

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Бородулина Александра Владимировна

КУРСОВАЯ РАБОТА

Напряжение пробоя в газах аргон, азот и гексафторид серы как функция
температуры

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18302

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. МТЦ СО РАН

Вебер С.Л.

«___»_____2019 г.

Оценка научного руководителя

Преподаватель практикума

к.т.н. Астрелин В.Т.

«___»_____2017 г.

Куратор практикума

к.т.н. Астрелин В.Т.

Оценка за курсовую работу

Новосибирск 2019

Аннотация

Работа посвящена исследованию температурной зависимости напряжения пробоя в различных газах. Было сделано теоретическое предположение о характере зависимости. Для трёх газов: азота, аргона и элегаза проведены измерения температурной зависимости напряжения пробоя. Было установлено, что напряжение пробоя растёт с уменьшением температуры, что совпало с теоретическим предположением.

Для азота при понижении температуры с 300 К до 80 К среднее по нескольким измерениям напряжение пробоя возросло с 2.81 кВ до 5.65 кВ. Для Аргона при понижении температуры с 300 К до 90 К значение возросло с 1.4 кВ до 2.2. Для элегаза температура была уменьшена с 300 К до 195 К, среднее значение пробивного напряжения при этом возросло с 5. кВ до 7.94 кВ, но в диапазоне 230-250 К Рост пробивного напряжения с уменьшением температуры не наблюдался. Измерения проводились при атмосферном давлении. Электроды, в промежутке между которыми фиксировался пробой, удалены друг от друга на расстояние около 0.7 мм.

Ключевые слова: пробой в газовой среде, температурная зависимость напряжения пробоя.

Оглавление

Введение.....	4
1. Явления пробоя в газовых средах	5
1.1. Теория возникновения пробоя	5
1.2 Явления пробоя в элегазе.....	7
1.3 Влияние различных условий на возникновения пробоя. Температурная зависимость напряжения пробоя.	8
2. Экспериментальная часть.....	9
2.1 Описание установки	9
2.2 Метод проведения измерений	10
2.3 Результаты	11
Список используемой литературы	13
Приложение №1.....	14

Введение

В лаборатории ЭПР спектроскопии МТЦ СО РАН ведутся исследования по изучению спинового кроссовера – эффекта изменения спинового состояния иона металла в соединении под действием внешних факторов (температура, свет). Это явление влечёт за собой изменения магнитных, оптических и механических свойств образца. В рамках данных исследований также изучается влияние на спиновое состояние образца внешнего электрического поля при различных температурах. Возникновение пробоя во время эксперимента недопустимо, т.к. пробой происходит в области расположения образца и влечёт разрушение последнего. Поэтому при работе с высокими напряжениями важно иметь данные о напряжениях пробоя при различных температурах, чтобы не допускать напряжение, превосходящее эти значения. Цель данной работы – получить значения напряжения пробоя для трёх газов: азота, аргона и элегаза при температуре от температуры кипения данного газа до 300 К и сделать выводы о диапазоне напряжений, с которыми следует работать на данной установке.

1. Явления пробоя в газовых средах

1.1 Теория возникновения пробоя

При приложении возрастающего напряжения к газообразному диэлектрику и измерении протекающего через него тока можно получить следующую вольт-амперную характеристику. Область d на ней соответствует пробую межэлектродного промежутка, который характеризуется сильным возрастанием плотности тока. Это обусловлено развитием ионизационных процессов в газе.

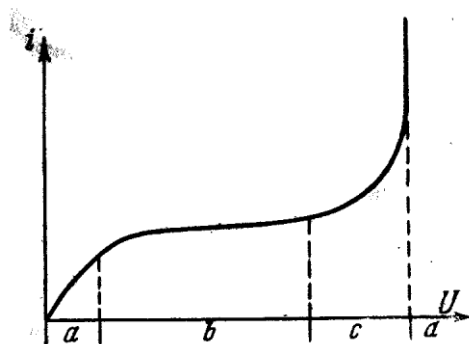


Рис. 1.1. Зависимость плотности тока от напряжённости электрического поля.

Рассмотрим газ, находящийся под действием ионизирующего излучения. В соответствии с теорией газового разряда, предложенной Таунсендом электроны после выхода из катода ускоряются электрическим полем и, достигнув необходимой энергии, производят ионизацию атомов и молекул газа. Положительные ионы в данном случае не способны производить ударную ионизацию из-за их малой подвижности. Но они способны выбивать из катода электроны, которые, в свою очередь, ускоряются в электрическом поле и производят ударную ионизацию. Таунсендом были введены следующие коэффициенты: α – первый коэффициент Таунсенда, показывающий количество ионизаций, проводимых электроном на пути в 1 см., γ – второй коэффициент Таунсенда, показывающий количество электронов, выбиваемых одним ионом из катода.

Если рассмотреть опыт, проведённый А. Г. Столетовым и предположить, что под действием ионизирующего излучения в течение секунды с 1 см^2

поверхности катода срывается n_0 электронов, то при достаточно большой напряжённости поля, в соответствии с теорией Таунсенда, число электронов по мере продвижения к аноду будет возрастать.

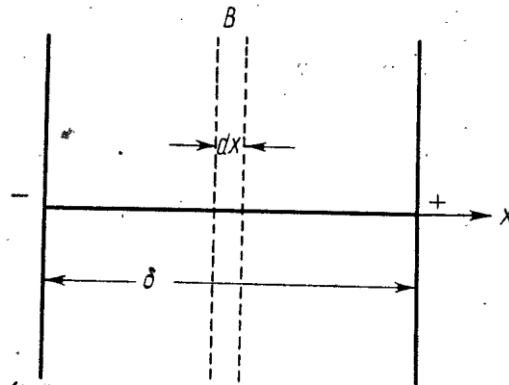


рис. 1.2 Схема опыта Столетова.

При рассмотрении слоя газа толщиной dx , находящегося на расстоянии x от катода можно заметить, что в этом слое n электронов создадут $n = \alpha \cdot n \cdot dx$ электронов вследствие ударной ионизации. Отсюда интегрированием и подстановкой начальных условий получается:

$$n = n_0 e^{\alpha x}. \quad (1.1)$$

Число свободных электронов, порождённых во всём промежутке одним вырванным с катода электроном называется электронной лавиной. За счёт явления диффузии лавина имеет расширение на фронте.

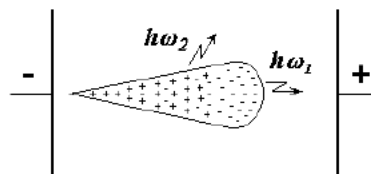


Рис. 1.3 Схема электронной лавины.

Однако, при отсутствии внешней ионизации разряд так же возможен. В таком случае разряд называется самостоятельным. Для этого необходим механизм восполнения электронов вблизи катода, который в соответствии с теорией Таунсенда обеспечен вырыванием электронов из катода путём бомбардировки положительными ионами, находящимися в рабочем газе. Тогда с 1 см^2 площади катода выбивается $n = n_0 + \Delta n$ электронов, где Δn — дополнительное число электронов, выбиваемое положительными ионами,

находится с учётом коэффициента γ . Отсюда можно получить условие самостоятельности разряда:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1. \quad (1.2)$$

Из условий на первый и второй коэффициенты Таунсенда можно получить выражение для пробивного напряжения при постоянной температуре:

$$U_{\text{пр}} = \frac{BPd}{\ln \frac{APd}{\ln(1+1/\gamma)}} \quad (1.3)$$

A и B – постоянные для конкретного газа. Таким образом при постоянном Pd , где P – давление, d – расстояние между электродами, напряжение пробоя должно оставаться неизменным, что так же обусловлено законом Пашена. Но в действительности отступления от закона Пашена по разным причинам наблюдаются часто.

Теория Таунсенда проста, но не совершенна тем, что она не описывает процесс самого пробоя и не даёт описания перехода самостоятельного разряда в несамостоятельный, поэтому при больших значениях давления и больших расстояниях между электродами необходимо учитывать влияние объёмного заряда на однородность поля и другие факторы. Но при малых расстояниях между электродами и при низких давлениях теория Таунсенда согласуется с экспериментальными данными.

1.2 Явления пробоя в элегазе

Элегаз (SF_6) – это тяжёлый газ, примерно в пять раз тяжелее воздуха, широко применяемый в качестве изолятора из-за высокой электрической прочности.

Различные газы имеют различные пробивные напряжения при одинаковых условиях. Экспериментально установлено, что, в большинстве случаев напряжение пробоя растёт с ростом молекулярного веса и критической температуры, но это выполняется далеко не всегда. Элегаз обладает высокой эффективностью захвата электронов, вследствие чего образуются малоподвижные ионы. Так как в элегазе ионы обладают меньшей

подвижностью, чем в воздухе, образование электронных лавин там более затруднительно. Так же элегаз имеет относительно большую длину свободного пробега. Эти свойства обеспечивают высокие значения напряжения пробоя в элегазе относительно значения для других газов при одинаковых условиях.

1.3 Влияние различных условий на возникновения пробоя.

Температурная зависимость напряжения пробоя.

Из предыдущих пунктов ясно, что напряжения пробоя зависит как от свойств самого газа, так и от внешних параметров. В ходе различных исследований были установлены зависимости напряжения пробоя от многих параметров помимо давления таких как неоднородность электрического поля, наличие примесей в газе и т.д.

Для вывода формулы (1.3) необходимы следующие рассуждения. Для ионизации электрону необходима энергия ΔW_u , которую он набирает на пути x_u . При этом он имеет заряд q и находится в поле E . Тогда можно получить выражение для x_u .

$$x_u = \frac{\Delta W_u}{qE} \quad (1.4)$$

Вероятность такого пробега согласно распределению равна $p = e^{-\frac{x_u}{\lambda}}$, где λ – средняя длина свободного пробега. В среднем на пути в один см этот электрон совершает $Z = \frac{1}{\lambda}$ столкновений. Тогда коэффициент Таунсенда имеет следующий вид:

$$\alpha = Z \cdot p = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\frac{x_u}{\lambda}} = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\frac{\Delta W_u}{qE\lambda}} \quad (1.5)$$

Далее при выводе (1.3) было сделано допущение, что температура постоянна. При подстановке этой формулы в условие (1.2) электрическое поле можно выразить следующим образом:

$$E = \frac{\Delta W_u}{q\lambda \ln \frac{d}{\lambda(\ln(\frac{1}{\gamma}+1))}} \quad (1.6)$$

Тогда напряжение примет вид:

$$U = \frac{\Delta W_u \cdot d}{q \lambda \ln \frac{d}{\lambda (\ln(\frac{1}{\gamma} + 1))}} \quad (1.7)$$

Если учесть, что $d \gg \lambda$, можно заметить, что при возрастании температуры напряжение пробоя должно уменьшаться, так как с ростом температуры растёт длина свободного пробега.

2. Экспериментальная часть

2.1 Описание установки

Для наблюдения за газом под воздействием внешнего электрического поля был использован ИК-микроскоп HYPERION 2000, оснащённый терморегулируемым предметным столиком Linkam FTIR600, позволяющим изменять температуру исследуемого образца. В данном случае изменяется температура газа внутри столика. Контроль температуры осуществляется с помощью термоконтроллера T95 System Controller (компания Linkam Scientific Instruments, Великобритания). Electrodes, на которых создаётся напряжение представляют собой плоские пластины, установленные на стекле температурного предметного столика. На электроды подаётся высокое напряжение от высоковольтного блока питания Sh0105 (фирма Науэл, Россия). Расстояние между электродами 0.7 ± 0.1 мм.

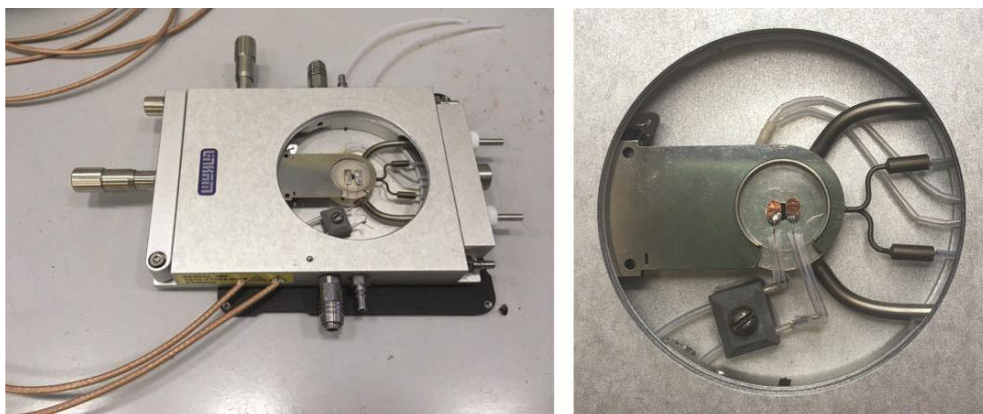


Рис. 2.1 Температурный столик Linkam FTIR600, модифицированный сотрудниками лаборатории.

2.2 Метод проведения измерений

Для фиксирования пробоя использовались делитель напряжения и осциллограф. Осциллограф, находящийся в режиме однократного запуска, при постепенном увеличении напряжения фиксирует пробой, и на его экране можно наблюдать значение напряжения в момент пробоя. Так же с помощью осциллограмм можно наблюдать разницу напряжения пробоя в разных газах при одинаковых условиях. Кроме того, пробой мог быть зафиксирован визуально, с помощью микроскопа или по звуку, но эти способы менее точны и удобны.

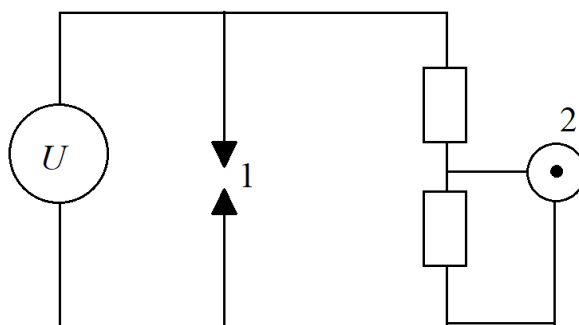


Рис. 2.2 Схема измерительной установки. U – источник высокого напряжения, 1 – разрядный промежуток, 2 – вход осциллографа. Двумя четырёхугольниками схематично изображён резистивно-ёмкостный высоковольтный делитель.

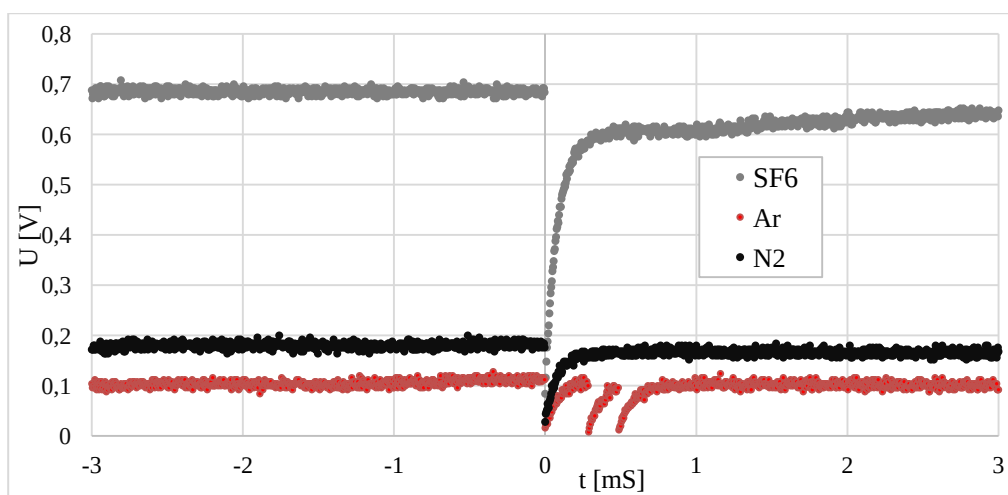


Рис. 2.3 Пример осциллограммы исследуемых газов при комнатной температуре.

2.3 Результаты

В результате были получены температурные зависимости напряжения пробоя для трёх газов: азота, элегаза и аргона в диапазонах температур от температур кипения до комнатной (300 К) с шагом 5 К. Для каждого значения температуры получено не менее четырёх значений напряжения, при котором произошёл пробой. Так как в формуле (1.7) присутствовала логарифмическая зависимость, были построены дополнительные графики в логарифмическом масштабе (см. приложение №1). Результаты для согласуются с предположением об уменьшении значения напряжения пробоя с увеличением температуры, но не строго. Имеющие на данный момент наибольшую практическую значимость наименьшие полученные значения занесены в таблицу (см. приложение №1). При понижении температуры с 300 К до 80 К среднее значение напряжения пробоя для азота возросло с 2.81 кВ до 5.65 кВ, для аргона при понижении температуры с 300 К до 90 К с 1.4 кВ до 2.2 кВ. Для аргона рост напряжения при уменьшении температуры прослеживается гораздо хуже, чем для азота. Это может быть связано как с допущенной в производстве эксперимента ошибкой, так и со свойствами аргона. Для элегаза в диапазоне около 230-250 К наблюдался рост значений при уменьшении температуры, что так же может быть следствием допущенной в проведении эксперимента или объясняться

свойствами элегаза. При понижении температуры с 300 К до 255 К среднее значение напряжения пробоя выросло с 5.9 кВ до 7.24 кВ, при понижении температуры с 230 К до 195 К среднее значение напряжения пробоя выросло с 5.6 кВ до 7.94 кВ. Графики для минимального, максимального и среднего значения находятся в приложении №1.

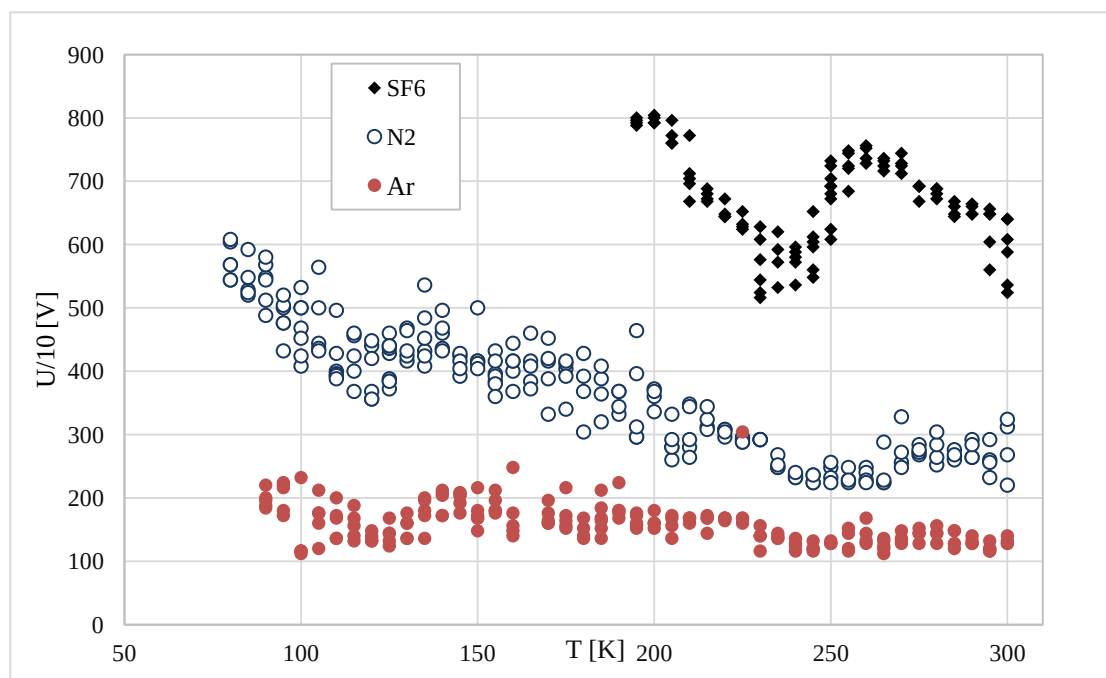


Рис. 2.4 Зависимость напряжения пробоя в исследуемых газах от температуры.

Список используемой литературы

1. Г.И. Сканава «Физика диэлектриков (область сильных полей)»,
государственное издательство физико-математической литературы,
Москва 1958 г.

Приложение №1

Таблица №1. Наименьшие полученные при измерениях значения напряжения пробоя для азота.

T, K	U, кВ	T, K	U, кВ	T, K	U, кВ
300	2.2	225	2.88	150	4.04
295	2.32	220	2.96	145	3.92
290	2.64	215	3.08	140	4.32
285	2.6	210	2.64	135	4.08
280	2.52	205	2.6	130	4.16
275	2.68	200	3.36	125	3.72
270	2.48	195	2.96	120	3.56
265	2.24	190	3.32	115	3.68
260	2.24	185	3.2	110	3.88
255	2.24	180	3.04	105	4.32
250	2.24	175	3.4	100	4.08
245	2.24	170	3.32	95	4.32
240	2.32	165	3.72	90	4.88
235	2.48	160	3.68	85	5.2
230	2.92	155	3.6	80	5.44

Таблица №2. Наименьшие полученные при измерениях значения напряжения пробоя для аргона.

T, K	U, кВ	T, K	U, кВ	T, K	U, кВ
300	1.28	230	1.16	155	1.76
295	1.16	225	1.6	150	1.48
290	1.28	220	1.64	145	1.76
285	1.2	215	1.44	140	1.72
280	1.28	210	1.6	135	1.36
275	1.28	205	1.36	130	1.36
270	1.28	200	1.52	125	1.24
265	1.12	195	1.52	120	1.32
260	1.28	190	1.68	115	1.32
255	1.16	185	1.36	110	1.36
250	1.28	180	1.36	105	1.2
245	1.16	175	1.52	100	1.12
240	1.16	170	1.6	95	1.72
235	1.36	160	1.4	90	1.84

Таблица №3. Наименьшие полученные при измерениях значения напряжения пробоя для элегаза.

Т, К	U, кВ	Т, К	U, кВ	Т, К	U, кВ
300	5.24	265	7.16	230	5.16
295	5.6	260	7.28	225	6.24
290	6.48	255	6.84	220	6.44
285	6.44	250	6.08	215	6.68
280	6.72	245	5.48	210	6.68
275	6.68	240	5.36	205	7.6
270	7.12	235	5.32	200	7.92

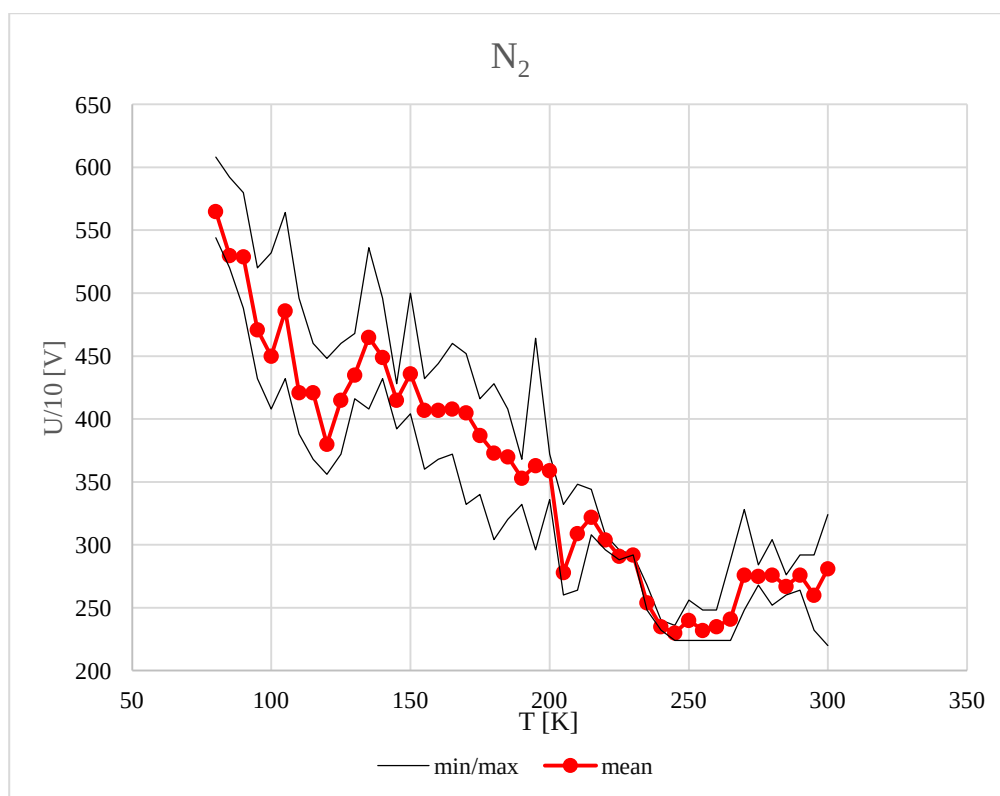


Рис. 3.1 Зависимость напряжения пробоя в азоте от температуры. Средние значения и границы разброса.

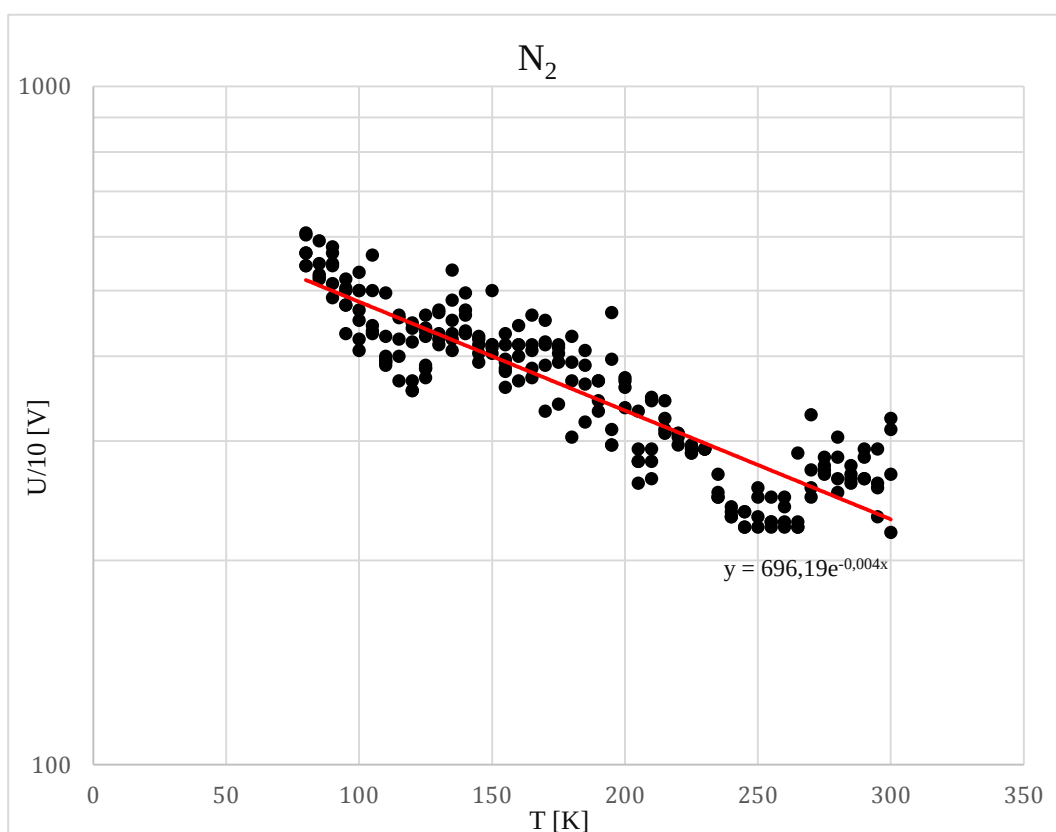


Рис. 3.2 Зависимость напряжения пробоя в азоте от температуры. Логарифмический масштаб.

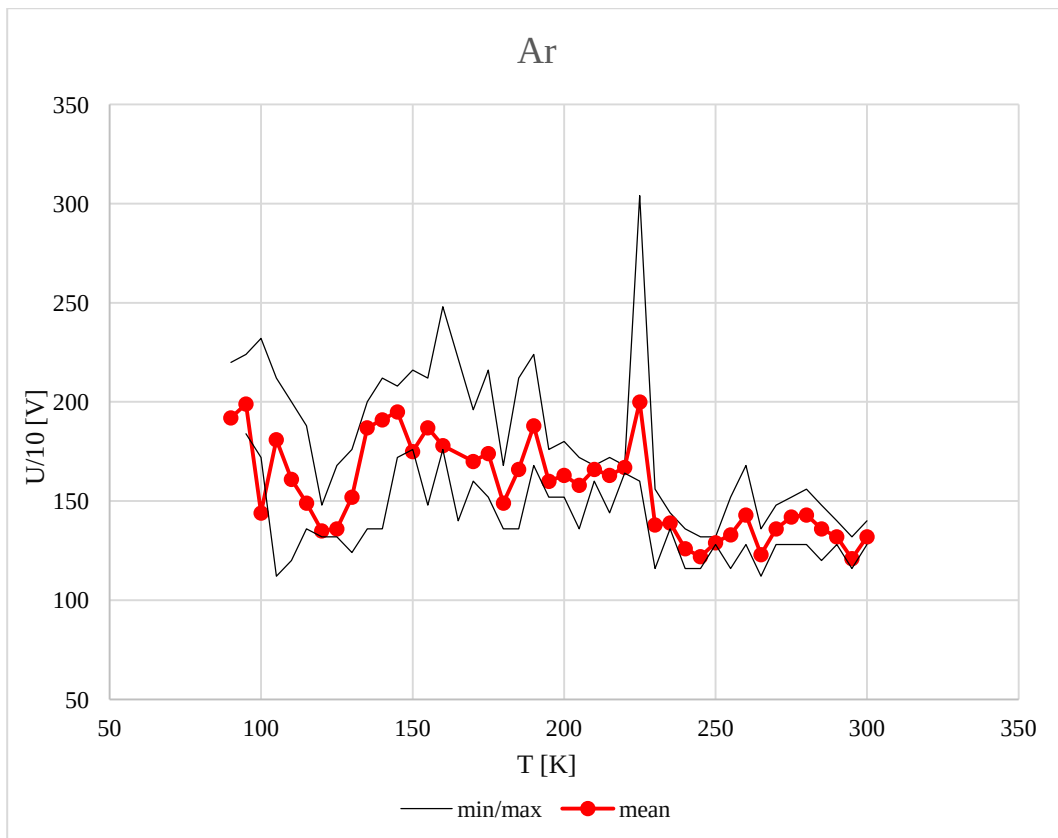


Рис. 3.3 Зависимость напряжения пробоя в аргоне от температуры. Среднее значение и граница разброса.

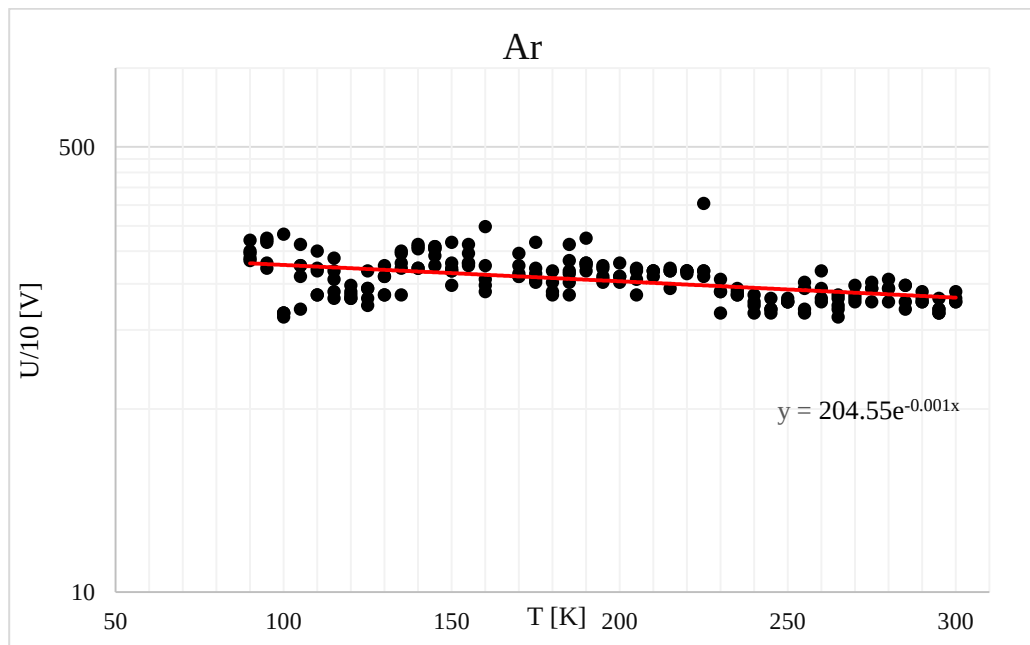


Рис. 3.4 Зависимость напряжения пробоя в аргоне от температуры. Логарифмический масштаб.

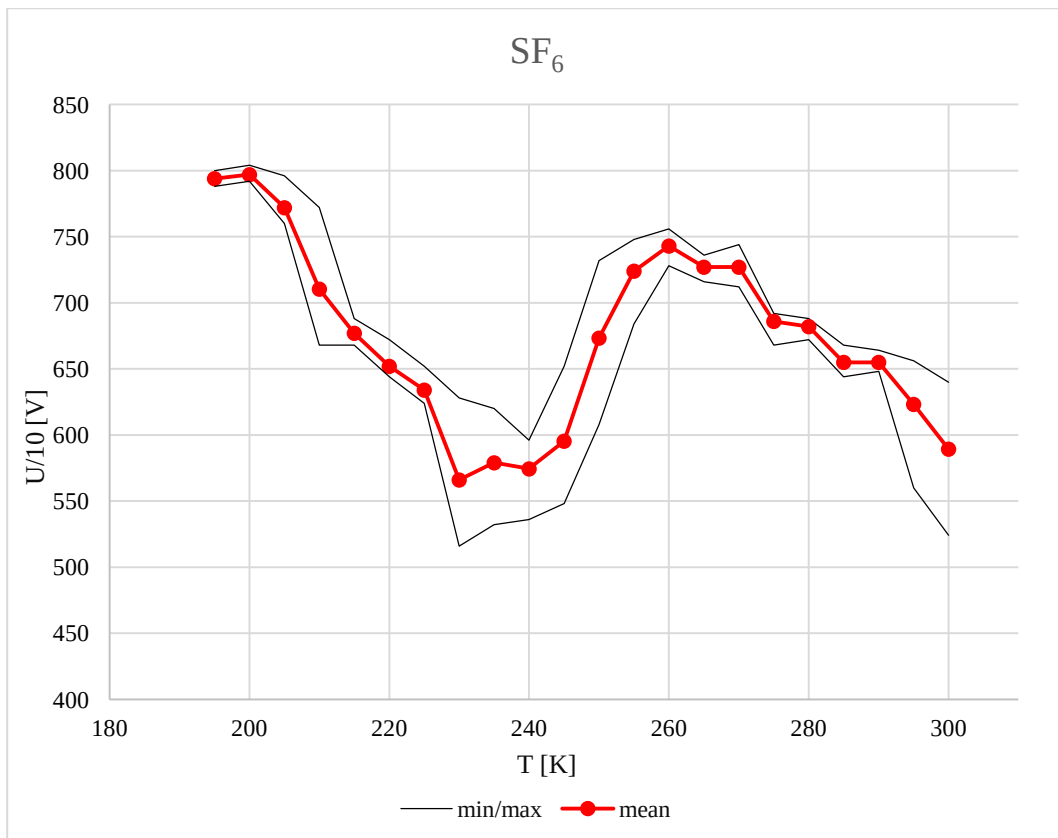


Рис. 3.5 зависимость напряжения пробоя в элегазе от температуры. Среднее значение и граница разброса.

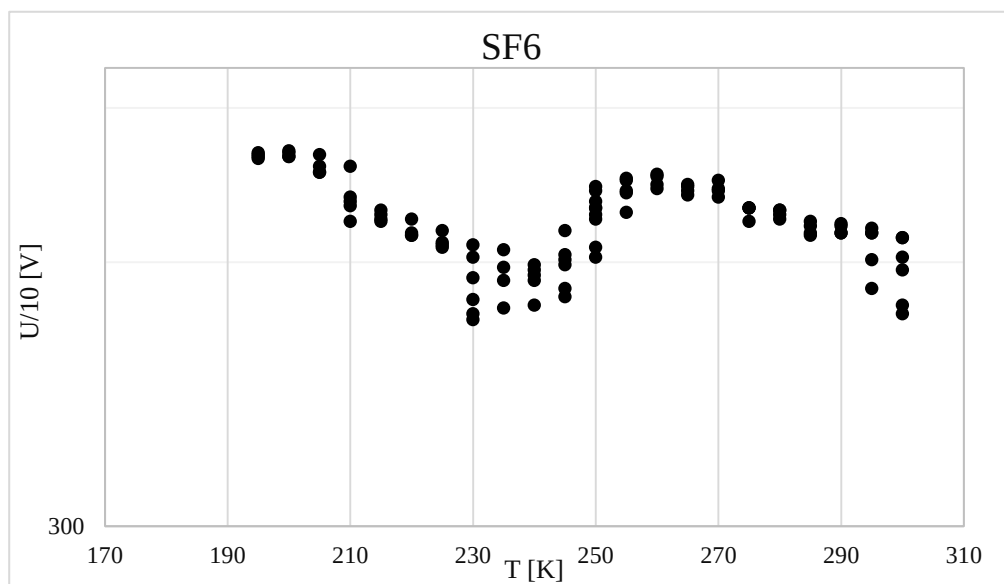


Рис. 3.5 зависимость напряжения пробоя в элегазе от температуры. Логарифмический масштаб.