

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Литвинцева Ксения Алексеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение температурной зависимости напряжения пробоя в газах:
гелий, азот и элегаз при температурах ниже 300 К**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18303

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Вебер Сергей Леонидович

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 2019 г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н., старший преподаватель
Симонов А.А.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к.ф.-м.н., доцент Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 2019 г.

Новосибирск, 2019 г

Аннотация

Целью настоящей работы являлось исследование температурной зависимости напряжения пробоя в среде азота, элегаза и гелия в интервале температур 80-300 К. Для достижения этой цели были освоены навыки работы с температурным столиком Linkam FTIR600 ИК-Фурье микроскопа, записаны данные по температурной зависимости напряжения пробоя. На основании полученных данных построены графики зависимости напряжения пробоя для азота, элегаза и гелия. Определены пороговые напряжения пробоя азота, элегаза и гелия. Также были описаны ожидания о температурной зависимости напряжения пробоя, основываясь на теоретические данные. На основе полученных данных определен характер влияния температуры газа на пороговые значения напряжения его пробоя.

Ключевые слова: пробой газа, температурная зависимость, внешнее электрическое поле.

Оглавление

Введение	4
1 Пробой газообразных диэлектриков	7
2 Основные виды газового разряда	9
3 Описание экспериментальной установки	11
3.1 Измерение температурной зависимости напряжения пробоя в среде азота	12
3.2 Измерение температурной зависимости напряжения пробоя в среде элегаза	13
3.3 Измерение температурной зависимости напряжения пробоя в среде гелия	15
Заключение	17
Список используемой литературы	18

Введение

В диэлектриках имеются заряженные частицы, которые перемещаются и не вызывают его разрушения при приложении слабого электрического поля. В сильном электрическом поле происходит резкое увеличение электропроводности, и как следствие-диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства. Это явление называется пробоем диэлектрика. Строгое определение: пробой- это явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля. Происходит за время 10^{-5} - 10^{-8} с. Минимальное электрическое напряжение, приложенное к диэлектрику, которое приводит к пробую- пробивное напряжение $U_{пр}$. Минимальная напряженность однородного электрического поля, приводящая к пробую -электрическая прочность $E_{пр}=U_{пр}/d$ (d - толщина диэлектрика).

Механизм разрушения диэлектрика под действием электрического поля зависит от вида воздействующего напряжения, времени его приложения, типа диэлектрика, его структуры, температуры и других условий. Наиболее весомое влияние на механизм пробоя оказывает вид диэлектрика. В данной работе будет изучаться пробой газов.

Газы имеют широкое применение в качестве электроизоляционных материалов(диэлектриков). По сравнению с жидкими и твердыми диэлектриками, газы обладают малыми значениями диэлектрической проницаемости, высоким удельным сопротивлением и пониженной электрической прочностью.

Таблица 1. Ориентировочные пороги пробоя газов в однородном поле при давлении 1 атм. [4]

Газ	$E_{пр}$, МВ/м
Воздух	3,2
Азот	3,5
SF ₆ (Элегаз)	8,9
Гелий	1

Атмосферный воздух является естественной изолирующей средой в большинстве электротехнических конструкций. В воздушных линиях электропередач воздух образует единственную изоляцию между неизолированными проводами линии. У изоляторов, работающих на воздухе, он создает необходимую электрическую прочность по поверхности изоляции. Воздушные искровые промежутки защитных разрядников (роговых, вентильных и других) обеспечивают изоляцию между высоковольтными частями защищаемых установок и землей в нормальных условиях работы, а при возникновении перенапряжений уровень электрической прочности воздушных промежутков определяют напряжение срабатывания разрядников.

Азот применяется в качестве изоляции в конденсаторах, высоковольтных кабелях и силовых трансформаторах.

В высоковольтной технике находят применение инертные газы, например, **гелий**, который используется как добавка к высокопрочным сжатым газам для повышения их дугогасящей способности.

Элегаз применяется в газонаполненных кабелях, делителях напряжения, конденсаторах, трансформаторах и высоковольтных выключателях.

Преимуществами кабеля, заполненного элегазом, является малая электрическая емкость, то есть пониженные потери, хорошее охлаждение, сравнительно простая конструкция. Такой кабель представляет собой стальную трубу, заполненную элегазом, в которой при помощи электроизоляционных распорок укреплена проводящая жила.

Заполнение элегазом трансформаторов делает их взрывобезопасными.

Элегаз используется в высоковольтных выключателях, – элегазовых выключателях – так как обладает высокими дутогасящими свойствами.

Целью настоящей работы является измерение температурной зависимости напряжения пробоя в газах гелий, азот и элегаз при температурах ниже 300 К.

Для достижения данной цели в работе были определены следующие **задачи**:

1. Высказать ожидания о температурной зависимости напряжения пробоя, основываясь на теоретические данные.
2. Определить вид газового разряда в экспериментальной установке.
3. Научиться работать с температурным столиком Linkam FTIR600 ИК-Фурье микроскопа.
4. Определить пробойное напряжение для азота, элегаза и гелия.
5. Получить графики температурной зависимости напряжения пробоя.
6. Проанализировать полученные результаты, на основе полученных данных определить характер влияния температуры газа на пороговые значения напряжения его пробоя.

1 Пробой газообразных диэлектриков

Свободная частица (электрон, отрицательный и положительный ион) с зарядом q , разгоняясь под действием электрического поля напряженностью E , на пути свободного пробега λ между двумя столкновениями с молекулами набирает энергию $W=q*E*\lambda$. (1) Если $W \geq W_n$ - энергия ионизации молекулы (энергия, необходимая для расщепления ее на положительный ион и электрон), то происходит процесс ударной ионизации (увеличение числа электронов и ионов в промежутке за счет столкновения электронов с повышенной энергией с нейтральными молекулами) и образования лавины электронов и ионов (экспоненциальный рост количества носителей заряда в промежутке от катода к аноду за счет ударной ионизации молекул электронами), а также резкое возрастание тока. В результате в газообразном диэлектрике возникает проводящий канал - стример. Полное перекрытие газового промежутка стримером приводит к его пробую.

Рассмотрим случай пробоя $W=W_n$.

Заряд электрона e и энергия ионизации W_n не зависят от температуры, исходя из этого можно заключить, что $E*\lambda=const$.

Причем:

$$\lambda = \frac{1}{n*\pi*d^2*\sqrt{2}}, \quad (2)$$

$$E=U/d_d, \quad (3)$$

где d - эффективный диаметр молекулы, d_d - толщина диэлектрика.

Обратим внимание на ожидаемую температурную зависимость напряжения пробоя: вероятность столкновения электрона с молекулой газа пропорциональна концентрации последнего. В свою очередь:

$$n=P/(k*T), \quad (4)$$

где k - постоянная Больцмана равная $1,38*10^{-23}$ Дж/К, P - давление 1 атм., T - температура.

Значит:

$$E \cdot \lambda = \frac{k \cdot T}{P \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{U}{d_d} = \text{const},$$

следовательно

$$T \cdot U = \text{const. (5)}$$

Исходя из этого можно сделать предположение, что при понижении температуры, напряжение пробоя увеличивается.

Это можно обосновать тем, что при уменьшении температуры, концентрация молекул газа увеличивается, следовательно, вероятность столкновения электрона с молекулами газа также растет. А значит для того, чтобы электрон набрал минимальную требуемую для ионизации энергию, необходимо увеличить напряженность электрического поля.

Давайте сравним длину свободного пробега λ_e с длиной свободного пробега молекул азота λ_{N_2} при температуре 295 К:

$$\lambda_{N_2} = \frac{k \cdot T}{\pi \cdot d(N_2)^2 \cdot P \cdot \sqrt{2}} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 295}{\pi \cdot 0,37^2 \cdot 10^{-18} \cdot 10^4 \cdot \sqrt{2}} = 6,6 \cdot 10^{-8} \text{ м, где}$$

$$P = 101\,325 \text{ Па,}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К,}$$

$$d_{N_2} = 0,37 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Найдем λ_e исходя из данных таблицы 1 и формулы (1) :

$$\lambda_e = \frac{W_{и(N_2)}}{E \cdot e} = \frac{14,53}{3,5 \cdot 10^6} = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ м, где}$$

$$W_{и(N_2)} = 1401,5 (14,53) \text{ кДж/моль (эВ),}$$

$$e = -1,6021766208(98) \cdot 10^{-19} \text{ Кл } (-4,80320427(13) \cdot 10^{-10} \text{ ед. заряда СГСЭ}).$$

Откуда,

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_{N_2}} \approx 10^2.$$

Значит длина свободного пробега электрона, вызвавшего в последствии ионизацию молекулы газа, приблизительно на 2 порядка больше средней длины свободного пробега молекул самого газа.

2 Основные виды газового разряда

При недостаточной величине приложенного напряжения для поддержания проводящего канала возникшего газового разряда необходимо наличие внешнего ионизатора (светового, теплового или другого источника энергии). Такой разряд называется несамостоятельным. При увеличении напряжения проводящий канал может поддерживаться только за счет электрического поля без внешнего ионизатора. Этот разряд называют самостоятельным. Характер разряда в газе зависит от давления, мощности источника напряжения и формы электрического поля.

Различают следующие основные виды газового разряда:

- *тлеющий* - возникает при низких давлениях (несколько десятков - миллиметров ртутного столба), когда ток в газовом промежутке не может существенно расти из-за недостаточного числа молекул в единице объёма. Разряд носит многолавиный характер и занимает всё пространство между электродами. Примером такого разряда являются газосветные трубки, лампы дневного света и др.

- *искровой* - возникает при кратковременном повышении напряжения в газовом промежутке до пробивного (грозовой разряд). При этом ток в промежутке в начале резко нарастает, а затем быстро падает. Разряд проходит в форме одиночной искры. Такой же разряд может возникнуть при малой мощности источника питания (т.е. источника с большим внутренним сопротивлением). Разрядный ток создает на этом сопротивлении большое падение напряжения, что приводит к резкому снижению напряжения источника питания. Это пониженное напряжение не способно поддерживать ионизированный канал газового разряда, и он прерывается. После прекращения разрядного тока напряжение на зажимах источника питания снова повышается ввиду отсутствия падения напряжения на его внутреннем сопротивлении. Вследствие повышения напряжения в газовом промежутке вновь возникает разряд и разрядный ток, создающий падение напряжения на

сопротивлении источника, и разрядный канал по указанной ранее причине опять прерывается. Т.е. разряды в этих условиях происходит в форме искр, следующих одна за другой.

- *дуговой* - возникает при большой мощности источника питания (т.е. источнике с малым внутренним сопротивлением) и является последующей стадией искрового разряда. Такой переход происходит ввиду значительного повышения температуры в условиях большого тока в газе. В результате термоионизации большей части молекул, газ в промежутке приобретает особое состояние, именуемое плазмой, проводимость которой близка к проводимости металлов. Дуговой разряд возникает в силовых электроустановках при различного рода коммутациях (включение или отключение установки, изменение схемы силовой цепи и т.п.).

- *коронный* - возникает в резконеоднородном поле. Ионизация развивается в небольшой области газа вблизи электрода с малым радиусом кривизны (в месте наибольшей напряженности электрического поля). Образование коронного разряда не сопровождается полной потерей газовым промежутком изолирующих свойств, так как напряжённость электрического поля и интенсивность ионизации существенно снижаются. При повышении приложенного к газовому промежутку напряжения коронный разряд переходит в искровой, а при большой мощности источника - в дуговой. Коронный разряд может сопровождаться интенсивным свечением газа.

В данной работе исследовался искровой разряд.

3 Описание экспериментальной установки

Исследование температурной зависимости напряжения пробоя в среде азота, элегаза и гелия производилось с помощью осциллографа Tektronix DPO4032 и терморегулируемого предметного столика Linkam FTIR600, позволяющего изменять температуру исследуемого образца в пределах от 77К до 600 К. Контроль температуры осуществляется с помощью термоконтроллера T95 System Controller (компания Linkam Scientific Instruments, Великобритания). Воздействие на газы внешним электрическим полем, осуществлялось за счет электродов – плоских пластины, на которые подавалось напряжение от высоковольтного источника. В качестве источника высокого напряжения использовался высоковольтный блок питания Sh0105 (фирма Науэл, Россия), обеспечивающий разность потенциалов на его выводах до 30 кВ. Расстояние между пластинами составляло 0.7 ± 0.1 мм.

Воздух в пространстве внутри температурного столика замещался элегазом (SF_6), азотом (N_2) и гелием (He).

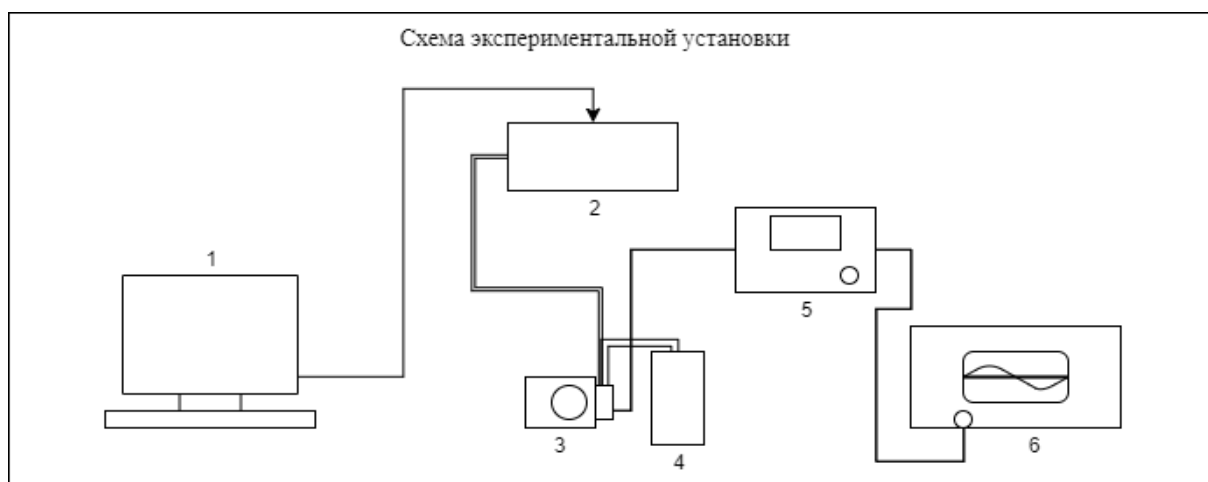


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1-ПК, 2- термоконтроллер T95 System Controller, 3- предметный столик Linkam FTIR600, 4-сосуд с исследуемым газом, 5- высоковольтный блок питания Sh0105, 6-осциллограф Tektronix DPO4032.

3.1 Измерение температурной зависимости напряжения пробоя в среде азота

Меняя температуру в пределах 80-295 К с шагом 5 К, с осциллографа, запущенного в режиме одиночного запуска, измерялось напряжение пробоя азота. Выбранный диапазон температур обуславливается температурой кипения азота ($T_k=77,4$ К). Для каждой температуры снималось по 3 измерения напряжения пробоя.

После обработки экспериментальных данных был получен следующий график.

Максимальное напряжение пробоя, которое удалось получить, в рамках данной экспериментальной установки для азота – 6,56 кВ при температуре 80К.

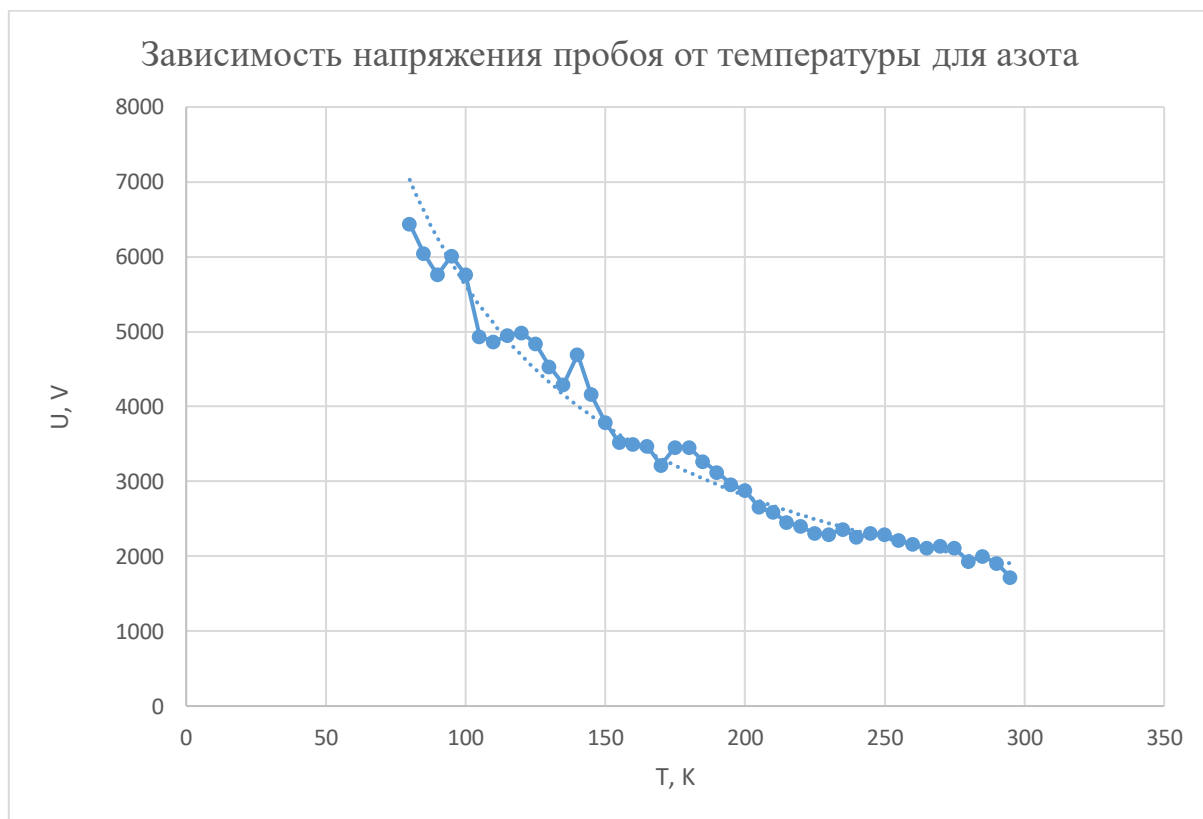


Рис. 2. График температурной зависимости напряжения пробоя для азота.

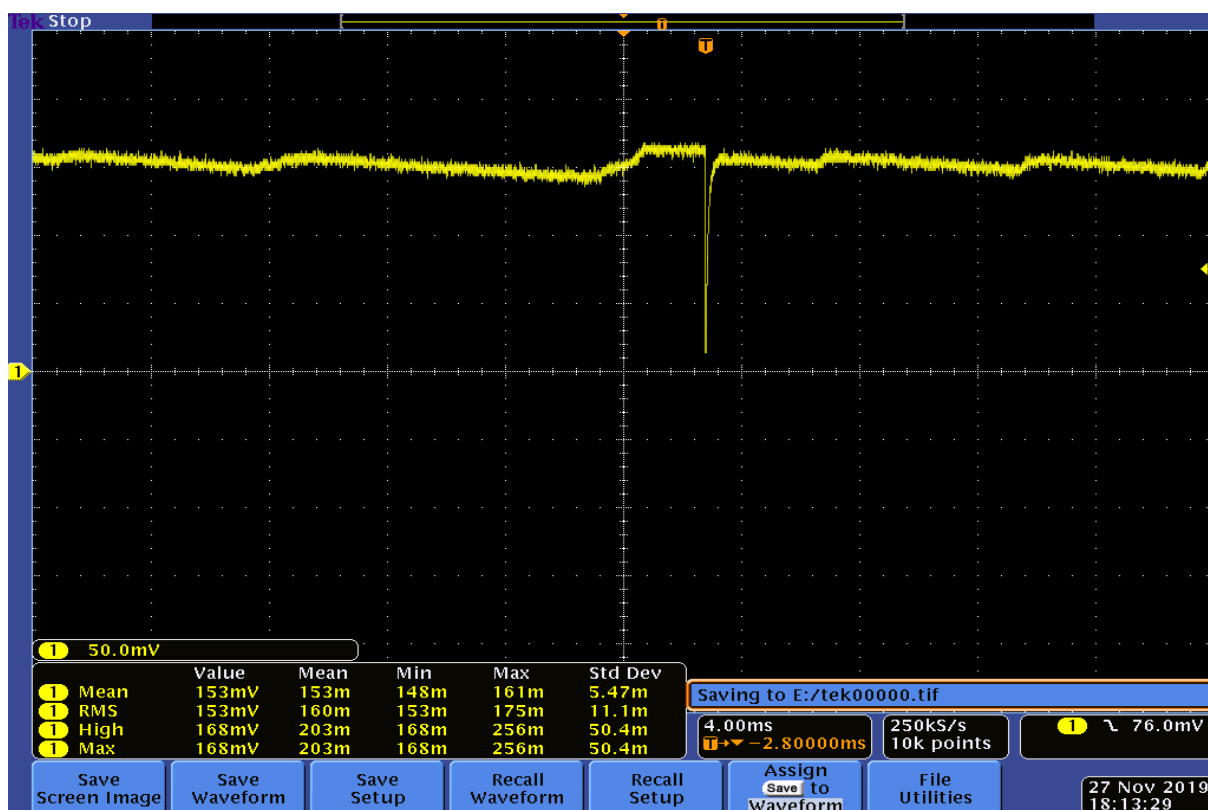


Рис. 3. Изображение, получаемое с осциллографа, при пробое в среде азота.

3.2 Измерение температурной зависимости напряжения пробоя в среде элегаза

Меняя температуру в пределах 210-295 К с шагом 5 К, с осциллографа, запущенного в режиме одиночного запуска, измерялось напряжение пробоя элегаза. Выбранный диапазон температур обуславливается температурой кипения элегаза ($T_k=209,9$ К). Для каждой температуры снималось по 3 измерения напряжения пробоя.

Всего было проделано 2 захода.

После обработки экспериментальных данных был получен следующий график.

Максимальное напряжение пробоя, которое удалось получить, в рамках данной экспериментальной установки для элегаза – 8,08 кВ при температуре 250К.

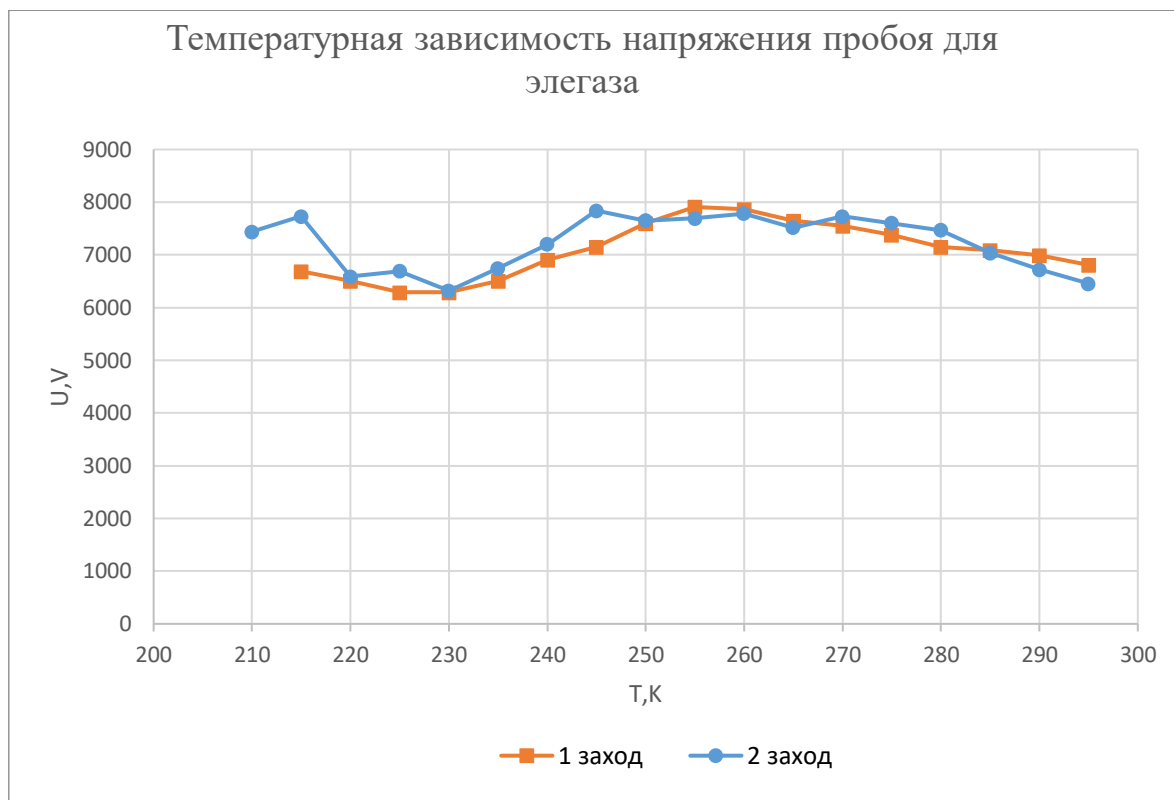


Рис. 4. Графики температурной зависимости напряжения пробоя для элегаза.

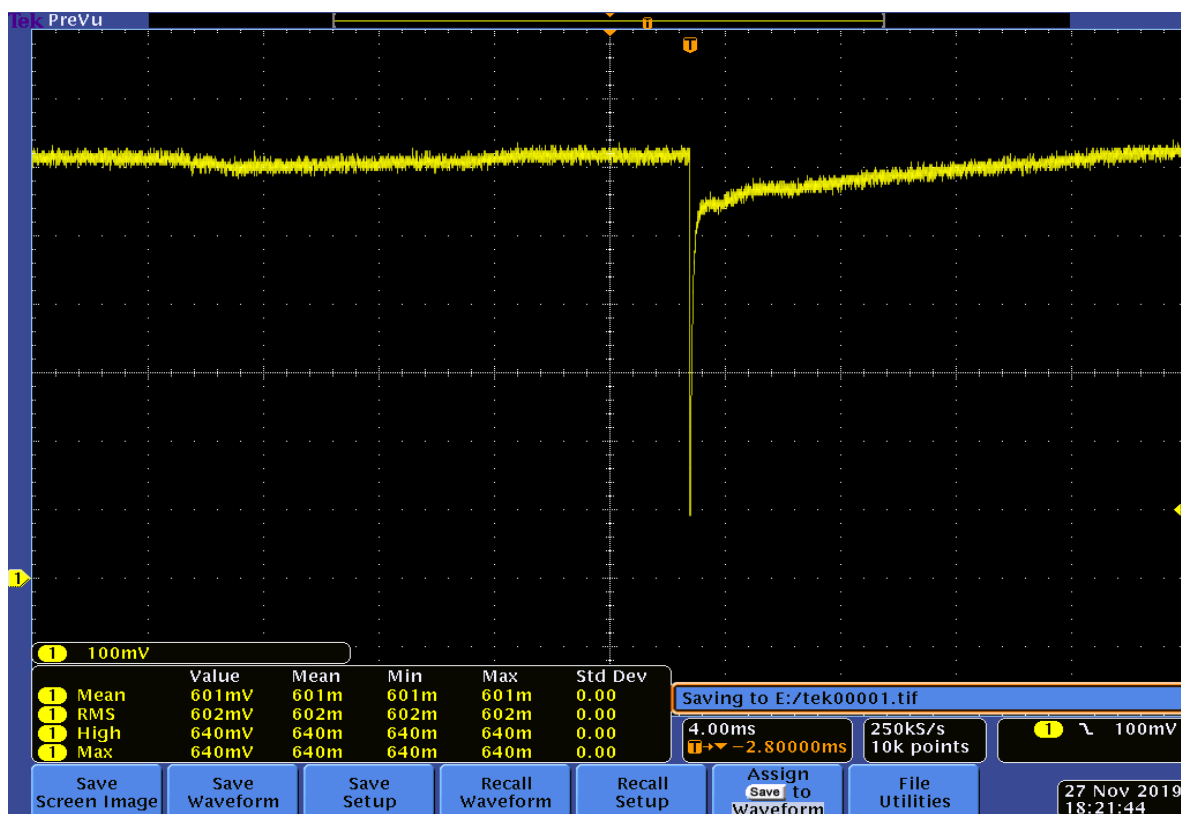


Рис. 5. Изображение, получаемое с осциллографа, при пробое в среде элегаза.

3.3 Измерение температурной зависимости напряжения пробоя в среде гелия

Меняя температуру в пределах 210-295 К с шагом 5 К, с осциллографа, запущенного в режиме одиночного запуска, измерялось напряжение пробоя гелия. Температура кипения гелия- 4 К, поэтому к ней в рамках данной работы приблизиться не удалось. Выбранный температурный диапазон обуславливается тем, что при температурах ниже 210 К, установка замерзает и температура гелия перестает изменяться.

Для каждой температуры снималось по 3 измерения напряжения пробоя.

После обработки экспериментальных данных был получен следующий график.

Максимальное напряжение пробоя, которое удалось получить, в рамках данной экспериментальной установки для азота – 864В при температуре 260К.



Рис. 6. График температурной зависимости напряжения пробоя для гелия

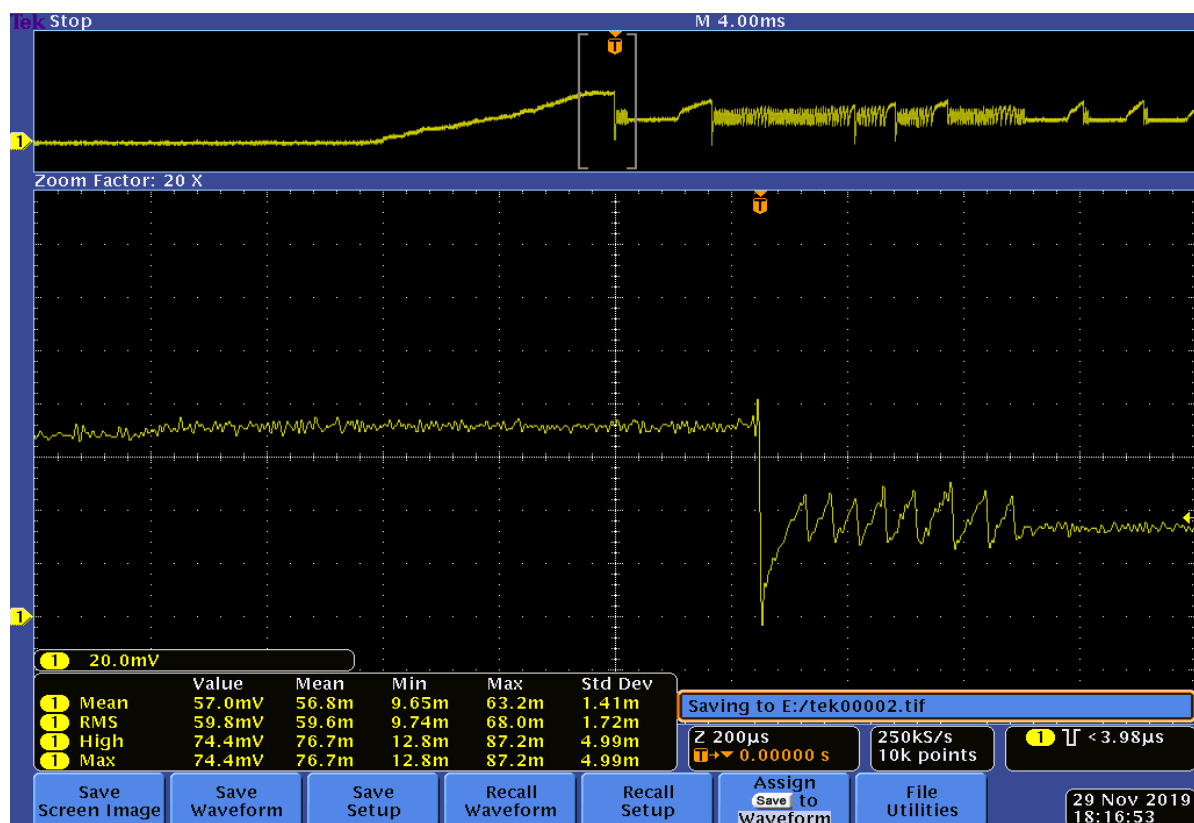


Рис. 7. Изображение, получаемое с осциллографа, при пробое в среде гелия

Заключение

Целью данной работы являлось исследование температурной зависимости напряжения пробоя в среде азота, элегаза и гелия в интервале температур 80-300 К.

В ходе выполнения данной курсовой работы была собрана экспериментальная установка на которой проводились измерения. В рамках данной задачи были проведены теоретические расчеты температурной зависимости напряжения пробоя для исследуемых газов, а также длины свободного пробега для азота. Определенно, что напряжение пробоя U уменьшается с ростом температуры газа T . Экспериментальным методом были получены графики температурной зависимости и проведен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных.

Данные по напряжению пробоя для гелия и элегаза согласуются с табличными данными, но не согласуются с теоретической моделью. Причина такого поведения в настоящий момент остается неясной.

Полученные данные по напряжению пробоя азота хорошо согласуются с теоретической моделью, а также табличными данными. Поэтому можно заключить, что напряжение пробоя в среде азота обратно пропорционально температуре, как это было предсказано в теоретической части данной курсовой работы.

Список используемой литературы

1. Касаткин Г.С. Пробой газов: Методические указания к лабораторным работам. - М.: МИИТ, 2009.- 27с.
2. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 42, February 2003, pp. S989~S993
3. Воробьев Г.А. Физика диэлектриков (область сильных полей). – Томск: Изд-во ТГУ, 1977. – 251 с.
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит-ры, 1987. – 590 с.