	Аналогично	Обнаружен подозрительный на пробой след

У всех трех изоляторов выдержка при напряжении 100 кВ составила час и более. При этом использование ребристого изолятора из поликарбоната ухудшает вакуум на порядок, что исключает возможность его использования в модернизированном проходном изоляторе. При выборе из двух керамических изоляторов следует руководствоваться критериями и перспективами. Для энергии 2,3 МэВ будет достаточно гладких изоляторов, они смогут быть оттренированными на более высоких напряжениях и держать 2,3 МэВ без пробоев продолжительное время. Если потребуется увеличить напряжения на ускорителе, то возможно использование единичных ребристых керамических изоляторов в общей конструкции проходного изолятора.

## Заключение

В Институте ядерной физики СО РАН для развития методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей предложен и создан источник тепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени. В ускорителе в длительном стабильном режиме получают протонный пучок энергией 2 МэВ с током 5 мА и на литиевой мишени осуществляют генерацию нейтронов, пригодных для проведения *in vitro* и *in vivo* исследований методики БНЗТ. Для лечения больных методикой БНЗТ необходимо увеличить энергию протонного пучка до 2,3 МэВ. Для обеспечения высоковольтной прочности проходного изолятора при увеличенном напряжении предполагается осуществить его модернизацию.

В работе проведены расчетные исследования тангенциальной и нормальной компонент напряженности электрического поля вдоль поверхностей изоляторов различных форм. На созданном высоковольтном стенде испытаны три различных изолятора – гладкий керамический, ребристый керамический и ребристый поликарбонатный. Измерены зависимости напряжения, мощности дозы тормозного излучения и давления остаточного газа от времени тренировки и выстойке изоляторов. На основе полученных экспериментальных результатов дана рекомендация использовать в новом проходном изоляторе керамические изоляторы с ребристой поверхностью.

## Список литературы.

- 1) Макаров А.Н. Измерение спектра эпитепловых нейтронов ускорительного источника времяпролетным методом. Дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. – Новосибирск, 2015. – 109 с.
- 2) Волкова О.Ю., Мечетина Л.В. и др. Влияние нейтронного излучения на жизнеспособность клеточных структур, инкубированных в среде с бор - 10. Вестник рентгенологии и радиологии.
- 3) Сливков И.Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. Москва атомиздат 1972.
- 4) Касатов Д.А., Макаров А.Н., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. Регистрация тока, сопутствующего ионному пучку в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып.3, стр. 74-80.
- 5) Shchudlio I., Taskaev S., Kasatov D., Dokutovich V., Makarov A., Sorokin I., Kolesnikov Ya., Sokolova E., Kuznetsov A., Ostreinov Yu. Three-fold increase of the proton beam current in the vacuum insulation tandem accelerator. Proc. Of the 7 International Particle Accelerator Conference, May 8-13, 2016, Busan, Korea, TUPMR003.
- 6) Кузнецов А.С., Малышкин Г.Н., Макаров А.Н., Сорокин И.Н., Суляев Ю.С., Таскаев С.Ю. Первые эксперименты по регистрации нейтронов на ускорительном источнике для бор-нейтронозахватной терапии. Письма в ЖТФ, 2009, том 35, выпуск 8, стр. 1-6.
- 7) Мостович Л.А., Губанова Н.В., Куценко О.С., Алейник В.И., Кузнецов А.С., Макаров А.Н., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю., Непомнящих Г.И., Григорьева Э.В. Влияние эпитепловых нейтронов на жизнеспособность опухолевых клеток глиобластомы *in vitro*.

- Бюллетень экспериментальной биологии и медицины, 2011 г., Том 151, №2, стр. 229-235.
- 8) Крючков А. М., Сорокин И.Н., Широков В.В. Работы по исследованию и созданию ускорительных трубок высоковольтных ускорителей заряженных частиц. ИЯФ, 1994.
  - 9) Касатов Д.А., Колесников Я.А., Кошкарев А.М., Кузнецов А.С., Макаров А.Н., Соколова Е.А., Сорокин И.Н., Сычева Т.В., Таскаев С.Ю., Щудло И.М. Эксперименты по повышению параметров ВИТА для проведения БНЗТ. Письма в ЭЧАЯ (принято к публикации в 2016 г.).
  - 10) Инструкция РБ-30/7412-03-07 по радиационной безопасности на установке «Тандем-БНЗТ» (Здание 18).
  - 11) Trout E.D. et al. X-ray attenuation in steel – 50 to 300 kVp // Health Physics, 1975, v.29, p. 163-169.
  - 12) Персов Б.З. Расчет и проектирование экспериментальных установок. Институт компьютерных исследований, 2004.