

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

Факультет физики

Можаев Кирилл Александрович

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ  
ИСТОЧНИК**

Выпускная квалификационная работа  
по направлению подготовки 03.03.02 Физика  
образовательная программа «Физика»

Руководитель

к.ф.м.н., старший научный  
сотрудник, доцент базовой  
кафедры физики низких  
температур факультета  
физики НИУ ВШЭ при  
Институте физических про-  
блем РАН им. П.Л. Капицы

В.В. Завьялов

Рецензент

к.ф.м.н., старший научный  
сотрудник, доцент базовой  
кафедры физики низких  
температур факультета  
физики НИУ ВШЭ при  
Институте физических про-  
блем РАН им. П.Л. Капицы

Д.И. Холин

Москва, 2022 год

# Оглавление

<b>Глава 1. Постановка задач</b> .....	<b>3</b>
<b>Глава 2. Теоретическая часть</b> .....	<b>4</b>
2.1 Электрический пробой в гелии . . . . .	4
2.2 Высоковольтные источники . . . . .	5
2.3 Двумерный электронный газ над поверхностью жидкого гелия. . . . .	7
2.4 Термоэлектронная эмиссия . . . . .	11
<b>Глава 3. Экспериментальная часть</b> .....	<b>13</b>
3.1 Высоковольтный источник . . . . .	13
3.2 Измерительная ячейка для экспериментов с напуском электронов . . . . .	13
3.3 Напыление электронов . . . . .	15
<b>Глава 4. Результаты</b> .....	<b>16</b>
4.1 Напряжение источника . . . . .	16
4.2 Применение высоковольтного источника для изучения электронов на поверхности гелия в студенческом практикуме . . . . .	16
<b>Глава 5. Заключение</b> .....	<b>20</b>
<b>Глава 6. Приложения</b> .....	<b>21</b>
Список литературы.....	24

# Глава 1. Постановка задач

Данная работа направлена на создание и сборку компактного источника высоковольтного напряжения, который можно устанавливать в стеклянном сосуде дьюара. Такой источник может создавать постоянный высокий потенциал непосредственно в жидком гелии не используя высоковольтные электрические вводы на теплой капке криостата, которые сильно усложняют работу. Это может быть актуально для решения задач локального создания больших градиентов электрического поля, например, для исследования подвижности зарядов в гелии.

Работа состоит из нескольких последовательных частей: сборка высоковольтного источника, системы измерения для него и адаптация установки для проведения экспериментов по наблюдению зарядов на поверхности жидкого гелия.

Задачи, которые необходимо было выполнить для достижения цели: проектирование экспериментальной установки, сборка экспериментальной установки, создание схемы для измерения и контроля напряжения, исследование возможности применения прибора в студенческом низкотемпературном практикуме.

## Глава 2. Теоретическая часть

### 2.1. Электрический пробой в гелии

При нормальных условиях диэлектрик не проводит электрический ток. Но если поместить диэлектрик в электрическое поле, превышающее определенную величину, возникает электрический пробой диэлектрика. Значение напряжения, при котором происходит пробой, называют пробивным напряжением ( $U_{пр.}$ ).

На протяжении длительного времени наблюдается интерес научного сообщества к изучению электрического пробоя в жидком гелии. Это связано с тем, что с практической точки зрения жидкий гелий может быть интересен как среда-изолятор для проведения экспериментов по ядерной физике, физике частиц и астрочастиц при криогенных температурах.

Как правило, частицы и другие загрязнения в жидкости влияют на свойства электрического пробоя. Однако в случае работы в жидком гелии ( $^4\text{He}$ ) ожидалось, что примеси будут оказывать менее значимый вклад, поскольку все возможные примеси вымерзают при температурах жидкого гелия. Вдобавок, достаточно тяжелые частички просто осядут на дно контейнера из-за маленькой плотности жидкого гелия.<sup>1</sup>

В реальности, в жидком гелии пробой начинается раньше, из-за эмиссии зарядов на электродах с образованием в объеме гелия электронных пузырьков (бэбблонгов). При полях меньших критического эти заряды достаточно медленно дрейфуют. В полях больших критических электроны освобождаются, ускоряются и образуют лавину пробоя, которая возникает при наборе электроном энергии выше энергии ионизации гелия (24.5 эВ). Кроме образовавшихся при такой ударной ионизации вторичных электронов и ионов, объем в ячейке заполняет-

---

<sup>1</sup>хотя ниже  $\lambda$ -точки, когда вся толща жидкого гелия пронизана квантовыми вихрями, на осях вихрей можно наблюдать скопление и коагуляцию полученных методом лазерной абляции металлических кластеров, образующих нитевидные проводящие структуры [1].

ся резонансными (24.5 эВ) фотонами, которые инициируют ионизацию уже во всем объеме, даже там, где поле меньше критического.

## 2.2. Высоковольтные источники

Устройства получения высоковольтного напряжения путем механического перемещения зарядов известны давно и самым известным представителем таких устройств является изобретенный еще в 1929 году классический генератор Ван дер Граафа, на котором были получены потенциалы до 7 миллионов Вольт. Это довольно громоздкая и дорогая машина, – нас же интересует компактный источник, который можно поместить в стеклянный дьюар и который может создавать постоянный высокий потенциал непосредственно, *in situ* в жидком гелии не используя высоковольтные электрические вводы на теплой капке криостата, которые сильно усложняют работу. В работе [2] описана конструкция таких теплых вводов, которые сильно увеличивают габариты и защитные зоны установки, что не подходит для целей низкотемпературного практикума для студентов.

Наиболее близким по назначению к исследуемому нами емкостному источнику является генератор Кавалло, описанный им в 1795 году [«A complete treatise on electricity.» Volume 3, 4th edition, C. Dilly, London, U.K. (1795) – ссылка недоступна] и воспроизведенный в более современной работе [3]. Этот генератор представляет собой четырехобкладочный конденсатор с циклическим перемещением второй сверху обкладки для механического переноса зарядов, наведенных полем низковольтной верхней пластины, к высоковольтной пластине. Потенциал нижней высоковольтной пластины в этой схеме увеличивается ступенчато, в отличие от нашей схемы, в которой осуществляется плавное изменение потенциала.

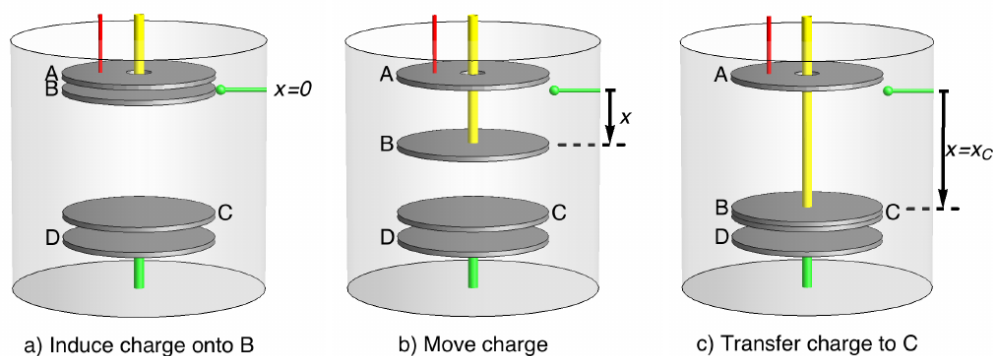


Рис. 2.1. Схема источника Кавалло из работы [3].

Максимальный высоковольтный потенциал, который можно получить от расположенного в жидком гелии емкостного источника, определяется физическими процессами, связанными с созданием и электрическим дрейфом зарядов в жидком гелии, исследование которых не потеряло актуальности, особенно ввиду необходимости разработки инженерных решений при создании мощных криомагнитных устройств. Если исключить фото- и прочую эмиссию электронов непосредственно с поверхности электродов, то жидкий гелий можно считать практически идеальным изолятором ( $\Omega > 10^{14} \text{ Ohm/cm}$ ), ток утечки в котором определяется радиационным (космическим) фоном. Флуктуации этого фона приводят к тому, что вероятность электрического пробоя вблизи порогового его значения начинает зависеть от времени приложения этого поля. Такой эффект подробно исследован в работе [4], в которой приведены экспериментальные данные и анализ эмпирических результатов по электрической прочности жидкого гелия в зазорах между электродами из нержавеющей стали в диапазоне температур 1.7–4.0К

Эмпирические результаты для определения пробивного напряжения в криогенных устройствах собраны в обзоре [5], в котором приведены практические данные по электрической прочности вакуумной, газовой, жидкостной и твердотельной изоляции при низких температурах. Для интересующего нас случая электрического пробоя в гелии в данном обзоре приведена диаграмма, изображенная на рисунке 2.2.

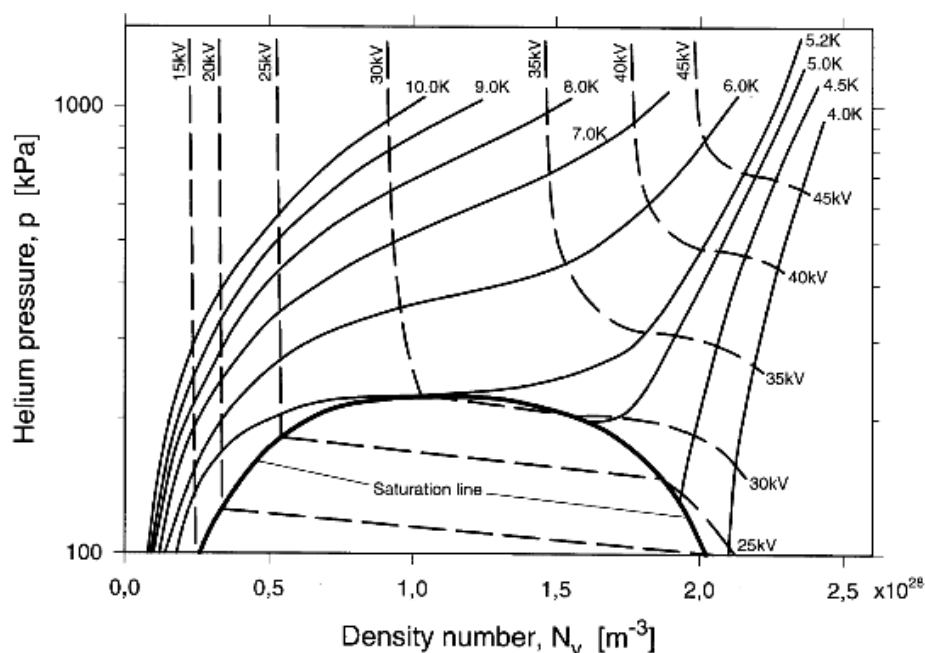


Рис. 2.2. Диаграмма пробивного напряжения в гелии для зазора в 1 мм между плоскими электродами площадью 28 см<sup>2</sup>

### 2.3. Двумерный электронный газ над поверхностью жидкого гелия.

Жидкий гелий является уникальным веществом для исследования целого ряда физических явлений. Одна из интересных сфер для исследований - двумерный газ электронов над поверхностью жидкого гелия [6].

Для проникновения свободного электрона в жидкий гелий, он должен преодолеть потенциальный барьер около 1 эВ. Это связано с тем, что у гелия отрицательное сродство к электрону - свободному электрону невыгодно находится с атомом гелия рядом.

В то же время гелий имеет диэлектрическую проницаемость  $\epsilon = 1,057$ , благодаря чему возникает некоторая сила притяжения электрона к поверхности гелия. Притягивающий потенциал в этом случае выглядит следующим образом:

$$\phi(z) = -\frac{e^2(\epsilon - 1)}{4(\epsilon + 1)z} \quad (2.1)$$

Импульс электрона  $p$  можно оценить из принципа неопределенности Гейзенберга:  $p \approx \hbar/z$ . Применяя знания о теореме вириала, получаем в данном случае следующее уравнение:

$$\frac{2p^2}{2m} = \frac{e^2(\epsilon - 1)}{4(\epsilon + 1)z} \quad (2.2)$$

Отсюда получается характерное расстояние электрона над поверхностью жидкого гелия:

$$z \sim \frac{\hbar^2 (\epsilon + 1)}{me^2 (\epsilon - 1)} \approx 100 \text{ \AA} . \quad (2.3)$$

**Эксперимент Хайкина и Володина.** В статье 1978 года было описано нарушение устойчивости заряженной поверхности жидкого гелия и образование баблонов.

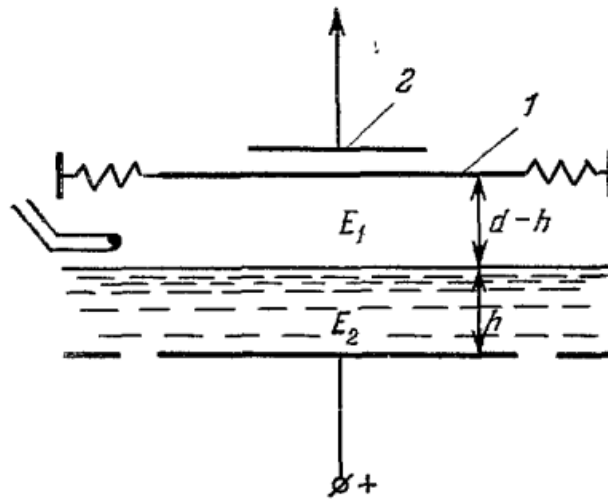


Рис. 2.3. Схема эксперимента Хайкина и Володина[7]

- 1 – подвижный катод конденсатора на пружинах;
- 2 – электрод емкостного датчика положения катода.

Эксперимент проводился в дьюаре с оптическими окнами. Уровень гелия устанавливался между горизонтальными пластинками конденсатора. Электрическое поле в этом случае измеряли по перемещению верхней пластины конденсатора. Источник электронов – вольфрамовая нить накала. Регулировка электрического поля (и, соответственно, поверхностной плотности заряда) и достижение критических параметров, при которых наблюдалось возникновение неустойчивости на

поверхности, достигались двумя способами: понижением уровня гелия  $h$  в зазоре конденсатора, либо повышением напряжения  $U$  на обкладках конденсатора.

До напуска электронов на поверхность гелия поле между пластинами конденсатора равно:  $E = \frac{U}{d}$ , где  $d$  – расстояние между обкладками конденсатора.

После включения эмиттера электронов они устремляются вниз под действием поля  $E$  и начинают скапливаться на его поверхности. Это продолжается до тех пор, пока поле, индуцируемое электронами, полностью не компенсирует внешнее прижимающее поле.

Над заряженной поверхностью гелия результирующее поле равно разности поля  $E$  и поля  $E'$ , созданного слоем электронов, а поле ниже поверхности – сумма этих полей (см. Рис.2.4):  $E_1 = E - E' = 0$ ,  $E_2 = E + E' = \frac{U}{h}$ . Отсюда получается:

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2} = \frac{U}{2h} \quad (2.4)$$

Последняя формула справедлива для случая максимального поверхностного заряда, когда граница жидкого гелия находится в середине конденсатора с бесконечными обкладками и в пренебрежении мало отличающейся от единицы диэлектрической проницаемости гелия. В более общем случае, учитывая, к тому же, наведенные на обкладках конденсатора поверхностным зарядом поляризационные заряды, формула получает более сложный вид [8]:

$$E = \frac{U - 4\pi\sigma(d - 2h)/(1 + \varepsilon)}{d - h(\varepsilon - 1)/\varepsilon}, \quad (2.5)$$

где  $\sigma$  – плотность поверхностных зарядов. Далее для оценок мы будем использовать более простую приближенную формулу 2.4.

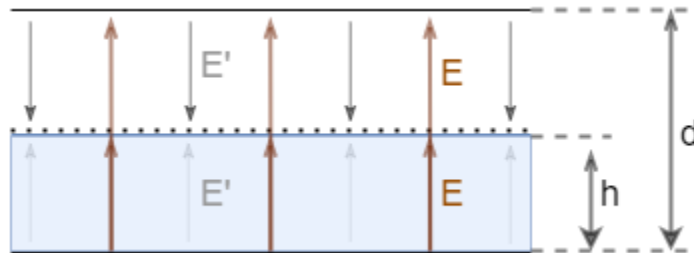


Рис. 2.4. Индуцирование поля внутри конденсатора

Электроны, осевшие на поверхности гелия, оказывают на нее дополнительное давление:  $\Delta p = neE$ , где  $n$  – поверхностная концентрация электронов. Данное давление уравнивается гидростатическими силами за счет появления разности уровней гелия внутри конденсатора и вне его:  $neE = \rho g \delta$ , где  $\delta$  – изменение высоты уровня гелия в конденсаторе. Соотношение на поверхностный заряд:  $q = neS = CU$ , где  $C = \frac{S}{4\pi h}$ , отсюда  $ne = \frac{U}{4\pi h}$ .

Таким образом, получаем две важные формулы. Концентрация электронов у поверхности гелия:

$$n = \frac{1}{2\pi e} \cdot \left( \frac{U}{2h} \right) \quad (2.6)$$

Изменение уровня гелия в зазоре конденсатора:

$$\delta = \frac{1}{2\pi g \rho} \cdot \left( \frac{U}{2h} \right)^2 \quad (2.7)$$

Данные формулы имеют некоторый предел применения. Дело в том, что при увеличении прижимающего электрического поля до некоторого критического предела поверхность гелия перестает быть устойчивой. При увеличении поверхностной плотности электронов возрастает давление со стороны электронов на гелий. При малейших возмущениях поверхности, электроны будут стремиться увеличивать первоначальное возмущение. На плотностях до  $n \approx 2 \cdot 10^9$  эл./см<sup>2</sup> поверхность еще остается устойчивой благодаря силе тяжести и силам поверхностного натяжения. При значениях больших  $n \approx 2 \cdot 10^9$  эл./см<sup>2</sup> (что соответствует электрическому полю  $E \approx 4$  кВ/см) любое минимальное начальное возмущение быстро нарастает и поверхность гелия становится неустойчивой – заряд уходит с поверхности гелия.

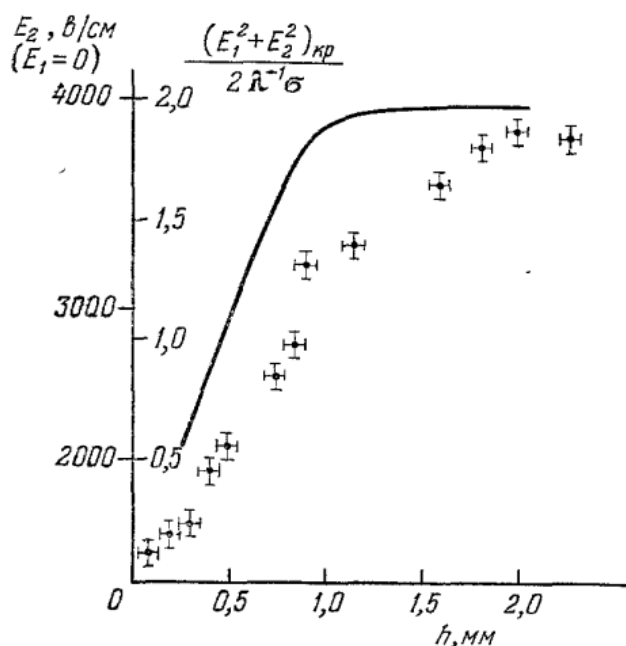


Рис. 2.5. Зависимость электрического поля от уровня гелия в конденсаторе, при которых заряженная электронами поверхность гелия становится неустойчивой [7].

Сплошной линией показана теоретическая зависимость, описанная в статье Черниковой[9]. Точками нанесены результаты эксперимента Хайкина и Володина. Полученные зависимости с удовлетворительной степенью можно считать согласованными.

## 2.4. Термоэлектронная эмиссия

Выход электронов из твердого тела называется электронной эмиссией. Существуют различные способы напыления электронов на поверхность жидкого гелия: термоэлектронная эмиссия, газовый разряд и радиоактивный источник с  $\beta$  - распадом.

В данной работе была использована термоэлектронная эмиссия из вольфрамовой нити. В дальнейших исследованиях можно применять и другие виды эмиссии электронов для проведения экспериментов.

Электроны в металле находятся в хаотическом движении. Энергия такого движения соответствует температуре металла в заданных условиях. На границе между металлом и вакуумом (разряженным га-

зом) возникают силы, направленные внутри от поверхности. Они препятствуют электрону вылететь наружу.

С увеличением же температуры металла увеличивается и количество электронов, которым удается преодолеть эту границу.

Плотность тока электронов при эмиссии в этом случае может быть вычислена по формуле Ричардсона-Дэшмана:

$$j. = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right), \quad (2.8)$$

где  $A = 1,2 \cdot 10^6 \text{ A}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$ ,  $e\phi$  – работа выхода электрона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура металла.

## Глава 3. Экспериментальная часть

Принципиально экспериментальная установка состоит из двух частей: высоковольтный источник и измерительная ячейка для экспериментов с напуском электронов на поверхность жидкого гелия в электрическом поле.

### 3.1. Высоковольтный источник

Как уже было сказано выше – нам нужно создавать высокое напряжение в жидком гелии (более 1 кВ). Подавать такое напряжение непосредственно от внешнего высоковольтного источника не очень удобно и может быть опасно при работе в студенческом практикуме. Для выполнения данной работы был спроектирован и собран многообкладочный конденсатор переменной емкости. Непосредственно его мы и называем высоковольтным источником. Принцип его работы достаточно прост и основан на законе сохранения заряда в замкнутой системе.

В момент начала работы мы устанавливаем конденсатор в положение максимальной емкости, при этом его ротор касается контакта для начального заряда от внешнего источника. Затем мы начинаем вращать ротор (подвижные обкладки конденсатора), – в этот момент происходит размыкание контакта. При дальнейшем вращении емкость конденсатора уменьшается, что при сохранении его заряда приводит к возрастанию разности потенциалов на его обкладках. В нашей конструкции при максимальном перекрытии пластин его емкость в 13 раз больше, чем в раскрытом состоянии. 3-D чертеж конденсатора можно посмотреть в приложении 6.1.

### 3.2. Измерительная ячейка для экспериментов с напуском электронов

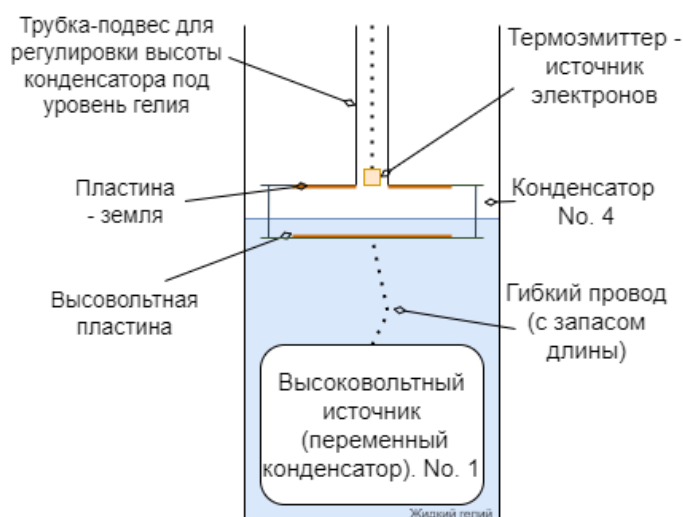
Среди физических задач существует довольно известная теоретическая задача о двумерном ферми-газе. Оказывается, что данную теоретическую модель вполне возможно реализовать на практике –

для этого необходимо «посадить» электроны на поверхность жидкого гелия в присутствии электрического поля.

Разработанная установка является отличной базой для проведения исследований, где нужно создавать высокое электрическое поле. Таким образом, была поставлена еще одна задача - создать дополнительный элемент в установке для наблюдения влияния поверхностных зарядов на прогиб поверхности жидкого гелия.

Для этого была изготовлена измерительная ячейка в виде двухобкладочного конденсатора. Ячейка закреплена на нижнем конце тонкостенной трубки из нержавеющей стали, верхний конец которой выходит наружу через герметичное уплотнение на капке криостата, что позволяет вручную вдвигать и выдвигать ее так, чтобы граница жидкого гелия оказалась посередине между обкладками конденсатора (см схему на Рис. 3.1 и фотографию 6.2 в Приложении).

Верхняя пластина конденсатора гальванически соединена с самой трубкой (т.е. заземлена), нижняя же пластина через изоляторы подвешена к верхней и гальванически соединена гибким проводом с высоковольтным источником, расположенным в нижней части сосуда. Внутри трубки проложены провода к термоэмиттеру – источнику электронов в эксперименте.



**Рис. 3.1.** Схема установки для наблюдения влияния поверхностных зарядов на прогиб поверхности жидкого гелия

### 3.3. Напыление электронов

Для напуска электронов на поверхность жидкого гелия мы используем стандартные миниатюрные лампочки накаливания НЗ5-01501, с предварительно вскрытой стеклянной колбой. Рабочие параметры лампочек в нормальных условиях: 1.5В, 100 мА, 0.15 Вт.

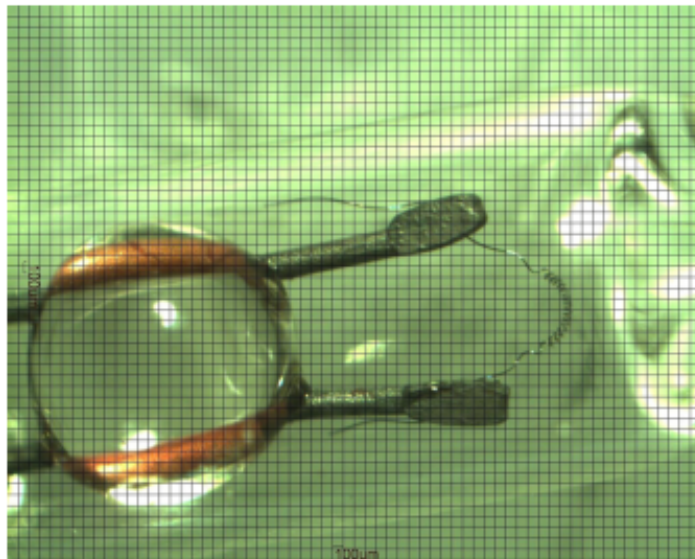


Рис. 3.2. Вскрытая лампа накаливания, период сетки 100 нм

Критические параметры термоэммиттера над поверхностью жидкого гелия (максимальная яркость лампы, при которых она еще не перегорает) при импульсном напылении электронов, реализованные в эксперименте: 3,35 В, 290 мА, 0,97 Вт.

# Глава 4. Результаты

## 4.1. Напряжение источника

В процессе сборки высоковольтного источника возникло несколько сложностей. Главная проблема заключалась в том, чтобы избавиться от всевозможных утечек высокого напряжения на землю. После сборки и калибровки установки, измерения максимальных достигаемых показателей напряжений  $U_{br.}$  (breakdown voltage) на высоковольтном источнике проводились в нескольких средах: воздух, жидкий азот ( $LN_2$ ), нормальный жидкий гелий, сверхтекучий жидкий гелий, нормальный жидкий гелий при изохорном отогреве.

В таблице ниже приведены данные для каждой из сред:

Среда	Воздух	$LN_2$	LHe, норм.	LHe, сверхтек.	LHe, норм. отогрев
$U_{br.}, kV$	1,6	2,4	0,8	0,7	1,9

Чаще всего пробой возникал непосредственно между самими пластинками конденсатора. Пример на фотографии 6.3 в Приложении.

Результаты по максимальному напряжению ожидалось несколько большие, но тем не менее, для решения задач студенческого практикума, такой диапазон создаваемых напряжений вполне достаточен.

## 4.2. Применение высоковольтного источника для изучения электронов на поверхности гелия в студенческом практикуме

Как было рассмотрено в теоретической части, величина прогиба уровня гелия в сосуде зависит от поверхностной плотности электронов, удерживаемых электрическим полем на поверхности гелия. В эксперименте мы можем влиять на этот параметр двумя способами - изменяя подаваемое напряжение и изменяя уровень гелия в зазоре конденсатора.



**Рис. 4.1.** Поверхность гелия между пластинами конденсатора

В нашем случае эксперимент проводился следующим образом: на конденсаторе с помощью высоковольтного источника устанавливалось определенное напряжение, уровень гелия выставлялся на высоте  $h \approx 3$  мм от нижней пластины. Затем на поверхность гелия короткими импульсами напылялись электроны (фото в приложении 6.4). Величина прогиба измерялась при помощи специальной камеры. Визуально была измерена зависимость величины прогиба поверхности гелия от подаваемого напряжения и положения начального уровня гелия. При испарении гелия уровень плавно снижался и такие же наблюдения мы проводили для  $h \approx 2$  мм и  $h \approx 1$  мм при заданном напряжении. Затем эксперимент повторялся при других установленных напряжениях на конденсаторе.

Грубые оценки: Увеличение изображения камеры к реальному размеру: 1:10, изменение реального уровня гелия в конденсаторе на 1 мм соответствует изменению уровня на экране в 10 мм (30 пикселей).

Рис. 4.2. Изменение уровня гелия внутри конденсатора. Видеосъемка.

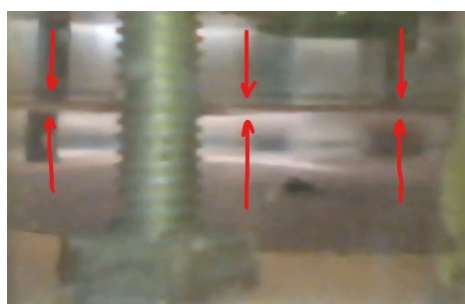
Стрелками показана поверхность гелия



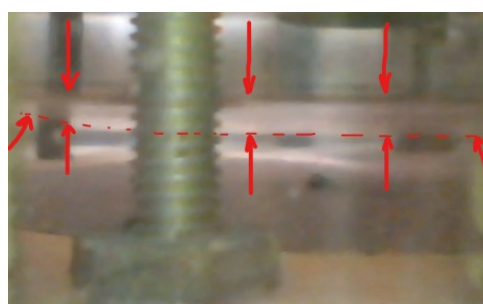
Гладкая поверхность



Прогиб поверхности



Гладкая поверхность



Прогиб поверхности

U, kv	h, см	$\delta$ , см (измерен.)	$\delta$ , см (теор. расчет)
0,7	0,1	неустойч.	неустойч.
0,7	0,2	0,05	0,04
0,7	0,3	нет эффекта	0,02
1	0,1	неустойч.	неустойч.
1	0,2	0,10	0,09
1	0,3	нет эффекта	0,04
1,6	0,1	неустойч.	неустойч.
1,6	0,2	неустойч.	неустойч.
1,6	0,3	0,10	0,10

Таблица 4.1. Измеренный сдвиг уровня гелия для некоторых значений U и h.

*Пояснение к таблице:* неустойчивость – поверхность гелия начинает колебаться, прогиба не наблюдается; нет эффекта - визуально не наблюдается ни прогиб, ни колебание поверхности. Измерение для 0,7 кВ проводилось в сверхтекучем жидком гелии, для 1 кВ и 1,6 кВ в нормальном жидком гелии при изохорном отогреве (в этом случае температура под поверхностью нормального жидкого гелия ниже температуры поверхности и его кипение подавлено).

Оценочно, полученные результаты неплохо согласуются с теоретическим описанием и формулой для вычисления изменения уровня:

$$\delta = \frac{1}{2\pi g\rho} \left( \frac{U}{2h} \right)^2. \quad (4.1)$$

## Глава 5. Заключение

Целью нашей работы являлось создание оригинального источника напряжения, позволяющего генерировать высоковольтный электрический потенциал локально в объеме сверхтекучего гелия в криостате и продемонстрировать его использование в низкотемпературном эксперименте.

В результате первой части работы был собран и протестирован высоковольтный источник, измерены параметры его работы в различных средах.

Во второй части работы главной целью было на качественном уровне убедиться в том, что с помощью собранной конструкции можно наблюдать накопление зарядов на поверхности жидкого гелия по прогибу его поверхности.

Методологические результаты нашего труда будут полезны для работы студентов в низкотемпературном практикуме.

В качестве лабораторных работ с использованием данной методики можно предложить, например, изучение двумерного слоя электронов жидкого гелия в различных условиях. В частности, это могут быть как различные эксперименты по измерению устойчивости слоя в зависимости от плотности электронов и величины прижимающего поля, так и измерение продольной подвижности электронов в слое с обсуждением механизмов рассеяния электронов на молекулах газовой фазы и на капиллярных волнах (рипплонгах).

Кроме этого, методически интересными могут быть работы по измерению подвижности электронов в криожидкостях.

# Глава 6. Приложения

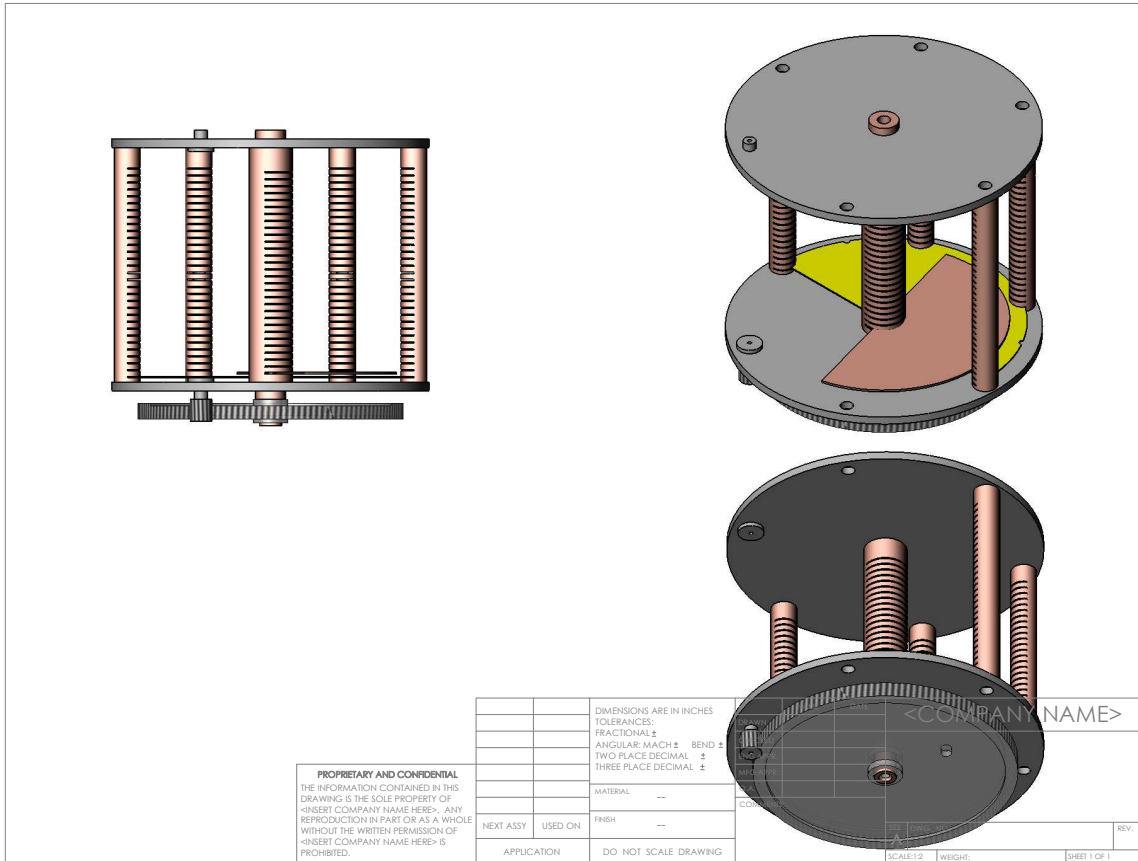


Рис. 6.1. Конструкция переменного конденсатора

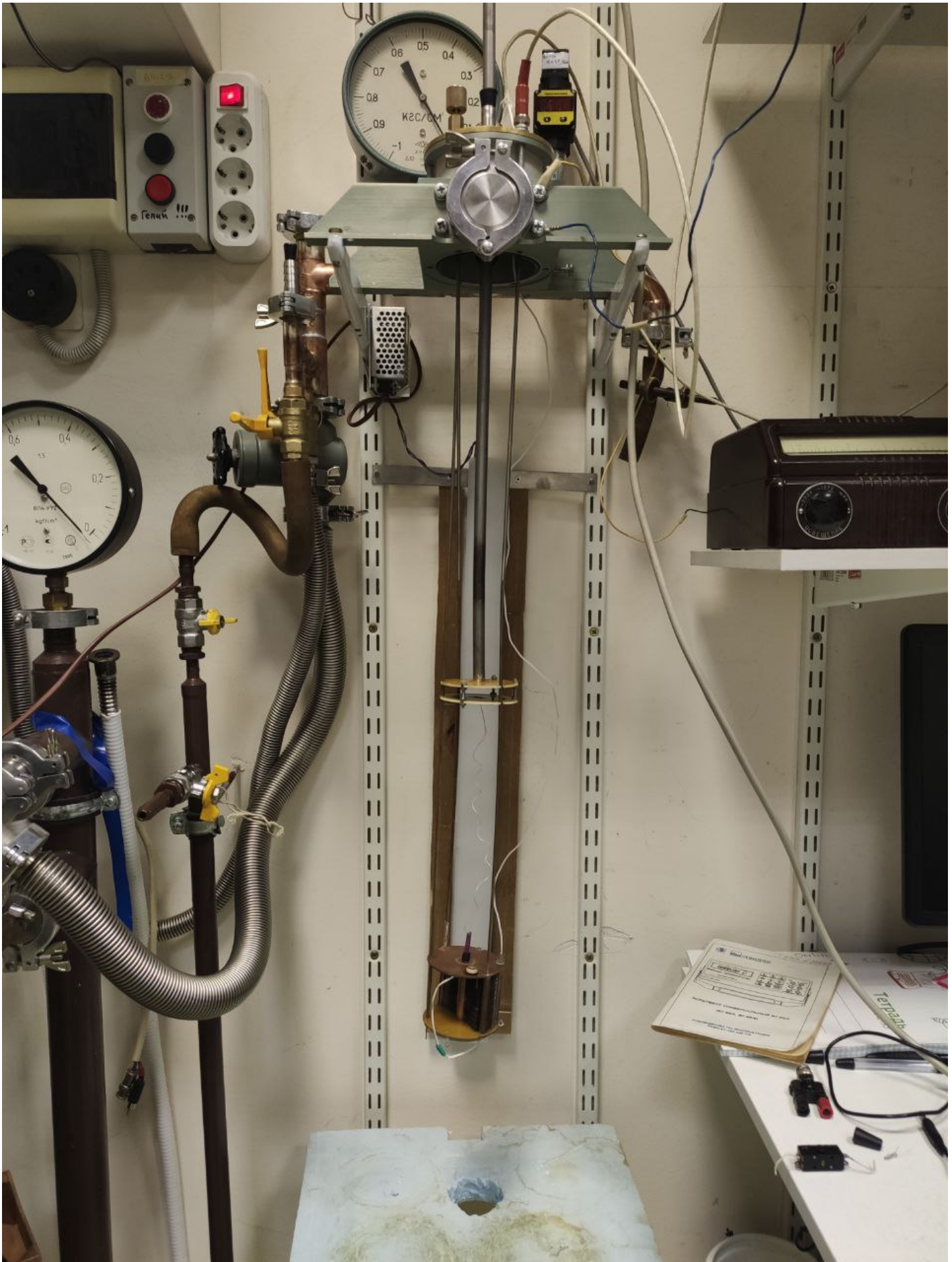


Рис. 6.2. Фото установки в сборке



Рис. 6.3. Возникновение пробоя между пластинами конденсатора



Рис. 6.4. Импульс термоэмиттера - напыление электронов

## Список литературы

1. Gordon E., Karabulin A., Matyushenko V., Sizov V., Khodos I. I. The role of vortices in the process of impurity nanoparticles coalescence in liquid helium // *Chemical Physics Letters*. — 2012. — Т. 519Б..520, № 0. — С. 64—68.
2. Ito T. M., Ramsey J. C., Yao W., Beck D. H., Cianciolo V., Clayton S. M., Crawford C., Currie S. A., Filippone B. W., Griffith W. C. and Makela M., Schmid R., Seidel G. M., Tang Z., Wagner D., Wei W., Williamson S. E. An apparatus for studying electrical breakdown in liquid helium at 0.4 K and testing electrode materials for the neutron electric dipole moment experiment at the Spallation Neutron Source // *Review of Scientific Instruments*. — 2016. — Апр. — Т. 87, № 4. — С. 045113.
3. Clayton S. M., Ito T. M., Ramsey J. C., Wei W., Blatnik M. A., Filippone B. W., Seidel G. M. Cavallo's multiplier for in situ generation of high voltage // *Journal of Instrumentation*. — 2018. — Май. — Т. 13, № 5. — P05017.
4. Phan N. S., Wei W., Beaumont B., Bouman N., Clayton S. M., Currie S. A., Ito T. M., Ramsey J. C., Seidel G. M. A study of DC electrical breakdown in liquid helium through analysis of the empirical breakdown field distributions // *Journal of Applied Physics*. — 2021. — Февр. — Т. 129, № 8. — С. 083301.
5. Gerhold J. Dielectric breakdown of cryogenic gases and liquids // *Cryogenics*. — 1979. — Янв. — Т. 19, № 10. — С. 571—584.
6. Эдельман В. С. Левитирующие электроны // *УФН*. — 1980. — № 4. — С. 227—244.
7. М. С. Хайкин, А. П. Володин. Нарушение устойчивости заряженной поверхности жидкого гелия и образование баблонов // *УФН*. — 1978. — № 4. — С. 691—693.

8. Lambert D. K., Richards P. L. Far-infrared and capacitance measurements of electrons on liquid helium // Physical Review B. — 1981. — Апр. — Т. 23, № 7. — С. 3282—3290.
9. Д. М. Черникова, Л. П. Горьков. О режиме развития неустойчивости заряженной поверхности гелия // Докл. АН СССР. — 1978. — № 4. — С. 829—832.