

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

Физический факультет  
Кафедра общей физики

Кузьмин Никита Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Оценка потерь на излучение в запердельном волноводе  
квазицилиндрического СВЧ-резонатора**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18310

**Научный руководитель:**

Медведев А. Э

Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Преподаватель практикума**

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Новосибирск 2019 г.

**Оценка потерь на излучение в запердельном волноводе  
квазицилиндрического СВЧ-резонатора**

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 18310, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

**Медведев Алексей Эдуардович**

**Аннотация**

В данной работе исследовался квазицилиндрический резонатор, который в составе СВЧ модуля являлся реактором для лазерно-плазменных технологий. Была проведена экспериментальная оценка потерь запердельного волновода, спроектированного для ввода лазерного излучения. Результаты экспериментальных измерений соотносятся с полученными ранее оценками для запердельного волновода.

Ключевые слова: квазицилиндрический СВЧ-резонатор, добротность, потери на излучение, запердельный волновод, СВЧ-генератор.

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	2
<b>Теоретическая часть</b> .....	3
Электромагнитное поле в резонаторе .....	3
Добротность резонатора .....	4
Оценка затухания мощности СВЧ-излучения в запердельном волноводе квазицилиндрического СВЧ-резонатора .....	5
<b>Схема установки</b> .....	6
Описание работы СВЧ-генератора.....	6
Устройство квазицилиндрического СВЧ-резонатора .....	8
Методика измерения мощности затухания .....	9
Согласование резонатора с СВЧ-трактом .....	10
<b>Результаты измерений</b> .....	10
Затухание мощности СВЧ-излучения в запердельном волноводе .....	10
Обработка и анализ результатов.....	11
<b>Вывод</b> .....	11
<b>Список литературы</b> .....	11

## **Введение**

В ИЛФ СО РАН в рамках исследования взаимодействия плазмы с поверхностью для создания технологий модификации поверхности и синтеза наноматериалов на металлических подложках. Проводится исследование импульсного СВЧ-генератора, позволяющего осуществлять вневакуумную обработку поверхностей, что существенно повышает скорость обработки и снижает удельную себестоимость обработки, т.к., как правило, рабочие давления в других подобных установках составляют доли Па.

В настоящей работе исследуется СВЧ-реактор, спроектированный на базе квазицилиндрического резонатора, способный работать в трех режимах: СВЧ-плазмотрон, лазерный плазмотрон и плазмотрон в режиме комбинированного возбуждения, когда лазерная плазма создается на фоне СВЧ плазмы. Ввод лазерного излучения в полость СВЧ-реактора организуется через запердельный волновод. Из-за высокой добротности медного резонатора, потери на излучение через запердельный волновод могут быть сравнимы с потерями в стенках резонатора. Целью настоящей работы является экспериментальная оценка потерь на излучение в различных режимах работы резонатора и прежде всего, когда он находится в режиме рассогласования с СВЧ-трактом.

## Теоретическая часть

### Электромагнитное поле в резонаторе

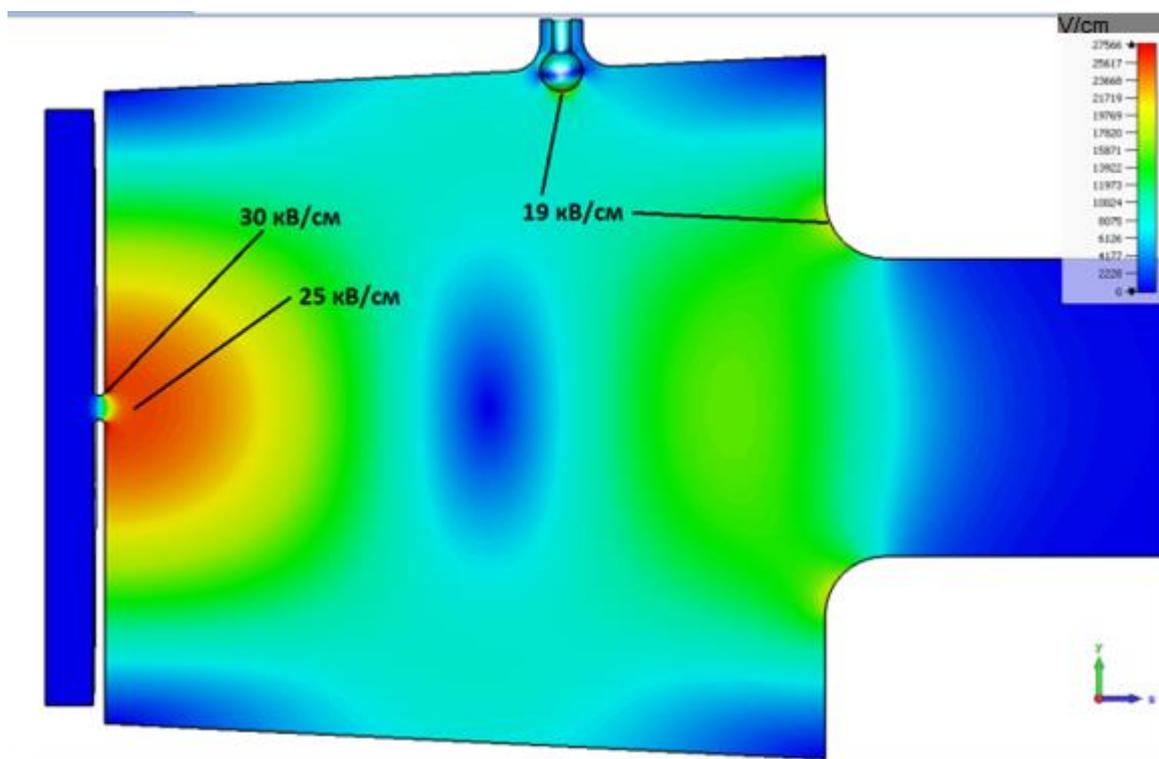


Рис. 1 Двумерное распределение электрического поля в квазицилиндрическом СВЧ-резонаторе

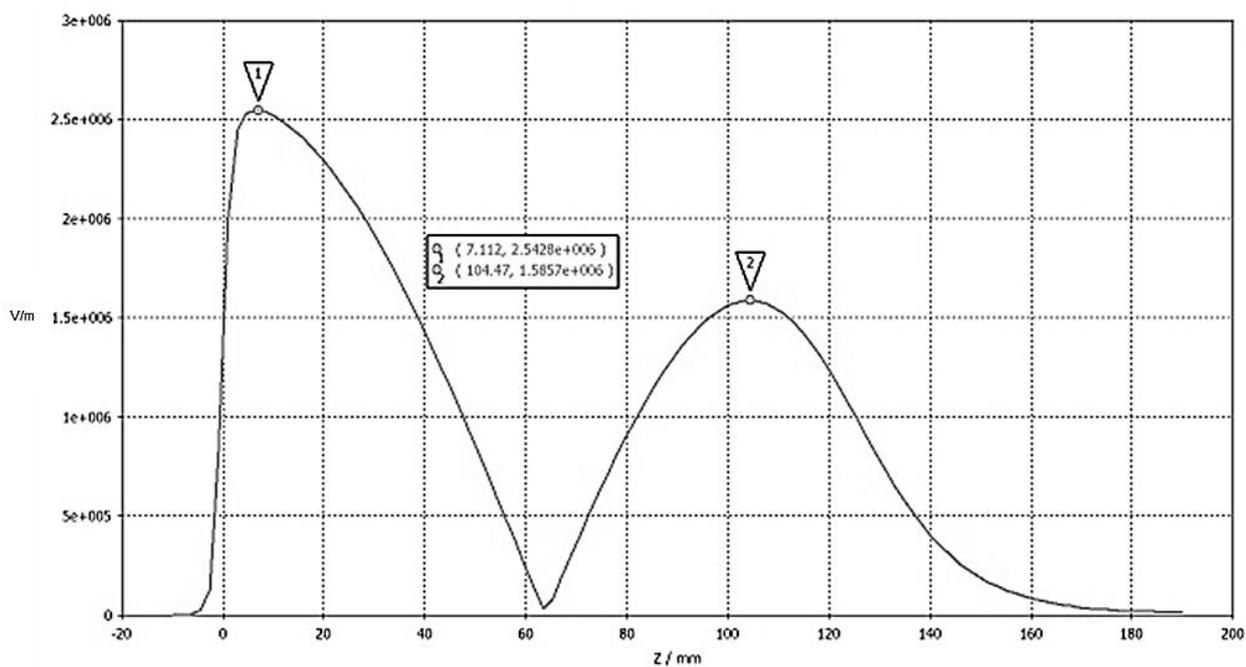


Рис. 2 Распределение электрического поля в резонаторе по его оси

Распределение электрического поля в резонаторе было численно представлено с применением программного кода CST STUDIO SUITE.

Благодаря квазицилиндрической форме резонатора максимумы осевого поля  $TM_{012}$ -моды несимметричны относительно середины резонатора. При этом абсолютный максимум (30 кВ/см) наблюдается в зауженной части резонатора вблизи выходного отверстия (сопла), где предполагается формирования сгустка СВЧ плазмы. С противоположной стороны (в правой части квазицилиндра), на расстоянии 120 мм от выходного отверстия, организован запердельный волновод обеспечивающий ввод лазерного излучения. На рис. 2 наблюдается характерный для запердельного волновода спад электрического поля вдоль оси, начиная от правого торца (120 мм и правее).

### ***Добротность резонатора***

Добротность систем представляет собой отношение энергии колебательной системы к энергии, потерянной за период.

Добротность резонатора определяется потерями электрического тока на стенках и излучением. Потери электрического тока на стенках будут выражаться отношением объёма к толщине скин-слоя на поверхности резонатора (1).

$$Q_0 \approx \frac{2V}{\delta S} \quad (1)$$

Т.к., как правило, линейные размеры резонатора пропорциональны рабочей длине волны, то, можно считать, что  $V \approx \lambda^3$  и  $S \approx \lambda^2$ . Следовательно, из формулы (1) с точностью до небольшого постоянного множителя получаем:

$$Q_0 \approx \frac{\lambda}{\delta} \quad (2)$$

где  $\delta$  – толщина скин-слоя[1, стр. 304].

Толщину скин-слоя вычисляем по формуле [3, стр. 613]:

$$\delta \sim \frac{c}{\sqrt{8\pi\sigma\mu\nu}} \quad (3)$$

для меди  $\sigma = 5,4 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$ ,  $\mu$  принимаем равным единице,  $\nu = 2,47 \text{ ГГц}$ . Получаем  $\delta = 1,63 \text{ мкм}$ . Далее по формуле (2) добротность  $Q = 74000$ . Однако в реальных условиях добротность резонатора ниже теоритической. Для меди она составляет величину порядка 20000.

Также наличие отверстий и, в частности, наличие сочленений даёт дополнительную статью потерь на излучение. В нашем случае на добротность может сказываться наличие запредельного волновода, потери на котором могут быть сравнимы с потерями в скин-слое.

### **Оценка затухания мощности СВЧ-излучения в запредельном волноводе квазицилиндрического СВЧ-резонатора**

Распространение волн в волноводах происходит, когда длина волны  $\lambda$  меньше  $\lambda_{кр}$ , которая зависит от геометрических параметров волновода и типа проходящей по волноводу волны [2, стр. 18]. В нашем случае имеем волновод круглой формы с радиусом 2,5 см, для которого  $\lambda_{кр}$  будет выражаться как  $2,62R$  для волны типа  $E_{01}$ . Что даёт нам  $\lambda_{кр} = 6,55 \text{ см}$ .

Постоянная затухания:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda}\right)^2} \quad (4)$$

Напряженность поля будет спадать по экспоненциальному закону:

$$|E_{вых}| = |E_{вх}| e^{-\alpha l} \quad (5)$$

где  $l$  – длина запредельного волновода.

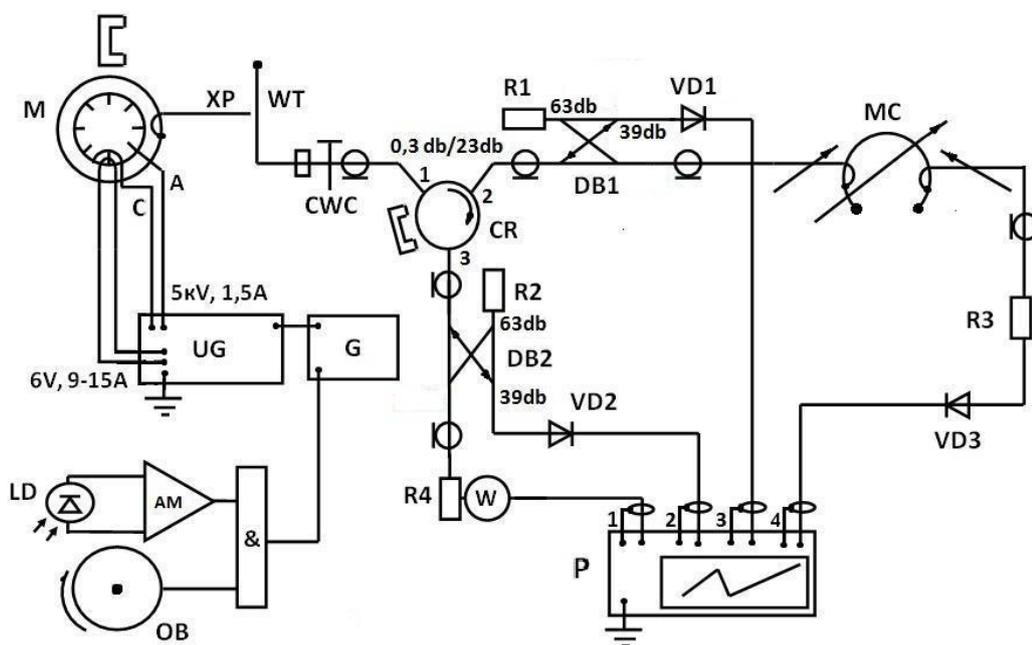
Величина ослабления  $K$  будет описываться соотношением [1, стр. 133-134]:

$$K = 201g \frac{|E_{вх}|}{|E_{вых}|} = 201g e^{\alpha l} \cong 8,68\alpha l \text{ дБ} \quad (6)$$

СВЧ-генератор испускает волны с частотой излучения  $\nu$  равной 2,47 ГГц, что соответствует длине волны  $\lambda$  равной 12,1 см. Из формулы (4) находим  $\alpha$  и подставляем в выражение (6). Получаем  $K/l = 7$  дБ/см, что в итоге даёт  $K = 63$  дБ для волновода с диаметром 5 см и длиной  $l = 9$  см.

## Схема установки

### Описание работы СВЧ-генератора



**Рис. 3** Принципиальная схема импульсного СВЧ-генератора для лазерно-плазменных технологий

На рис. 3 изображена принципиальная схема генератора, на котором был проведен эксперимент.

Питание анода магнетрона (М) осуществляется от импульсного источника (UG), имеющего возможность работать в режимах обратной связи по току, напряжению анода и току накала, что позволяет эффективно стабилизировать и управлять величиной мощности в различных рабочих точках магнетронной лампы. Импульсы запуска анодного напряжения формируются генератором (G) управляемым схемой совпадений, на вход которой поступают сигналы фотодиода (LD), от переднего фронта лазерного импульса, и датчика

положения образца (ОВ). Регулировки генератора запуска позволяют выбрать величину задержки от 100 нс до 10 мкс и длительность импульса от 0,5 до 100 мкс. В результате на штыре магнетрона (ХР) получаем СВЧ сигнал с регулируемой амплитудой, скважностью и задержкой относительно переднего фронта лазерного импульса. Штырь возбуждает колебания в прямоугольном волноводе (WT), откуда через коаксиально-волноводный переход (CWC) СВЧ импульсы поступают на вход 1 циркулятора (CR). С входа 2 циркулятора, через петлю связи, осуществляется ввод СВЧ энергии в резонатор технологической головки (МС). Отражённая от резонатора волна попадает на вход 3 и поглощается в согласованной нагрузке (R4). Для отвода от поглощающей нагрузки тепла используется водяное охлаждение, на основе которого выполнен калориметрический измеритель мощности (W). Через направленные ответвители (DB1) и (DB2) прямой и отражённый сигналы, ослабляясь на 39 Дб, направляются на детекторные головки (VD1) и (VD2), после чего поступает для регистрации на входы (2) и (3) осциллографа (P). Поле в резонаторе с помощью петли связи, аттенюатора (R3) и детектора (VD3) регистрируется через вход (4) осциллографа.

## Устройство квазицилиндрического СВЧ-резонатора

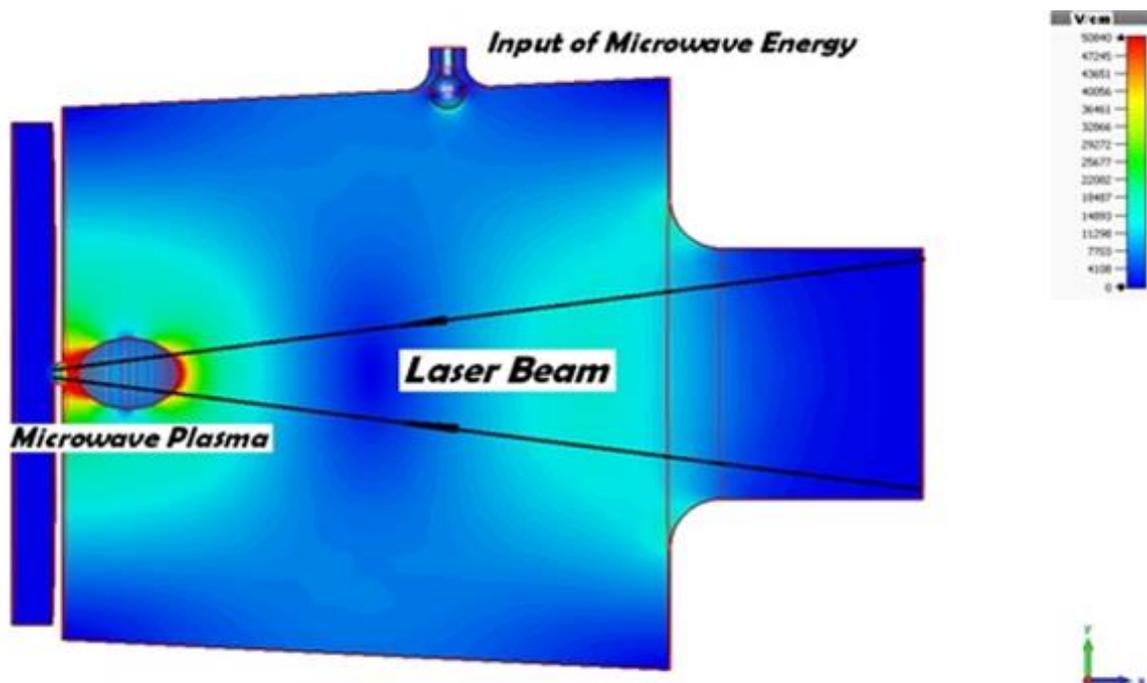


Рис. 4 Схема подачи лазерного луча и энергий СВЧ-излучения в резонатор

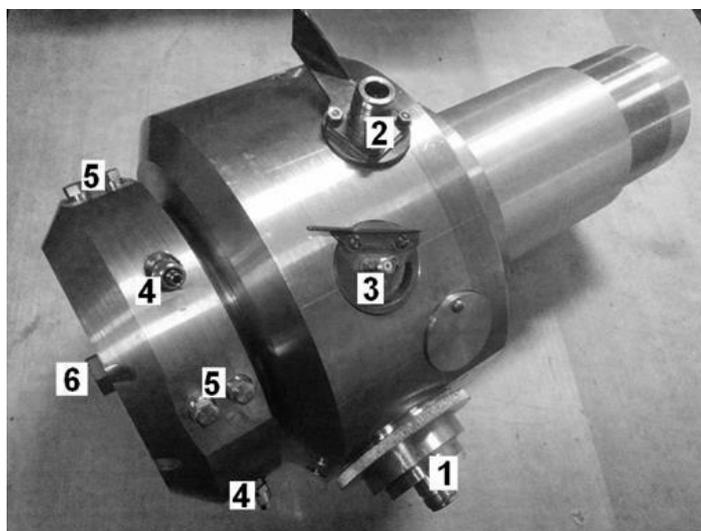


Рис. 5 Сборка СВЧ-резонатора: 1, 2 – вводы СВЧ мощности, 3 – ввод контроля мощности, 4 – штуцера подачи воздуха, 5 – заглушки окон наблюдения, 6 – сопло

Благодаря квазицилиндрической форме резонатора электрическое поле перераспределяется по его полости, образуя максимум у выходного отверстия сопла.

Решение в виде квазицилиндра позволяет, кроме СВЧ, обеспечить ввод лазерного пучка. Лазерный пучок, введённый через запердельный волновод, проходит через не очень плотную плазму, формируя на выходе из плазматрона пятно приповерхностной лазерной плазмы (рис. 4).

### ***Методика измерения мощности затухания***

Для измерения малых мощностей колебаний широко применяются измерения при помощи детекторных и термисторных головок.

Детекторные головки представляют собой отрезки волновода, снабженные устройствами для включения детектора, для согласования его с линией и для подключения измерительного прибора постоянного тока.

Термистор – полупроводниковый прибор, напряжение на котором сильно зависит от величины подводимой мощности. Основное его назначение измерение малой мощности СВЧ. Элементы СВЧ-тракта, куда включаются термисторы, называются термисторными головками. Принципиально они сходны с детекторными головками, но так как они предназначены измерять не относительную, а абсолютную величину мощности высокочастотного тракта, то требования, к ним предъявляемые, значительно жёстче. Измерительной цепью термистора является мостовая схема, одним из плеч которой является сам термистор.

В нашем случае мы получаем абсолютную величину колебаний, используя ваттметр МЗ-51, представляющий собой измерительный мост Я2М-66 с термисторной головкой. В качестве приёмно-регистрирующего элемента СВЧ-волны, проходящей через запердельный волновод, используется антенна в виде прямоугольной рамки размером 10x10 см. Антенна располагалась на расстоянии 0,5-1 см от конца волновода, размеры антенны были достаточна, чтобы полностью перекрыть отверстие волновода. Антенна подключалась к термисторной головке через аттенуатор 10 дБ.

## Согласование резонатора с СВЧ-трактом

При работе с любыми передающими линиями сверхвысоких частот под режимом согласования понимается такое состояние системы, при котором коэффициент отражения оказывается равным нулю, вследствие чего коэффициент стоячей волны равен единице.

Согласование в СВЧ-резонаторе определялось соотношением прошедшей и отражённой волны. Настройка резонатора велась таким образом, чтобы величина отражённой волны была много меньше величины проходящей волны. Резонатор настраивался с помощью подбора глубины проникновения штыря в полость резонатора и получением резонанса посредством изменения объёма резонатора резьбовым соединением, расположенным в средней части резонатора.

## Результаты измерений

### Затухание мощности СВЧ-излучения в запердельном волноводе

При помощи ваттметра МЗ-51 была померена мощность на выходе из запердельного волновода при разных значениях мощности на магнетроне.

Результаты представлены в таблице 1.

$P_{\text{магн}}, \text{Вт}$	$P_{\text{вых}}, \text{мкВт}$
245,85	$36,47 \pm 8$
455	$88,32 \pm 19$
682,5	$197,14 \pm 30$
220	$21,13 \pm 3,2$
132	$27 \pm 5,2$
44	$6,15 \pm 0,66$
67,5	$15,75 \pm 7,7$
89	$27,62 \pm 3$
112	$10,87 \pm 3,1$
134,4	$15,89 \pm 2,1$
179,2	$28,7 \pm 4,8$

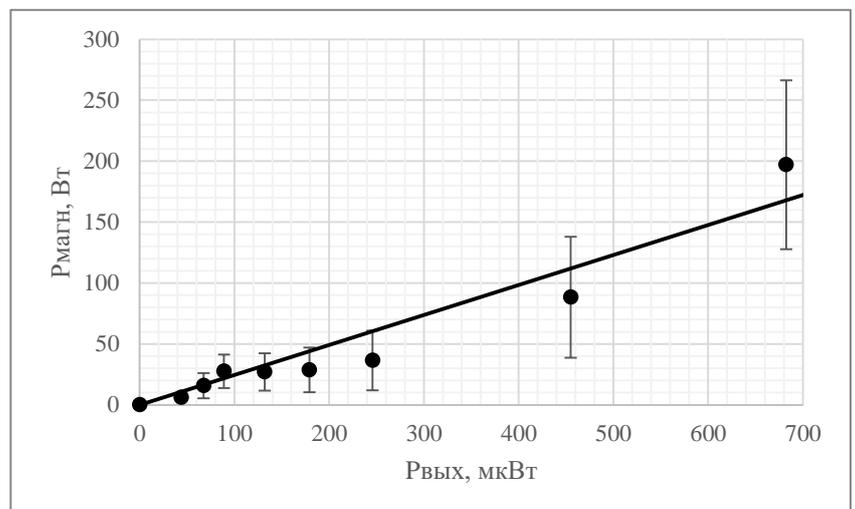


Табл. 1 Зависимость  $P_{\text{вых}}$  от  $P_{\text{магн}}$

Рис. 6 Зависимость  $P_{\text{вых}}$  от  $P_{\text{магн}}$

## **Обработка и анализ результатов**

По формуле (5) полученная величина ослабления  $K = 67.5 \pm 8.7$  дБ, что, в целом, совпадает с проведённой выше теоретической оценкой.

## **Вывод**

По результатам измерений получилось, что потери на излучение через запердельный волновод с диаметром 5 см и длиной 9 см много меньше, чем потери на протекание токов в скин-слое, что соответствует грубым теоретическим оценкам.

## **Список литературы**

1. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970. Т. 1. 443 с.
2. Изюмова Т. И., Свиридов В. Т. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии. М.: Энергия, 1975. 113 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Электричество. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. Т. 3. 656 с.