

## Определение оптимальных режимов работы СВЧ установки для сушки и обжига строительного кирпича

*К.А. Кузьмин<sup>1</sup>, С.М. Морозов<sup>1</sup>, Л.И. Кочеткова<sup>2</sup>, Э.И. Хобот<sup>2</sup>,  
А.Р. Муртазин<sup>2</sup>, Р.А. Казарян<sup>2</sup>, Г.А. Казарян<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Смоленский областной казачий институт промышленных технологий и бизнеса (филиал) МГУТУ имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), Вязьма*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** В статье представлены схема измерительного стенда модели устройства для определения части энергии распределяемой от генератора, схемы измерительного стенда модели для измерения коэффициента стоячей воды (КСВН) и измерения переходного сопротивления. Лучшие результаты дает перегородка, состоящая из двух металлических пластин, перекрывающих тракт как сверху, так и снизу слоя глины. Так, при влажности глины 4% полное ослабление равнялось - 14,4 дБ (-6,1 дБ без перегородки), а при влажности 16% -35дБ (-18,4 дБ без перегородки). Наблюдается увеличение ослабления приблизительно только в два раза по сравнению со случаем без перегородки как для сухой, так и для влажной глины, но величина ослабления недостаточна. Для увеличения ослабления в модели 2 были созданы два, следующих друг за другом резонатора. Но ослабление в этом случае увеличилось незначительно по сравнению с одним резонатором. Очевидно, что два резонатора расстраиваются из-за взаимного влияния друг на друга. Поэтому предлагается в реальной установке между этими двумя резонаторами разместить участок волновода нерезонансной длины с поглотителем, который устранил связь между резонаторами.

**Ключевые слова:** измерительный стенд, сверхвысокочастотная установка, кирпич, сушка, обжиг, мощность, структура, электродинамическое моделирование, экспериментальная установка.

Задача поиска оптимальных режимов работы СВЧ установок состоит в отыскании таких законов изменения управляющих параметров, которые обеспечили бы наилучшие показатели производственной деятельности — высшее качество готового продукта при наименьших затратах энергетических ресурсов [1, 2].

Поскольку эксперимент на производстве очень дорог, исследования проводят на лабораторных установках [3]. Поэтому цель экспериментального исследования объекта должна предполагать получение большей информации при меньших затратах, чем это можно сделать традиционными

классическими методами [4-6]. Этому требованию, как известно, отвечает сознательное планирование эксперимента с учетом условий проведения опыта.

Схема измерительного стенда для первой модели представлена на рисунке 1.

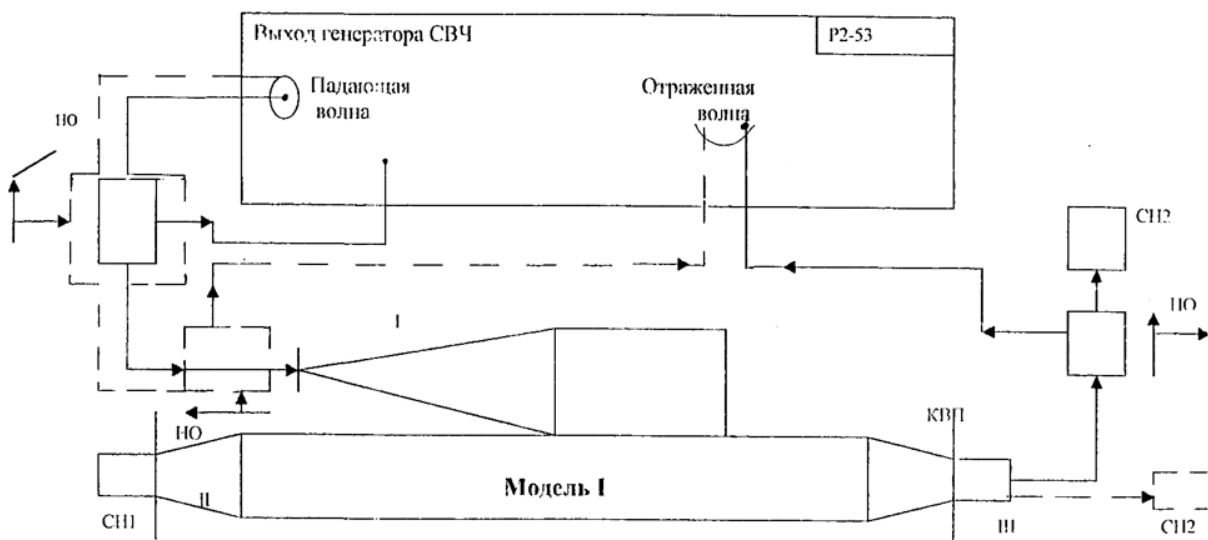


Рис. 1. – Схема измерительного стенда модели устройства для определения части энергии распределяемой от генератора

Стенд содержит:

- модель 1, являющуюся моделью половины реальной установки;
- панорамный измеритель коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) и ослаблений P2-53, работающий в диапазоне частот 2-4 ГГц;
- направленные ответвители (НО) 2 шт, коаксиального типа, из комплекта P2-53;
- коаксиально-волноводный переход (КВП) с сечением волноводного тракта 72x34 мм из комплекта P2-56;
- волноводную согласованную нагрузку (СН1) коэффициент стоячей волны (далее КСВН) 1,08 из комплекта P2-56;

- коаксиальную согласованную нагрузку (СН2) с КСВН 1,05 из комплекта Р2-53.

Сплошными линиями на рисунке 1 показаны соединения прибора Р2-53, СВЧ элементов и модели для измерения ослабления, а пунктирными линиями- для измерения КСВН.

Перед проведением экспериментов было произведено согласование возбуждающего устройства модели, при этом использовалась специально изготовленная согласованная нагрузка, которая охватывала внутренний проводник модели. Согласование возбуждающего устройства необходимо для того, чтобы оно не оказывало существенного влияния. Был достигнут уровень КСВН 1,08-1,14 в диапазоне частот 2,6-3,1ГГц.

При измерениях на модели 1 применялась следующая методика. Сначала, в соответствии с техническим описанием, проводилась калибровка прибора Р2-53. Затем измерялся КСВН на входе 1 модели (схема, показанная пунктиром на рисунке 1) далее измерялось переходное ослабление между входами 1 и 3 модели (схема, показанная сплошными линиями на рисунке 1). Для измерения переходного ослабления между плечами 1 и 2 модели элементы, подключенные ранее к плечу 2 (СН1) и плечу 3 (КВП, НО, СН2) менялись местами.

Схема измерительного стенда для второй модели представлена на рисунках 2, 3.

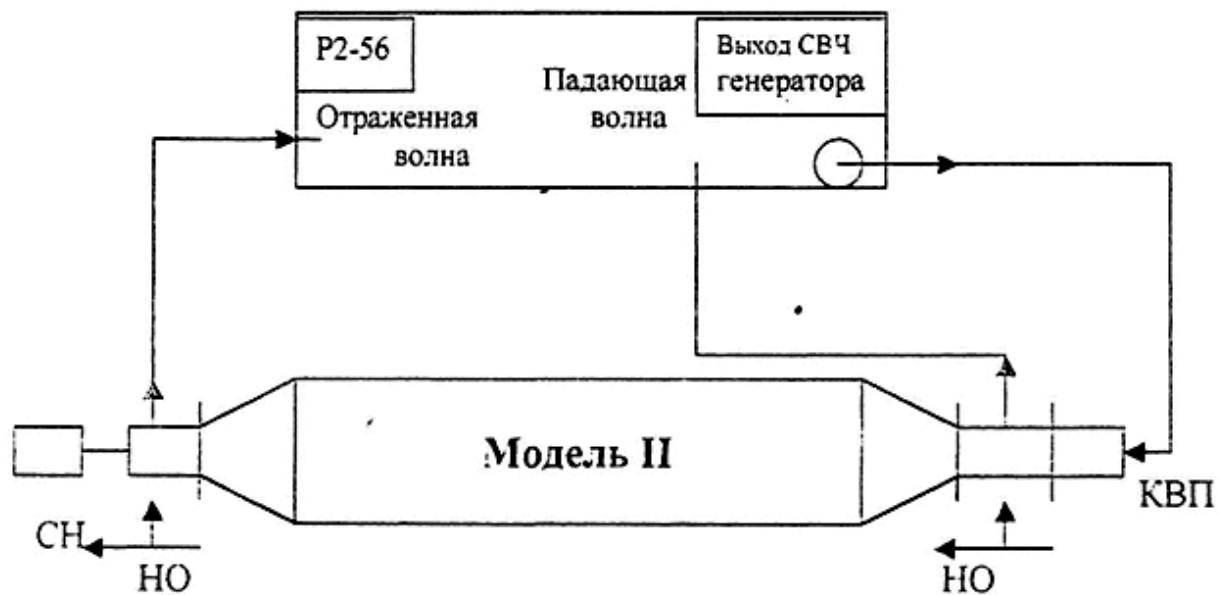


Рис. 2. – Схема измерительного стенда второй модели. Измерение коэффициента стоячей волны

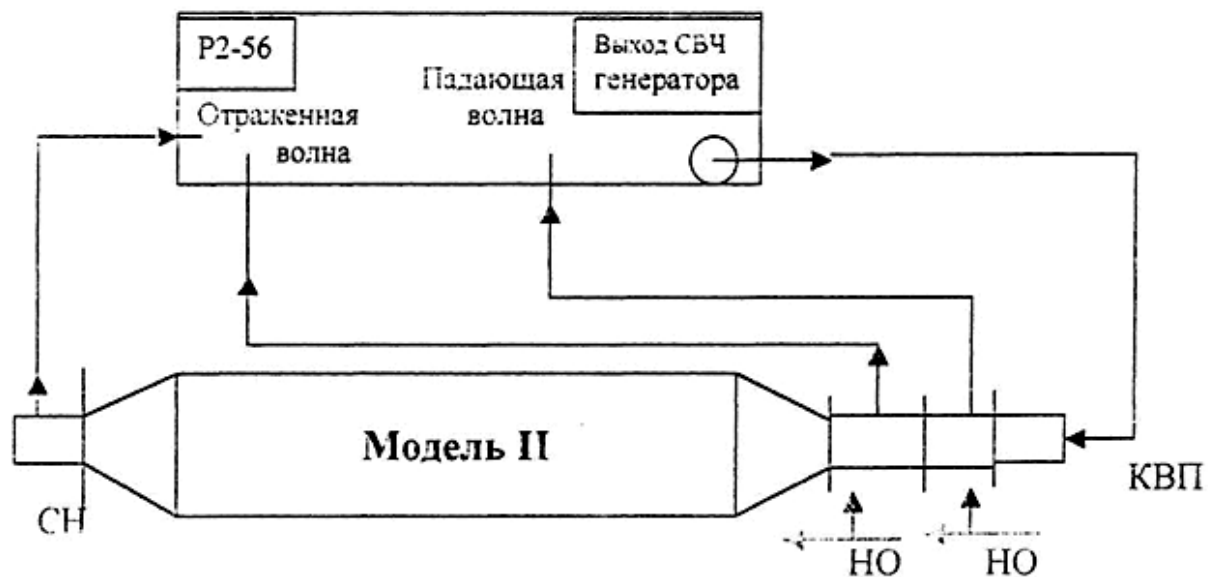


Рис. 3. – Схема измерительного стенда второй модели. Измерение переходного сопротивления

Измерение КСВН производится по схеме рисунка 2, а измерение ослабления – по схеме рисунка 3.

Стенд содержит:

- модель 2, моделирующую входное (или выходное) устройство установки;
- панорамный измеритель КСВН и ослабление P2-56, волноводного типа, работающий в диапазоне частот 2-4 ГГц;
- направленные ответвители (НО) 2 шт. волноводного типа с сечением тракта 72x34 мм из комплекта P2-56;
- коаксиально-волноводный переход (КВП) с сечением волноводного тракта 72x34 мм из комплекта P2-56;
- волноводную согласованную нагрузку (СН) с КСВН 1,08 из комплекта P2-56.

Целью экспериментов на модели 1 являлось определение части СВЧ энергии, попадающей во входное и выходное устройства установки, или, иначе, определение переходного ослабления из плеча 1 модели в плече 2 и 3.

Переходное ослабление  $V_{12}$  и  $V_{13}$  между первым и вторым и между первым и третьим плечами модели, а также КСВН на входе I были измерены при следующих условиях:

- 1) камера не содержит обрабатываемого материала;
- 2) камера, входное и выходное устройства частично заполнены слоем сухого (влажность 4%) обрабатываемого материала толщиной 20 мм, что соответствует в реальных условиях толщине кирпича 60 мм;
- 3) камера, входное и выходное устройства заполнены таким же, как и в пункте 2 слоем влажного (влажность 14%) обрабатываемого материала.

Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица № 1

Результаты измерений (модель 1)

---

Условия измерений	КСВН	Мощность потерь в камере, %	$V_{12}$ , дБ	$V_{13}$ , дБ
1	50,0	0	-19	-19
2	22,0	18	-25,5	-28,5
3	15,0	23,5	-31,5	-31,5

Большие значения КСВН, полученные при частичном заполнении камеры, входного и выходного устройств слоем глины, обусловлены малой длиной камеры в модели [7,8]. Измеренные значения КСВН позволило рассчитать относительную мощность потерь в камере и коэффициент затухания для волны, распространяющейся в камере. При данной связи поля в камере с обрабатываемым материалом, которая определяется расстоянием между внутренним проводником камеры и поверхностью обрабатываемого материала, получены следующие значения коэффициента затухания в реальной установке:

- при влажности глины 4% коэффициент затухания составляет 2,15дБ/м;
- при влажности глины 14% коэффициент затухания составляет 3,36 дБ/м.

Полученные величины коэффициента затухания показывают, что на 4-х метрах длины реальной установки в сухом кирпиче можно поглотиться 50% подаваемой энергии, а во влажном кирпиче – 59%. В реальной установке имеется возможность увеличения коэффициента затухания, а, следовательно, и поглощаемой мощности, за счет увеличения связи поля с обрабатываемым материалом [9,10]. Это достигается опусканием внутреннего проводника камеры.

Из результатов измерений следует, что с увеличением потерь в камере переходные ослабления  $V_{12}$  и  $V_{13}$  увеличиваются за счет потерь в обрабатываемом материале. Однако, следует иметь в виду, что слой обрабатываемого материала, который продолжается и во входном

устройстве, может концентрировать в себе энергию электромагнитного поля аналогично тому, как это происходит в диэлектрическом волноводе. Этот эффект уменьшает переходное ослабление, причем тем в большей степени, чем больше связь между полем в камере и обрабатываемым материалом и чем больше влажность обрабатываемого материала (из-за роста  $\varepsilon$ ). Поэтому, учитывая указанные выше два фактора: увеличивающий и уменьшающий коэффициент переходного ослабления, вероятно, нижней границей величин переходного ослабления следует считать его величину для пустой камеры, т.е. - 19 дБ.

Целью экспериментов на модели 2 являлось:

- определение ослабления во входных и выходных устройствах установки без элементов защиты;
- определение ослабления во входных и выходных устройствах установки с различными элементами защиты;
- выбор элементов защиты, обеспечивающих наибольшее ослабление.

Для определения ослабления во входных устройствах установки в модель 2 на слой пенопласта помещается слой глины толщиной 20 мм, соответствующей 60 мм толщине кирпича в реальной установке и вырезанный из кирпича-сырца. Длина слоя составляет 500 мм, что соответствует длине входных и выходных устройств реальной установки 1,5м. Измерения ослабления проводились на материале с различной влажностью от 4% до 20%. Результаты измерения представлены в таблице 2.

Таблица № 2

Результаты измерений (модель 2)

Влажность, %	4	6	10	16	20
Ослабление, дБ	-6,1	-6,8	-7	-18,4	-21,0

Полученные результаты показывают, что без элементов защиты обеспечить требуемое ослабление невозможно.

Элементы защиты от вредного излучения, вводимые в входное и выходное устройства, по принципу действия можно разделить на поглощающее и отражающие. Поэтому сначала были проведены эксперименты отдельно с поглощающими элементами, а затем с отражающими.

Элемент поглощения представлял собой стеклянную трубку с внутренним диаметром 50мм (или несколько трубок меньшего диаметра), заполненную водой, эта трубка укладывалась на слой глины вдоль волновода модели. После чего измерялось ослабление в волноводном тракте. Для трубы с водой диаметром 50 мм =500 мм, расположенной на поверхности глины с влажностью 4% получена величина ослабления - 25 дБ, а для глины с влажностью 16% - -23,5 дБ.

Также проведены измерения ослабления при изменении расстояния  $d$  от поверхности глины до поверхности поглотителя (между ними вставлялись прокладкой из пенопласта соответствующей толщины). Поглотитель в этом случае представлял собой четыре трубки диаметром 10мм длиной 200 мм, уложенные в ряд по ширине волновода и заполненные водой. Результаты измерений приведены в таблице 3.

Таблица № 3

Результаты измерений (модель 2)

Расстояние, см	0	1	2	4	5
Ослабление, дБ	-22,6	-22,2	-24,2	-19,2	-15,5

Как следует из таблицы 3 существует толщина воздушной прослойки между обрабатываемым материалом и поглотителем, при которой ослабление в тракте максимальное ( $d=2\text{см}$ ).

Однако, введение даже такого хорошего поглотителя СВЧ излучения, каким является вода, хотя и увеличивает ослабление, но все же недостаточно для решения поставленной задачи. Вероятно, малое увеличение ослабления



обусловлено тем, что слой глины представляет собой диэлектрический волновод, поле вне которого мало (прижато к поверхности глины) и, следовательно, в поглотитель попадает незначительная часть СВЧ энергии.

Элементы защиты от вредного излучения, действующие на принципе отражения, представляют собой тонкие металлические пластины, частично перекрывающие поперечное сечение тракта.

Таблица №4

Зависимость перегородки слоя сверху от влажности глины

Влажность слоя глины, %	Ослабление с перегородкой, дБ	Ослабление без перегородки, дБ
10	-18,3	-7,7
16	-24,0	-18,4
20	-21,0	-21,0

Данные таблицы 4, показывают, что влияние перегородки сверху слоя зависит от влажности глины. При большой влажности перегородка практически не оказывает влияния на ослабление, что говорит о том, что поле почти полностью сосредоточено внутри слоя глины. С уменьшением влажности влияние перегородки на ослабление возрастает, но полное ослабление превышает - 24 дБ. Очевидно, что перегородка, поставленная снизу слоя, будет оказывать аналогичное влияние на величину ослабления.

Лучшие результаты дает перегородка, состоящая из двух металлических пластин, перекрывающих тракт как сверху, так и снизу слоя глины. Так, при влажности глины 4% полное ослабление равнялось - 14,4 дБ (-6,1 дБ без перегородки), а при влажности 16% -35дБ (-18,4 дБ без перегородки). Таким образом, в этом случае наблюдается увеличение ослабления приблизительно только в два раза по сравнению со случаем без перегородки как для сухой, так и для влажной глины, но величина ослабления недостаточна.

Далее для увеличения ослабления в модели 2 были созданы два, следующих друг за другом резонатора. Но ослабление в этом случае

увеличилось незначительно по сравнению с одним резонатором. Очевидно, что два резонатора расстраиваются из-за взаимного влияния друг на друга. Поэтому предлагается в реальной установке между этими двумя резонаторами разместить участок волновода нерезонансной длины с поглотителем, который устранил связь между резонаторами. Тогда можно ожидать, что ослабление, создаваемое двумя резонаторами, будет в два раза больше, чем ослабление, обеспечиваемое одним резонатором, и составит от -60 дБ до -90 дБ в зависимости от влажности кирпича. Заметим, что на расстоянии 1,5 м (длина входного и выходного устройств), можно разместить оба резонатора и нерезонансный участок между ними.

Из результатов экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:

- нижняя граница переходного ослабления от СВЧ входа установки к устройствам ввода и вывода обрабатываемого материала порядка -19дБ;
  - наибольшее ослабление в устройствах ввода и вывода обрабатываемого материала наблюдается при образовании в них резонаторов;
  - при использовании двух резонаторов с поглощающим нерезонансным промежутком между ними возможно получение ослабления от -60дБ до -90 дБ;
  - общее ослабление от СВЧ входа установки до выхода и выходного отверстий устройств ввода и вывода может составить от -79 дБ до -109дБ, что удовлетворит поставленным требованиям;
  - в конструкции входного и выходного устройств установки следует предусмотреть отверстия для установки элементов защиты от вредного излучения - металлических перегородок - как сверху слоя обрабатываемого материала, так и снизу, между керамическими роликами транспортера. Также
-

следует предусмотреть изменения положения перегородок для настройки на максимум ослабления;

- в качестве поглотителя в нерезонансном участке устройств ввода и вывода на низкотемпературном конце можно использовать радиопрозрачный резервуар с водой, а на высокотемпературном конце - железорудные окатыши, насыпанные в керамические трубы.

### Литература

1. Морозов Г.А., Морозов О.Г., Седельников Ю.Е., Стахова Н.Е., Степанов В.В Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации). М.: Библиотека журнала «Антенны», 2003. 112 с.
2. Morozov G.A., Chetverikov A.P., Yakunin A.N., Yavchunovsky V.V. Mathematical modeling of the uhf heating of water oil emulsions // 5th International conference on antenna theory and techniques, Kiev. 2005. pp. 99-104.
3. Морозов Г.А. Микроволновые технологии – новое направление энергосбережения // Научно-технический и общественно-информационный журнал «Энергосбережение в Республике Татарстан». 2002. №3-4 (8-9). С. 52-54.
4. Морозов Г.А., Анфиногентов В.И., Гараев Т.К. Оптимизация процесса микроволнового нагрева диэлектрика // 12-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КРЫМиКо): Севастополь: Вебер, 2002. №3-4 (9-10). С. 138-140.
5. Кузьмин К.А., Максаков С.А. Имитационное моделирование автоматизированной системы охлаждения испытательного стенда // Научное и образовательное пространство: перспективы развития Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. 2017. С. 238-243.
6. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. М.: Лань, 2004. 704 с.
7. Веденькин Д.А., Фаизов И.И. Исследование процессов переработки плотного битумизированного нефтешлама с использованием СВЧ-энергии //



Инженерный вестник Дона, 2016, №2 URL:  
ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3636/.

8. Григорьев А.Д., Иванов В.А., Молоковский С.И. Электродинамика и микроволновая техника. М.: Лань, 2016. 497 с.

9. Шушкевич Т. В. Программный расчет неопределенности результатов измерений // Инженерный вестник Дона, 2016, №4 URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3806/.

10. Morozov G.A., Anfinogentov V.I., Galimov M.R., Morozov O.G. The modeling of electrodynamics and thermodynamics processes while electromagnetic field and dielectric interaction // 5th International conference on antenna theory and techniques, Kiev. 2005. pp. 491-493.

### References

1. Morozov G.A., Morozov O.G., Sedel'nikov Ju.E., Stahova N.E., Stepanov V.V. Nizkointensivnye SVCh-tehnologii (problemy i realizacii). [Low-intensity microwave technologies (problems and implementations)]. М.: Библиотека журнала «Antenny», 2003. 112 p.

2. Morozov G.A., Chetverikov A.P., Yakunin A.N., Yavchunovsky V.V. 5th International conference on antenna theory and techniques, Kiev. 2005. pp. 99-104.

3. Morozov G.A. Nauchno-tehnicheskij i obshhestvenno informacionnyj zhurnal «Jenergoberezhenie v Respublike Tatarstan». 2002. №3-4 (8-9). pp. 52-54.

4. Morozov G.A., Anfinogentov V.I., Garaev T.K. 12 ja Mezhdunarodnaja Krymskaja konferencija «SVCh tehnika i telekommunikacionnye tehnologii (KRYMiKo): Sevastopol': Veber, 2002. №3-4 (9-10). pp. 138-140.

5. Kuz'min K.A., Maksakov S.A. Nauchnoe i obrazovatel'noe prostranstvo: perspektivy razvitija Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. 2017. pp. 238-243.
6. Grigor'ev A.D. Elektrodinamika i tekhnika SVCH. [Electrodynamics and microwave technology]. M.: Lan', 2004. 704 p.
7. Veden'kin D.A., Faizov I.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №2 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3636/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3636/).
8. Grigor'ev A.D., Ivanov V.A., Molokovskij S.I. Elektrodinamika i mikrovolnovaya tekhnika. [Electrodynamics and microwave technology]. M.: Lan', 2016, 497 p.
9. Shushkevich T. V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3806/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3806/).
10. Morozov G.A., Anfinogentov V.I., Galimov M.R., Morozov O.G. 5th International conference on antenna theory and techniques, Kiev. 2005. pp. 491-493.