

Экспериментальное исследование параметров зажигания высокочастотного тлеющего разряда.

**Федоров Вячеслав Васильевич**

Физический факультет. Электромагнитный практикум. 3 семестр.

Группа 16362, 2017 г.

Научный руководитель:

**А.А. Яцких**, аспирант, лаб. 14, ИТПМ СО РАН.

### **Аннотация**

В работе проведена апробация новой схемы зажигания разряда, основанной на быстродействующем ключе, построенным с использованием легкодоступных в настоящее время транзисторами технологии MOSFET. С помощью данной схемы были экспериментально исследованы параметры зажигания периодического разряда. В ходе эксперимента изучалось воздействие различных значений тока, скважности, частоты на тлеющий разряд. Получены зависимости напряжения пробоя тлеющего разряда от частоты, от скважности и зависимости энергии, выделяемой на разряде, от тока, от скважности. Оценена погрешность измерений. Результаты данной работы будут использованы в ИТПМ СО РАН.

Ключевые слова: высокочастотный разряд, тлеющий разряд, синтетические струи, ламинарно-турбулентный переход, пограничный слой.

Работа выполнена в лаборатории 14 волновых процессов в сверхзвуковых течениях ИТПМ СО РАН.

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

Физический факультет  
Кафедра общей физики

Федоров Вячеслав Васильевич

КУРСОВАЯ РАБОТА  
**«Экспериментальное исследование параметров зажигания  
высокочастотного тлеющего разряда»**  
2 курс, группа 16362

Научный руководитель:  
аспирант, лаб. 14, ИТПМ СО РАН  
\_\_\_\_\_ А. А. Яцких  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.  
Оценка научного руководителя

---

Преподаватель практикума:  
д - р. физ. - мат. н., с. н. с.,  
ИТПМ СО РАН  
\_\_\_\_\_ А. А. Павлов  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.  
Оценка преподавателя практикума

---

Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ	
Научный руководитель:	А. А. Яцких
Преподаватель практикума:	А. А. Павлов
Куратор практикума:	Б. А. Князев

Новосибирск, 2017 г.

## **Аннотация**

В работе проведена апробация новой схемы зажигания разряда, основанной на быстродействующем ключе, построенным с использованием легкодоступных в настоящее время транзисторами технологии MOSFET. С помощью данной схемы были экспериментально исследованы параметры зажигания периодического разряда. В ходе эксперимента изучалось воздействие различных значений тока, скважности, частоты на тлеющий разряд. Получены зависимости напряжения пробоя тлеющего разряда от частоты, от скважности и зависимости энергии, выделяемой на разряде, от тока, от скважности. Оценена погрешность измерений. Результаты данной работы будут использованы в ИТПМ СО РАН.

Ключевые слова: высокочастотный разряд, тлеющий разряд, синтетические струи, ламинарно-турбулентный переход, пограничный слой.

Работа выполнена в лаборатории 14 волновых процессов в сверхзвуковых течениях ИТПМ СО РАН.

## Оглавление

1.	Введение.....	4
2.	Описание эксперимента .....	5
2.1.	Методика измерений.....	5
2.2.	Описание установки.....	6
2.3.	Оценка погрешностей.....	7
3.	Анализ результатов измерений.....	8
3.1.	Результаты измерений.....	8
3.2.	Обработка результатов.....	11
4.	Обсуждение полученных результатов.....	13
5.	Выводы и заключения.....	13
	Список литературы .....	14

## 1. Введение

В данной курсовой работе используется схема быстродействующего ключа, изготовленного с использованием полупроводниковых транзисторов технологии Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor – полевой транзистор с изолированным затвором, MOSFET. Экспериментально апробированная схема позволяет зажигать тлеющий разряд на частотах на порядок выше стандартной частоты 20 кГц, используемой на установках ИТПМ СО РАН для создания контролируемых возмущений в исследованиях ламинарно-турбулентного перехода. Благодаря новому подходу исследуются параметры тлеющего разряда на частотах вплоть до 500 кГц.

Эффективным подходом при изучении ламинарно-турбулентного перехода является экспериментальное исследование развития контролируемых искусственных возмущений с заданными начальными условиями. В случае высокоскоростных течений наиболее эффективным способом возбуждения контролируемых пульсаций является электрический тлеющий разряд, зажигающийся с высокой частотой. Благодаря такому подходу, была подробно исследована линейная и слабо линейная стадии ламинарно-турбулентного перехода. В работах [1] и [2] экспериментально подтверждено основные положения линейной теории устойчивости. В работе [3] показано с помощью эксперимента существование параметрического резонанса.

В лаборатории 14 ИТПМ СО РАН зажигание периодического тлеющего разряда производится с помощью высоковольтного усилителя, на вход которого подается синусоидальный сигнал с генератора. На выходе усилителя формируется высоковольтный гармонический сигнал с заданной генератором частотой. Высокое качество генератора и усилителя позволяет получать высокостабильные периодические контролируемые возмущения в пограничном слое.

Многолетний опыт работы с контролируемыми возмущениями показывает, что амплитуда пульсаций пограничного слоя, порожденных разрядом, зависит от многих параметров, таких как длительность горения, ток, мощность разряда.

В данной работе исследуется схема зажигания разряда, основанная на высокочастотной коммутации высокого напряжения с помощью быстродействующего ключа, основанного на транзисторах с изолированным затвором. Схема позволяет изменять напряжение, ток, скважность и частоту в широких диапазонах значений. В перспективе такой подход позволит повысить частоты зажигания электрического разряда на порядок, что дает возможность исследовать ламинарно-турбулентный переход гиперзвуковых пограничных слоев; контроль параметров зажигания позволит вводить в поток более высокоэнергичные возмущения и производить дальнейшую тонкую подстройку начальных условий для вводимых возмущений в поток.

Таким образом, *цель работы* состоит в экспериментальном исследовании параметров зажигания периодического тлеющего разряда, апробация новой схемы зажигания тлеющего разряда.

При выполнении курсовой работы и подготовке отчетной работы использовалась литература [1-7].

## **2. Описание эксперимента**

Описание эксперимента разделим на три части. Вначале опишем используемые метод измерений и экспериментальную установку; затем приведем оценку погрешностей эксперимента.

### *2.1. Методика измерений*

В эксперименте требуется исследовать параметры зажигания периодического тлеющего разряда. Для это достаточно собрать схему, поместить разрядник в вакуумную камеру, зажечь разряд и с помощью осциллографа при изменении параметров зажигания измерить требуемые характеристики разряда, такие как напряжение пробоя тлеющего разряда  $U_{пр.}$ , ток  $I$ , частота  $f$ , скважность  $\tau$ . Схема зажигания основана на модуляции высокого напряжения до 3 кВ с помощью высоковольтного ключа на полевом транзисторе технологии MOSFET.

## 2.2. Описание установки

Блок-схема экспериментальной установки для зажигания периодического тлеющего разряда с изменяемыми параметрами зажигания приведена на рис. 1. Здесь на вход схемы подается переменное напряжение 220 В из сетевой розетки. Для регулировки входного напряжения используется автотрансформатор (катушка с магнитным сердечником и подвижной щеткой). Последовательно с автотрансформатором подключен высоковольтный трансформатор. Для выпрямления и последующего сглаживания переменного сигнала используется стандартный диодный мостик из диодов КЦ108В и конденсатор емкостью 9 мкФ. Регулировка силы тока выполняется с помощью переменного резистора с 4 градациями значения сопротивления: 13, 31, 49 и 67 кОм соответственно. Для регулировки длительности разряда использовался высоковольтный логический ключ, основанный на технологии MOSFET. Управление ключом осуществлялось высокочастотным генератором прямоугольных импульсов и собранной схемой для регулировки скважности. Для контроля параметров зажигания тлеющего разряда использован двухканальный осциллограф Tektronix TDS 1012В с возможностью записи осциллограмм с разрешением 2000 точек в формате CSV на внешний носитель памяти.

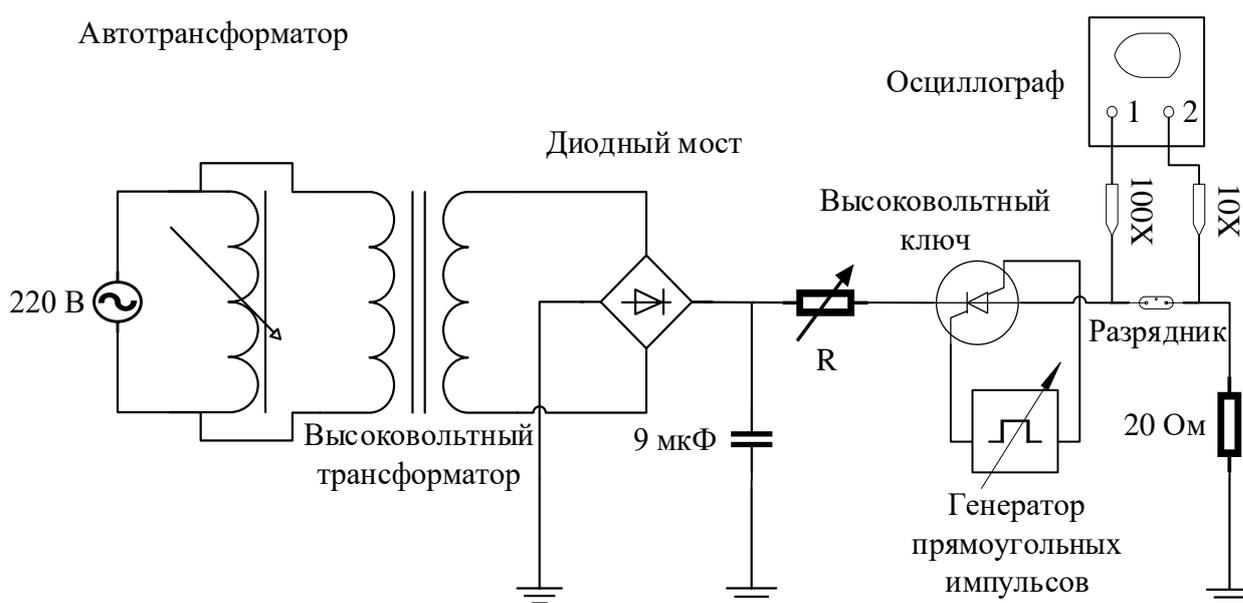


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Подводимое напряжение на электрод измерялось первым каналом с помощью высоковольтного делителя напряжения P4100 (1:100), а ток разряда измерялся вторым каналом с помощью резистора, включенного в цепь последовательно с разрядником, с номинальным значением сопротивления 20 Ом и высоковольтного делителя напряжения P6100 (1:10). Так как в работе измеряются переменные сигналы, то предварительно была проведена компенсация пробников.

Эксперименты выполнялись в вакуумной камере при пониженном давлении 0,1 атм. Разрядник – это экспериментальная модель, изображенная на рис. 2. Она представляет собой плоскую стальную пластину. Разряд пробивался

между телом стальной пластины и цилиндрическим электродом с заостренным концом, изолированным от корпуса стальной пластины. При

зажигании разряда температура в полости повышается и воздушные массы устремляются из полости наружу, создается контролируемое возмущение в

пограничном слое металлической пластины. После завершения горения разряда происходит охлаждение и воздух засасывается внутрь. В литературе используется специальный термин для таких выбросов – *синтетические струи*.

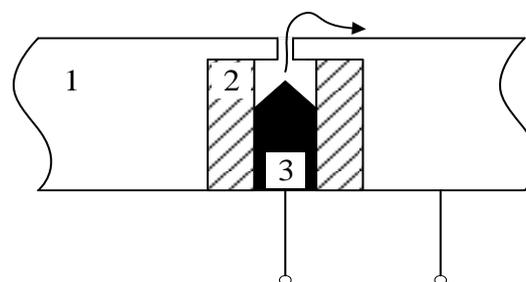


Рис. 2. Схема разрядника:  
1 – стальная пластина, 2 – диэлектрик,  
3 – электрод

### 2.3. Оценка погрешностей

Основные ошибки измерений были связаны с погрешностями измерительных приборов, используемых в работе. Так будем считать, что частота  $f$  определяется осциллографом *точно*. Падение напряжения, исходя из технической документации осциллографа Tektronix TDS 1012B, измеряется с относительной погрешностью 3 %. Малое и переменное сопротивления обладают номинальной погрешностью 1 %. Используя правило сложения погрешностей получаем, что погрешность измерения тока составила 4 %, мгновенной мощности – 7 %. Погрешность манометра  $\pm 0,05$  атм.

### 3. Анализ результатов измерений

Сначала приведем результаты измерений; после для анализа полученных результатов воспользуемся графиками, приведенными на рис. 4, 5 и 6.

#### 3.1. Результаты измерений

Перед измерениями следует обратить внимание на то, что используемый в данной работе осциллограф может записывать лишь 2000 точек, что необходимо учитывать при выполнении измерений для хорошего разрешения осциллограмм. Также в момент пробоя разряда возникает кратковременный скачок напряжения, сопровождаемый скачком тока, чтобы узнать их амплитуду, нужно правильно настроить осциллограф, иначе это приведет к переполнению АЦП осциллографа и к невозможности определить амплитуду скачка. Для выбора оптимальных настроек осциллографа, была проведена серия экспериментов, из которой были установлены оптимальные параметры получаемых осциллограмм.

На рис. 3 показана зависимость тока на малом сопротивлении и падения напряжения на межэлектродном промежутке от времени при частоте генератора 20 кГц. Красная непрерывная линия соответствует падению напряжения, а синяя прерывистая линия соответствует току. В момент времени  $t = 0$  мкс подается сигнал с генератора прямоугольных импульсов на открытие высоковольтного логического ключа. В течении 1 мкс наблюдается зарядка паразитных емкостей. Когда напряжение на разряднике достигает 670 В, наблюдается пробой на межэлектродном промежутке в разряднике, что подтверждает резкий скачок тока. Далее разряд горит в течении 25 мкс. Значения падения напряжения и тока меняются слабо и принимают свои постоянные значения 420 В и 30 мА соответственно. В момент времени  $t = 26$  мкс подается сигнал с генератора прямоугольных импульсов на закрытие высоковольтного логического ключа. Ток снижается до нуля.

В правом верхнем углу на рис. 3 показана хорошая, с точностью 1 мкс, повторяемость зажигания разряда с частотой 20 кГц.

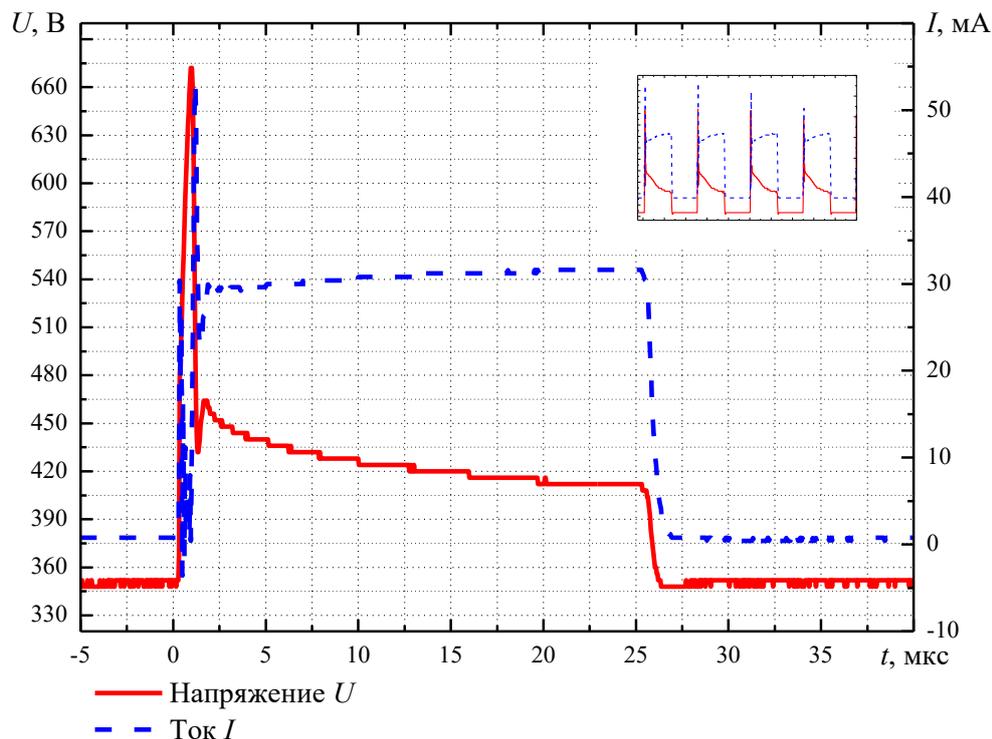


Рис. 3. Зависимость тока и падения напряжения на разряднике от времени

Полученные данные с осциллографа позволяют рассчитать мгновенную мощность, которая выделяется на разряде. А возможность схемы изменять частоту зажигания тлеющего разряда вплоть до 500 кГц дает представить значения мгновенной мощности при различных временах горения разряда.

На рис. 4 изображены черной прерывистой с точкой, красной прерывистой и синей сплошной линиями мгновенные мощности, выделяемые на разряде при различных частотах генератора прямоугольных импульсов: 20, 100 и 500 кГц соответственно. При пробое разряда наблюдается скачок, связанный со скачкообразным увеличением тока разряда. Амплитуда скачка мгновенной мощности в момент пробоя равна 30, 40 и 60 Вт соответственно выбранным частотам. Во время горения разряда значение мгновенной мощности составляет 10 – 15 Вт. Разные амплитуды скачков мгновенной мощности при различных частотах зажигания тлеющего разряда дают основания полагать, что напряжения пробоя зависит от частоты зажигания. Была проведена серия экспериментов,

в которых измерялось напряжение пробоя электрического разряда  $U_{пр}$  при различных частотах  $f$  и различной скважности  $\tau$ .

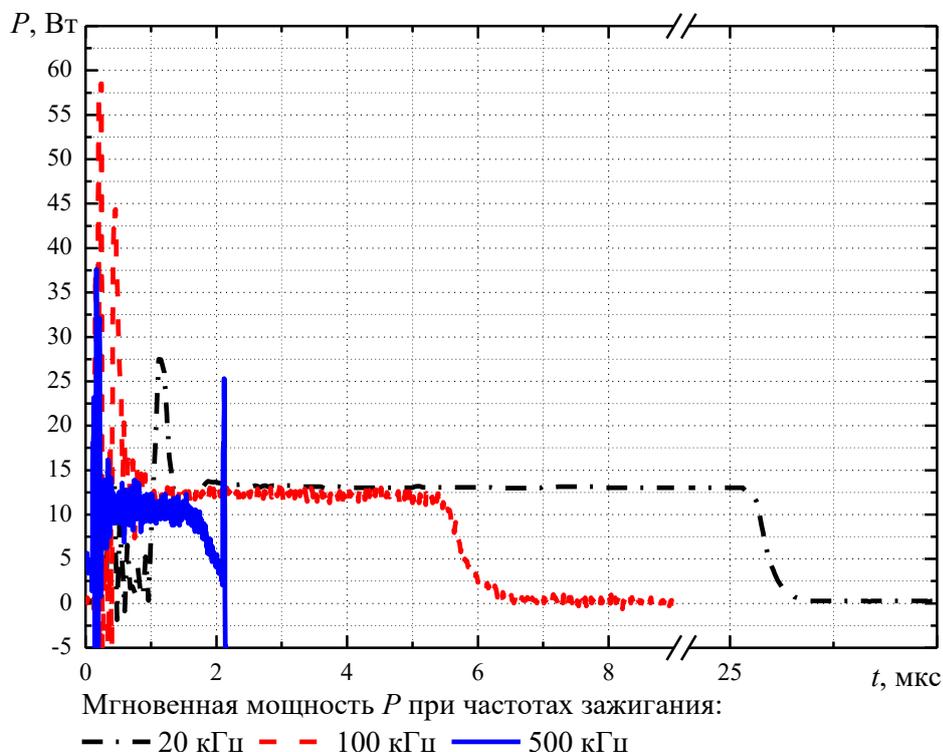


Рис. 4. Мгновенная мощность, выделяемая на разряде за период, при различных частотах зажигания

На рис. 5 показана зависимость напряжения пробоя тлеющего разряда: а) от частоты при фиксированной стандартной скважности  $\tau = 50 \%$ ; б) от скважности при фиксированной стандартной частоте  $f = 20$  кГц. Результаты под буквой а хорошо аппроксимируется прямой с помощью метода наименьших квадратов (МНК), причем угловой коэффициент равен  $-0,34$ , а значение свободного члена составило  $582$ . Чего нельзя сказать о результатах под буквой б, где неприменим МНК, т.к., исходя из графика, зависимость напряжения пробоя тлеющего разряда от скважности имеет более сложный характер: в промежутке от  $5$  до  $10$  мкс напряжение растет, с  $10$  до  $20$  мкс принимает свой максимум и со значения скважности  $25$  мкс напряжение падает. Аппроксимация МНК была проведена специальным ПО – Origin 8.

Кроме мгновенной мощности особый интерес представляет полная энергия, выделяемая на разряде за период. Особая вариативность экспериментальной схемы позволяет управлять данной энергией, подобно мгновенной мощности на рис. 4. Для подтверждения этого были установлены зависимости энергии, выделяемой на разряде, от скважности и тока при  $\tau = 50\%$  на стандартной частоте 20 кГц. Ток изменялся путем переключения переменного резистора R. Скважность изменялась путем подстройки генератора прямоугольных импульсов. Результаты приведены на рис. 6: под буквой а зависимость энергии на разряде за период от частоты  $f$ ; под буквой б – зависимость энергии за период от скважности  $\tau$ . Оба графика хорошо аппроксимируются прямой МНК. В двух случаях энергия пробоя растет пропорционально току и скважности соответственно.

### 3.2. Обработка результатов

Рассмотрим рис. 4 график мгновенной мощности от частоты генератора прямоугольных импульсов. Можно убедиться, что мощность уходит в ноль при  $t = 2$  мкс, но в следующий момент времени, мгновенная мощность уже отлична от нуля. Следовательно, частоту 500 кГц будем считать предельной для экспериментальной схемы при значении скважности 50%. При большей частоте тлеющий разряд будет не успевать гаситься.

Полученные графики на рис. 5 и хорошо аппроксимируются прямой МНК, кроме графика напряжения пробоя от скважности, где не видно явной зависимости напряжения от длительности горения разряда. Результаты аппроксимации для удобства представлены в таблице.

Таблица. Аппроксимация МНК

Рисунок	Угловой коэффициент, $b$	Свободный член, $a$ .
рис. 5, а	-0,34	$5,8 \cdot 10^2$
рис. 6, а	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
рис. 6, б	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$

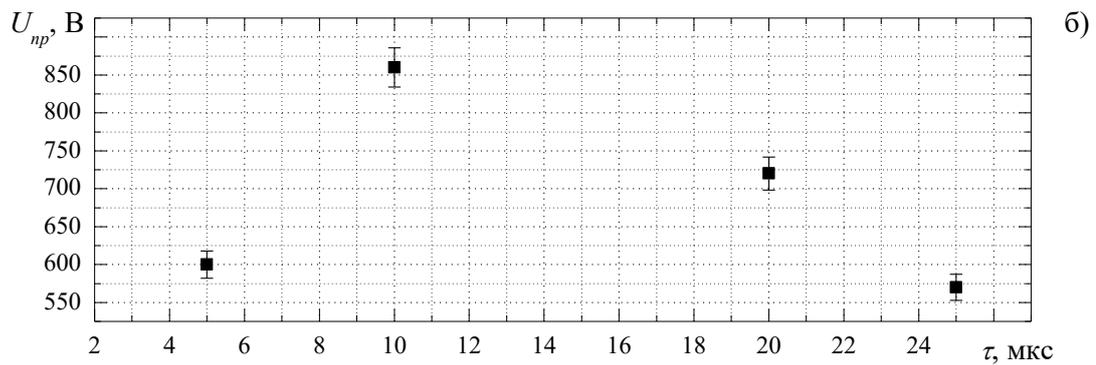
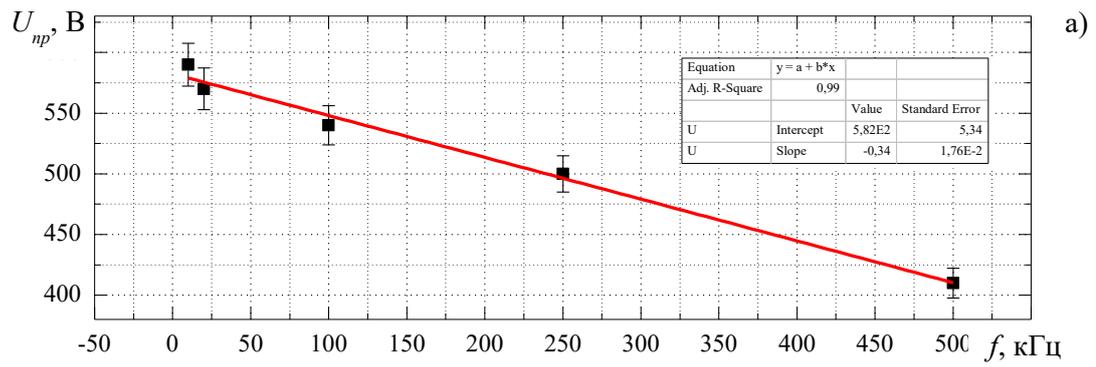


Рис. 5. Напряжение пробоя разряда в зависимости от: а) частоты  $f$ ; б) скважности  $\tau$

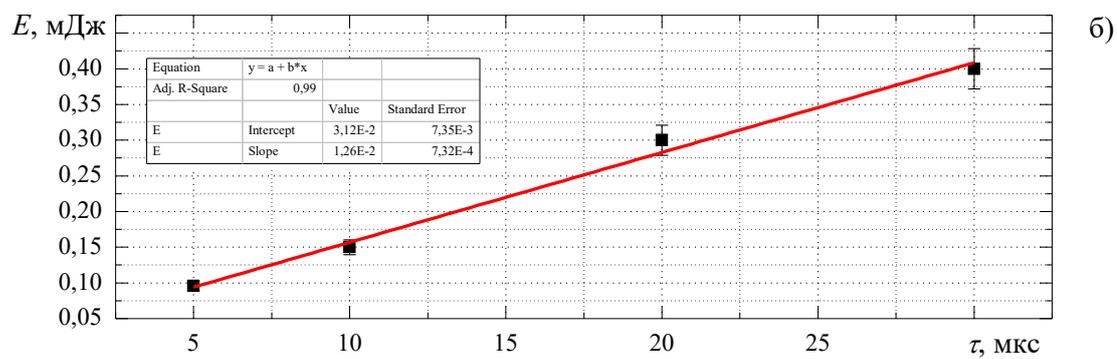
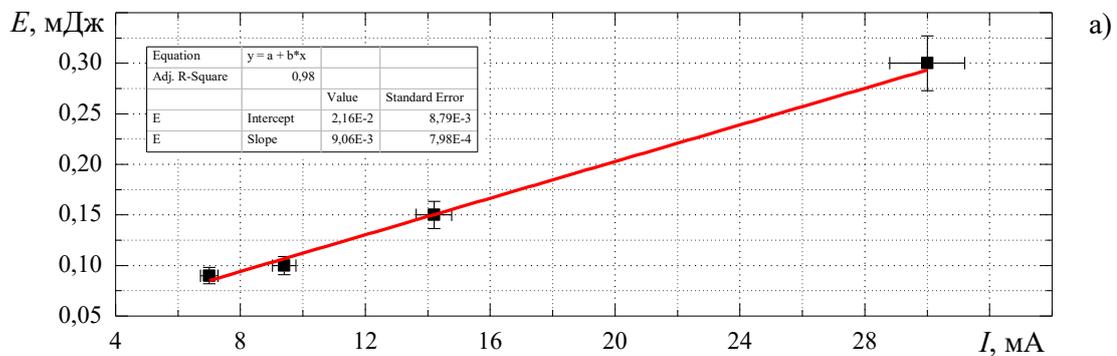


Рис. 6. Энергия разряда в зависимости от: а) тока  $I$ ; б) скважности  $\tau$

#### **4. Обсуждение полученных результатов**

Из полученных результатов ясно, что нет необходимости ставить частоту выше 500 кГц, т.к. тлеющий разряд, порожденный потоком носителей заряда, не успевает погаситься. Скорее всего, связано это в первую очередь с тем, что носители заряда обладают инертностью, которая не дает им мгновенно изменять свой импульс. Вероятно, что предельная частота схемы должна зависеть от межэлектродного расстояния, которое из-за особенностей разрядника измерить не удалось, разреженности атмосферы и скважности.

Напряжение пробоя пропорционально спадает с ростом частоты, однако имеет сложный вид зависимости от скважности, что требует дополнительного исследования.

Энергия, выделяемая на разряде, легко поддается регулировке при изменении параметров рабочей схемы, что показано на рис. 6.

Основные погрешности связаны с осциллографом, который использовался в работе. Однако достигнутый уровень точности измерений позволил получить достоверные результаты.

#### **5. Выводы и заключения**

В данном эксперименте проведена апробация новой схемы зажигания высокочастотного тлеющего разряда с применением полупроводниковых транзисторов MOSFET. Была исследована вариативность параметров схемы, а также их влияния на зажигание электрического разряда. Получены *линейные зависимости* напряжения пробоя высокочастотного тлеющего разряда от частоты зажигания и энергии, выделяемой на разряде за период, от тока и от скважности. Данные прямые показывают возможность регулировать параметры периодического тлеющего разряда, используя вариативность рабочей схемы. Также в эксперименте показана зависимость напряжения пробоя от скважности. Но выяснить вид зависимости не удалось, что требует дополнительного исследования в этой области.

Конструкция разрядника, использованного в данной работе, схожа с источниками контролируемых возмущений, которые используются в экспериментальных исследованиях ламинарно-турбулентного перехода сверхзвуковых пограничных слоев в аэродинамических трубах ИТПМ СО РАН. Благодаря этому курсовая работа проведена очень близко к условиям эксперимента в аэродинамической трубе. Данные, полученные в работе, *можно использовать* при проведении эксперимента в аэродинамической трубе.

### **Список литературы**

1. Kosinov A. D., Maslov A. A., Shevelkov S. G. Experiments on Stability of Supersonic Boundary Layers // J. Fluid Mech. 1990. Vol. 219. P. 621-633.
2. Ермолаев Ю. Г., Колосов Г. Л., Косинов А. Д., Семенов Н. В. Линейная эволюция контролируемых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла // Изв. РАН. МЖГ. 2014. Вып. 2. С. 58 – 68.
3. Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В. Характерные особенности слабо нелинейного взаимодействия волн неустойчивости в сверхзвуковом пограничном слое // Сибирский физический журнал. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 3. С. 3-14.
4. Яцких А. А., Семенов А. Н., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В. Влияние параметров импульсного разряда на возмущения сверхзвукового пограничного слоя плоской пластины // Сибирский физический журнал. Серия: Физика: 2017. Т. 12, вып. 3. С. 41-48.
5. Князев Б. А., Начала обработки экспериментальных данных, Черкасский В. С. Новосибирск: НГУ, 1993.
6. Методы физических измерений (лабораторный практикум по физике) // Под ред. Р. И. Солоухина. Новосибирск: Наука. Сиб. отд. 1975.
7. Дж. Тейлор. Введение в теорию ошибок. Пер. с англ. М., Мир, 985. — 272 с.