

**Всероссийское СМИ**

**«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»**

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

*Овчинников Д.А. Повышение эффективности излучения частотно-независимых антенн // Материалы по итогам VI –ой Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы современности: взгляд молодых исследователей», 10 – 20 мая 2018 г. – 0,4 п. л. – URL: [http://akademnova.ru/publications\\_on\\_the\\_results\\_of\\_the\\_conferences](http://akademnova.ru/publications_on_the_results_of_the_conferences)*

### **СЕКЦИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Д.А. Овчинников**

**Студент 2-го курса аспирантуры**

**УрТИСИ СибГУТИ**

**Научный руководитель: С.А. Баранов, к.т.н, доцент**

**г. Екатеринбург, Свердловская область,**

**Российская Федерация**

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТОТНО- НЕЗАВИСИМЫХ АНТЕНН**

Для повышения эффективности излучения антенн в заданном направлении, а также для решения вопросов электромагнитной совместимости и снижения уровня обратного излучения антенны широко применяются рефлекторы.

Наиболее эффективно использовать сплошной лист токопроводящего материала в качестве отражающей поверхности. Размеры рефлектора должны превышать размер антенны. Причем уровень обратного излучения, а значит и отражательные свойства рефлектора будут повышаться с ростом проводимости материала и увеличением толщины экрана. В теории это означает, что идеальным рефлектором будет являться толстый цельнометаллический лист меди (серебра) бесконечно большого размера. На

практике это условие невыполнимо, поэтому приходится идти на компромиссы при проектировании рефлекторов.

Для уменьшения массы и снижения парусности рефлекторы часто выполняют в виде сетки, при этом размер ячейки должен быть значительно меньше длины волны.

Одним из часто используемых видов частотно-независимых являются спиральные антенны. В спиральной антенне излучает область вблизи витка, соразмерного с длиной волны. При несоблюдении этого условия, эффективность излучения резко падает. Эта особенность позволяет проектировать сверхширокополосные антенны за счет применения в составе одной антенны витков переменной длины. Наиболее простой в практической реализации антенной можно назвать спираль Архимеда.

В программе MMANA-GAL basic v. 3.0.0.31 было проведено моделирование спирали Архимеда для частот от 40 МГц до 85 МГц. Неширокая полоса частот выбрана для ускорения времени просчета параметров антенны и сокращения трудозатрат на построение новой модели.

Одним из вопросов, возникающих при проектировании антенны, является выбор частоты намотки витков. Для исследования влияния количества витков спирали на характеристики антенны было построено три модели с фиксированным отношением толщины провода и расстоянием между витками. Условием устойчивого возбуждения антенны во всей полосе частот служат самодополняющие структуры. На практике это означает, что диаметр проводника и расстояние между соседними витками должны быть соизмеримы между собой.

**Всероссийское СМИ**

**«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»**

Свидетельство о регистрации ЭЛ №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

В программе установлены параметры идеальной земли, высота витков над землей (рефлектором) зафиксирована на отметке  $0,13\lambda$ .  $0,13\lambda$  выбрана в качестве оптимальной высоты подвеса антенны для создания условий формирования круговой поляризации. Построены три различных модели:

- антенна из 8 витков. Диаметр провода 17,5 мм, расстояние между витками 17,5 мм, если измерять по краям. Или, если измерять от центров проводников – 35 мм;
- антенна из 4 витков. Диаметр провода 35мм, расстояние между витками 35мм если измерять по краям. Или, если измерять от центров проводников – 70 мм;
- антенна из 2 витков. Диаметр провода 70 мм, расстояние между витками 70 мм, если измерять по краям. Или, если измерять от центров проводников – 140 мм.

Четырехвитковая модель антенны изображена на рисунке 1.

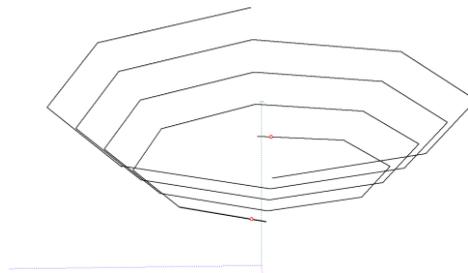


Рисунок 1 – Модель антенны, состоящая из 4 витков.

Исследования проведены на частотах 40МГц, 50,5МГц, 61МГц, 71,5 МГц и 82МГц. Часть выбранных частот укладывается ровно в размер витков, другая часть излучается за счет сложения излучения соседних витков наиболее близких к рабочей длине волны. Решено рассматривать параметры входного сопротивления антенны ( $Z_{вх}$ ), для оценки возможности согласования

## Всероссийское СМИ

### «Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации ЭЛ №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

антенны с фидером; коэффициента усиления (КУ) антенны, для оценки эффективности излучения; коэффициент эллиптичности – параметр, который характеризует отношение излучения антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Спиральные антенны должны излучать волны круговой поляризации, т.е. коэффициент эллиптичности равен 1. В данном случае, задача достижения идеальной круговой поляризации не стоит, поэтому внимание стоит обращать не на абсолютное значение, а на его стабильность во всей полосе частот. Для удобства, результаты моделирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Влияние количества витков на характеристики антенны.

Частота	Количество витков:	Z вх	КУ, дБ	Коэффициент эллиптичности
40 МГц	8	0,1-j2814 Ом	4,5	1,073
	4	0-j1445 Ом	4,0	1,000
	2	0,1-j733 Ом	8,7	1,75
50,5 МГц	8	0-j2324 Ом	5,6	1,076
	4	10-j849 Ом	5,0	2,454
	2	0,3-j558 Ом	8,8	1,705

Продолжение таблицы 1.

Частота	Количество витков:	Z вх	КУ, дБ	Коэффициент эллиптичности
61 МГц	8	0,5-j1991 Ом	6,3	1,285
	4	385,6-j2627 Ом	8,3	1,607
	2	5,3-j409 Ом	8,9	1,735
71,5 МГц	8	9,9-j1725 Ом	8,9	1,500
	4	2,9-j848 Ом	8,7	1,593

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации ЭЛ №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

	2	310,1-j748 Ом	9,0	1,714
82 МГц	8	31,2-j1468 Ом	9,3	1,529
	4	10,7-j673 Ом	9,0	1,764
	2	15,5-j409 Ом	9,0	1,694

Пример диаграммы направленности антенны приведен на рисунке 2.

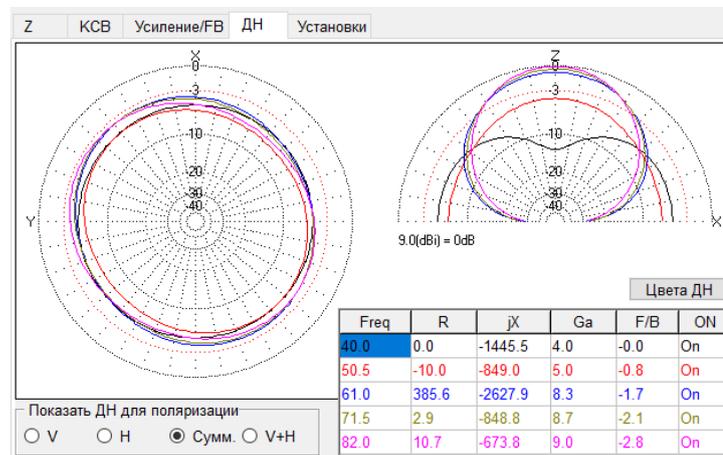


Рисунок 2 – Диаграмма направленности антенны из 4 витков в исследуемой полосе частот.

Наиболее стабильные характеристики во всей полосе частот наблюдаются у двухвитковой модели. Да, коэффициент эллиптичности у нее выше, но при этом он сохраняет стабильность и варьируется около 1,7. Входное сопротивление также обладает большей стабильностью, а значит легче обеспечить согласование антенны с фидером. Для проведения дальнейшего моделирования была использована модель из 2 витков.

Следующим шагом необходимо определить диаметр проводника D из которого будет изготавливаться антенна. Диаметр провода изменяется в

диапазоне 35мм-125мм. В соответствии с этим будет изменяться расстояние между проводами.

Моделирование показало, что диаметр проводника не оказывает влияния на коэффициент эллиптичности и КУ. В то же время, при изменении диаметра провода сильно изменяется входное сопротивление антенны. Это обусловлено тем, что изменяются параметры емкости и индуктивности антенны. Согласно результатам моделирования использование толстого провода предпочтительнее, но с учетом увеличения общей массы антенны с точки зрения оптимизации массогабаритных характеристик нецелесообразно. Таким образом, для получения наиболее стабильных параметров спирали Архимеда следует ограничиться малым количеством витков при максимально возможной толщине используемого проводника.

Так как при моделировании использовалась идеальная земля, полезно будет оценить изменения, которые могут возникнуть при переходе к использованию не идеального рефлектора конечных размеров. А именно рефлектора в виде сетки.

Для оценки коэффициента прохождения волны сквозь рефлектор можно воспользоваться формулой:

$$p = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\lambda}{2 \times b \times \log_{10}\left(\frac{b}{\pi \times d}\right)}}} \quad (1)$$

Где,  $p$  – коэффициент прохождения волны, показывает процент энергии, ушедшей за рефлектор;

$d$  – диаметр провода;

$b$  – размер ячейки рефлектора;

$\lambda$  – длина волны.

Рефлектор в виде решетки приведен на рисунке 3.

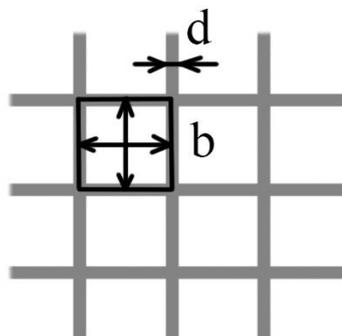


Рисунок 3 – Модель рефлектора в виде решетки.

По анализу формулы была произведена оценка влияния толщины провода на коэффициент прохождения волны. В данном случае внимание уделено именно толщине провода при фиксированном расстоянии между проводами. Графическое пояснение приведено на рисунке 4.

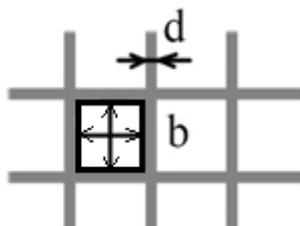


Рисунок 4 – Пример измерения расстояния  $b$  и  $d$ .

Для этого в формуле совместно с увеличением  $d$  будет возрастать и размер  $b$ . Математически это выглядит так:  $b=x+d$ , где  $x$  фиксированный размер ячейки.

Размер ячейки должен быть много меньше длины волны, длина волны для частоты 82 МГц составляет 3.6 метра, ячейка принята равной 36см или 360мм. Диаметр провода изменялся от 1мм до 40мм. Полученные значения сведены в таблицу 2.

## Всероссийское СМИ

### «Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации ЭЛ №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

Таблица 2 – Влияние диаметра провода на коэффициент прохождения волны, при  $b=360$ мм.

$d, \text{ мм}$	1	2	3	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
$p, \%$	53,8	50,8	48,9	47,5	43,6	41	39	37,4	36	34,7	33,5	32,5	31,5

В данном случае оптимальная толщина будет составлять от 1мм до 4 мм, в дальнейшем рост эффективности падает, в то время как вес конструкции экспоненциально возрастает.

Для проверки корректности полученных результатов проведены расчеты еще для двух значений:  $b=540$ мм и  $b=180$ мм. Результаты представлены в таблицах 3 и 4 соответственно.

Таблица 3 – Влияние диаметра провода на коэффициент прохождения волны, при  $b=540$ мм.

$d, \text{ мм}$	1	2	3	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
$p, \%$	63,1	60,4	58,6	57,2	53,5	51	49,1	47,5	46,1	44,8	43,7	42,7	41,7

Таблица 4 – Влияние диаметра провода на коэффициент прохождения волны, при  $b=180$ мм.

$d, \text{ мм}$	1	2	3	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
$p, \%$	38,5	35,6	33,8	32,4	28,7	26,3	24,4	22,8	21,5	20,2	19	17,9	16,9

Для упрощения анализа по результатам расчетов построены графики влияния диаметре провода решетки на коэффициент пропускания волны (рисунок 5)

## Всероссийское СМИ

### «Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации ЭЛ №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

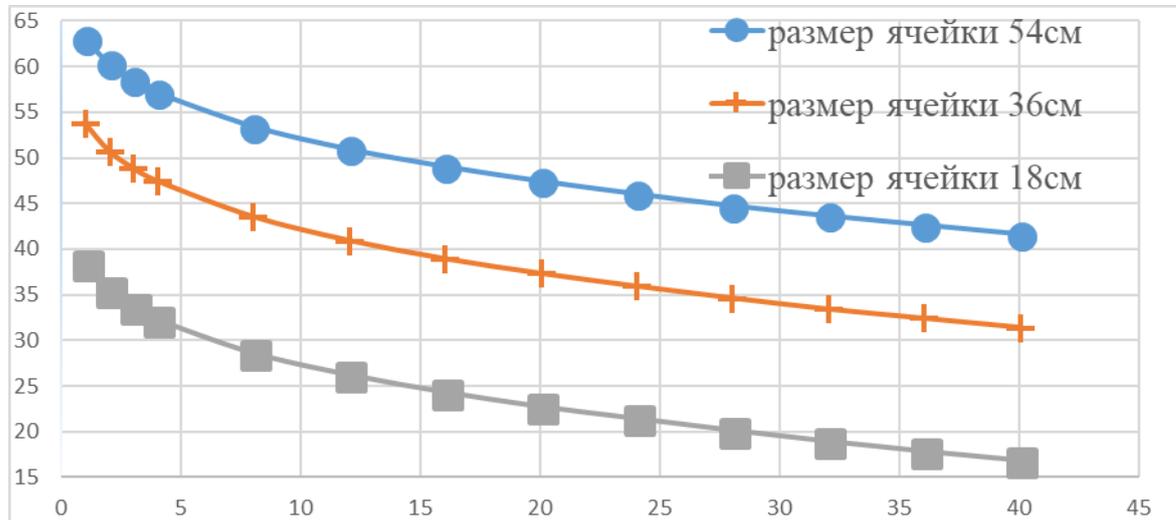


Рисунок 4 - влияние диаметра провода на коэффициент прохождения волны: по оси  $Ox$  диаметр проводника, по оси  $Oy$  – коэффициент прохождения.

Анализ графиков показывает: чем толще проводник, тем выше эффективность экрана при прочих равных условиях. Тем не менее, при изменении толщины проводника в 40 раз, эффективность экрана повышается менее чем на 25%. Значительно эффективнее уменьшать размер ячейки. Так, уменьшение ячейки с 36 см до 18 см, то есть в два раза, дает выигрыш в эффективности более чем на 25%.

Таким образом, чем меньше ячейка и чем больше диаметр проводника, тем экран больше напоминает сплошную структуру и тем выше его эффективность. Но уменьшение ячейки наряду с увеличением сечения проводника нецелесообразно в виду роста парусности и массы конструкции.

Чтобы узнать, как изменяется вес рефлектора от его конструктива были произведены дальнейшие исследования. Для исследования принято, что будет использоваться сплошной медный проводник круглого сечения.

Удельный вес материала составляет 8,92г/см<sup>3</sup>. Размер экрана будет составлять 3.6м x 3.6м.

Для расчета можно воспользоваться рядом простых формул.

Количество проводников в экране:

$$n = \left( \frac{a}{b+d} + 1 \right) \times 2 \quad (2)$$

где,  $n$  – количество проводников в экране

$a$  – размер стороны экрана;

$b$  – шаг сетки;

$d$  – диаметр проводника. Умножение на 2 необходимо для того, чтобы учесть проводники по второй стороне (ячейки квадратные).

Зная количество проводников, можно рассчитать их общую длину:

$$l = n \times a \quad (3)$$

где,  $l$  – сумма длин всех проводников.

Вес конструкции определяется по формуле:

$$m = \pi \times r^2 \times l \times \rho \quad (4)$$

где,  $m$  – масса экрана;

$r$  – радиус проводника;

$\rho$  - удельный вес проводника.

Для удобства полученные результаты представлены в таблицах 5–7.

Таблица 5 – вес экрана в зависимости от сечения провода при шаге  $b=360$ мм.

$d$ , мм	1	2	3	4	8
$m$ , кг	0,55	2,21	4,95	8,78	34,83

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

Таблица 6 – вес экрана в зависимости от сечения провода при шаге b=540мм.

d, мм	1	2	3	4	8
m, кг	0,38	1,54	3,46	6,14	24,43

Таблица 7 – вес экрана в зависимости от сечения провода при шаге b=180мм.

d, мм	1	2	3	4	8
m, кг	1.05	4.19	9.38	16.59	65.04

Для дальнейшего анализа построен график (рисунок 5).

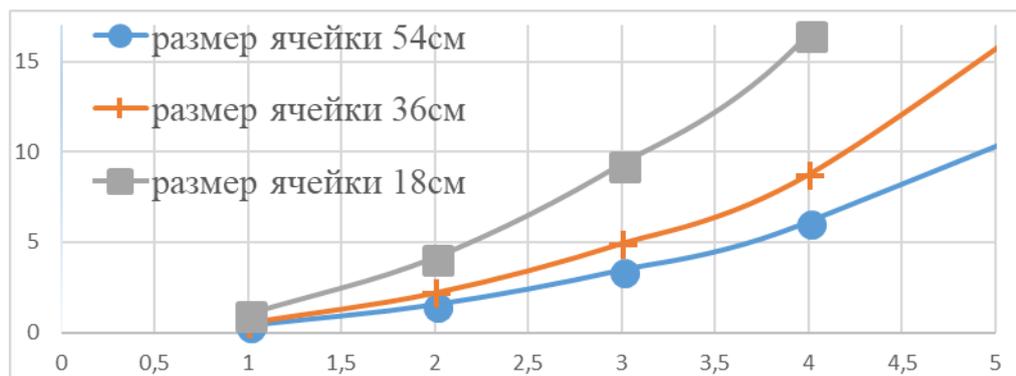


Рисунок 5 - вес экрана в зависимости от сечения провода: по оси OX - диаметр проводника, по оси OY – масса экрана, кг.

Наблюдается экспоненциальный рост массы экрана при линейном увеличении сечения проводника. Наиболее эффективный с точки зрения отражения экран, является наиболее тяжелым. Но большие массы снижают мобильность, повышаются требования к прочности креплений экрана, а из-за увеличения площади материала возрастают ветровые нагрузки. Все это негативно сказывается на сложности конструкции и возможностях ее применения. Поэтому необходимо найти оптимальные значения эффективности отражения/масса экрана. Для этого воспользуемся формулой:

$$Q = \frac{1 - P/100}{m} \quad (5)$$

## Всероссийское СМИ

### «Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации ЭЛ №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

где,  $Q$  – коэффициент эффективности экрана на 1 кг массы.

Полученные результаты представлены в таблицах 8–10.

Таблица 8 – коэффициент эффективности экрана на 1 кг массы в зависимости от сечения провода при шаге  $b=360$ мм

$d$ , мм	1	2	3	4	8
$Q$	0,84	0,22	0,10	0,05	0,016

Таблица 9 – коэффициент эффективности экрана на 1 кг массы в зависимости от сечения провода при шаге  $b=540$ мм

$d$ , мм	1	2	3	4	8
$Q$	0,97	0,25	0,11	0,06	0,01

Таблица 10 – коэффициент эффективности экрана на 1 кг массы в зависимости от сечения провода при шаге  $b=180$ мм

$d$ , мм	1	2	3	4	8
$Q$	0,58	0,15	0,07	0,04	0,01

Для дальнейшего анализа построен график (рисунок 6).

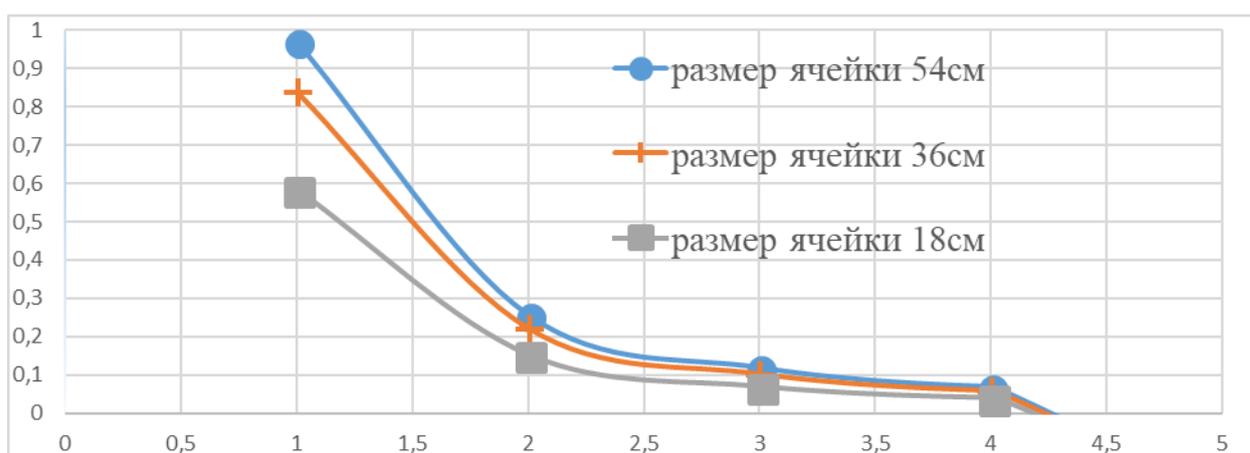


Рисунок 6 – коэффициент эффективности экрана на 1 кг массы в зависимости от сечения провода: по оси  $OX$  – диаметр проводника, по оси  $OY$  – коэффициент эффективности.

Наибольшую эффективность демонстрирует экран с диаметром проводника 1мм и размером ячейки 54см. Данный показатель обусловлен минимальной массой. Вызывают интерес следующие за ней точки на графике: дальнейшие изменения конструкции экрана с точки зрения эффективности рефлектора по отношению к его массе мало отличаются друг от друга.

Следующий шаг – исследование размера ячейки при фиксированном диаметре проводника. Диаметр проводника следует взять равным 1 мм, так как именно он демонстрирует наибольшую эффективность и целесообразность применения. Полученные результаты представлены в таблице 11.

Таблица 11 – влияние размера ячейки на коэффициент прохождения волны при фиксированном диаметре проводника.

$b$ , мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500
$p$ , %	5	9	12	15	17	20	22	24	26	27	40	49	56	62

Для дальнейшего анализа построен график (рисунок 7).

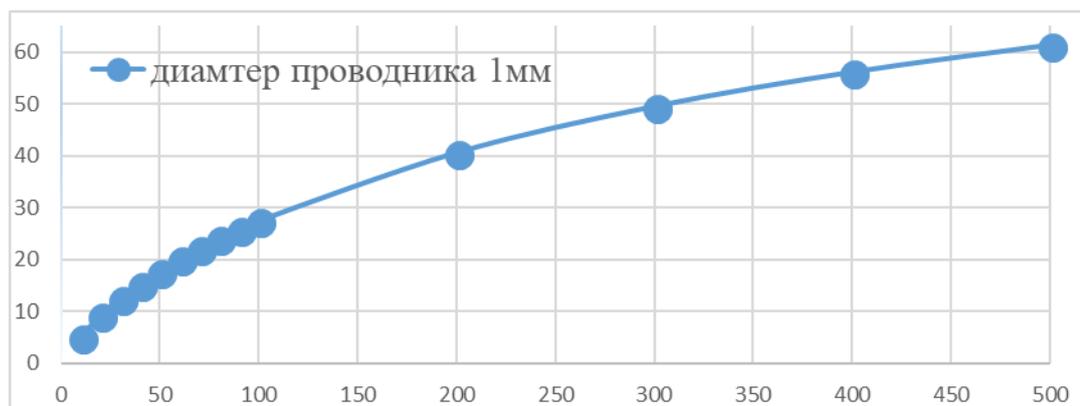


Рисунок 7 – влияние размера ячейки на коэффициент прохождения волны при фиксированном диаметре проводника: по оси  $Ox$  – размер ячейки, по оси  $Oy$  – коэффициент прохождения.

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации ЭЛ №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

При увеличении размера ячейки с 10мм до 100мм потери увеличиваются чуть более чем в 5 раз, с 5% до 27%. При увеличении с 10мм до 200мм, уже в 8 раз, с 10мм до 300мм в 10раз. Далее потери продолжают уменьшаться, но значительно медленнее.

Рассчитаем массогабаритные параметры экрана (таблица и построим график эффективности. Результаты представлены в таблицах 12–13.

Таблица 12 – вес экрана в зависимости от размера ячейки при  $d=1\text{мм}$

В мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500
m, кг	16.55	8.69	5.91	4.47	3.61	3.02	2.6	2.29	2.04	1.84	0.95	0.65	0.50	0.41

Таблица 13 – коэффициент эффективности экрана на 1 кг массы в зависимости от размера ячейки при  $d=1\text{мм}$

В мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500
Q														

Для дальнейшего анализа построен график (рисунок 8).

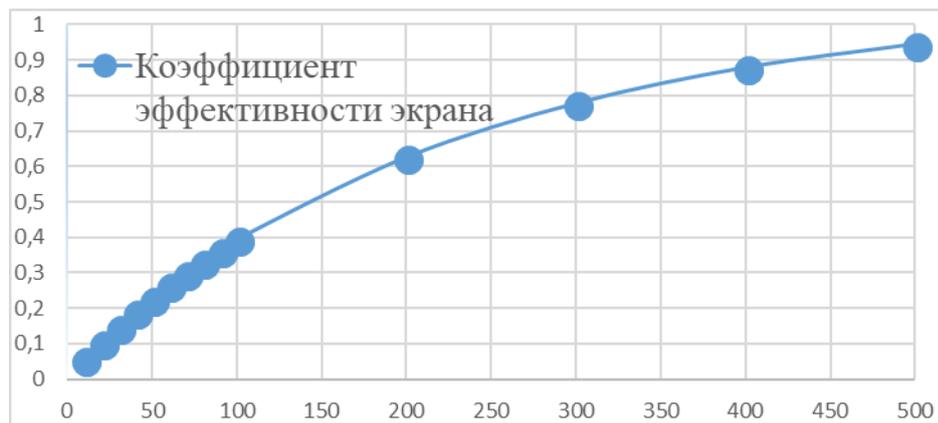


Рисунок 8 - коэффициент эффективности экрана на 1 кг массы в зависимости от размера ячейки: по оси  $Ox$  – размер ячейки, по оси  $Oy$  – коэффициент эффективности.

С точки зрения массы наиболее эффективными будут являться крупные ячейки, так для частоты 82 МГц оптимальный размер ячейки будет составлять 500 мм.

Для оценки искажения ДН проведено моделирование антенны с экраном в виде сетки с ячейками 500 мм – наиболее оптимальными с точки зрения веса и 100мм в программе MMANA, искажение ДН можно оценить относительно ДН вблизи идеальной земли. Полученные графики представлены на рисунках 9 и 10. Рисунок 11 иллюстрирует спираль над экраном размером 4х4 метра и величиной ячейки 500мм.

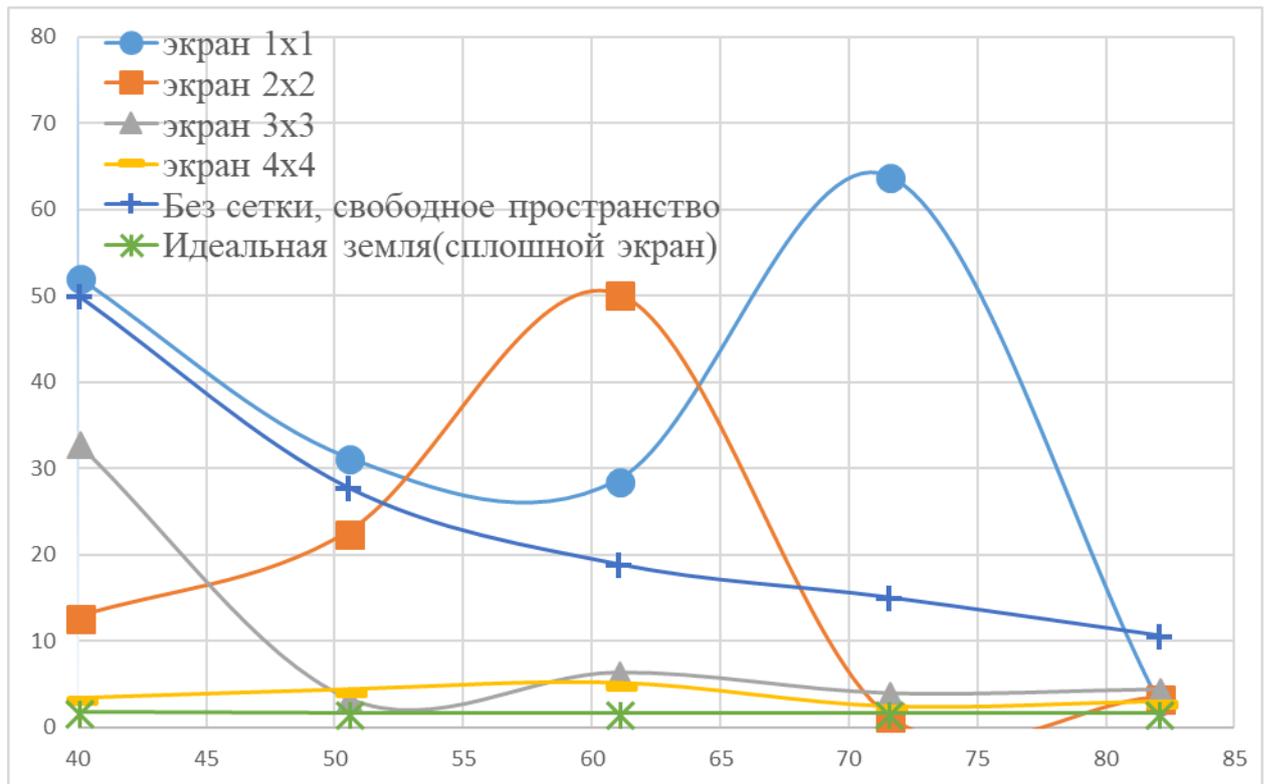


Рисунок 9 – Коэффициент поляризации антенны для рефлектора с размером ячейки 500мм. По оси OX – частота излучения, OY – коэффициент эллиптичности.

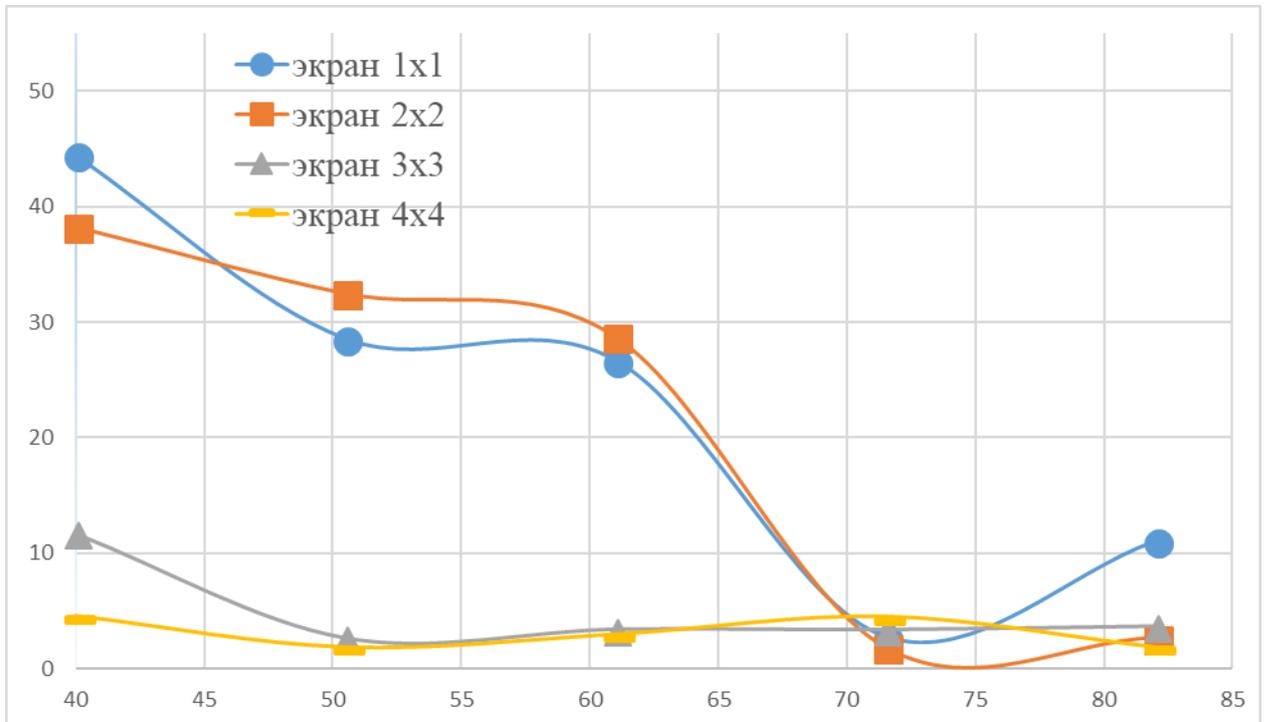


Рисунок 9 – Коэффициент поляризации антенны для рефлектора с размером ячейки 100мм. По оси OX – частота излучения, OY – коэффициент эллиптичности.

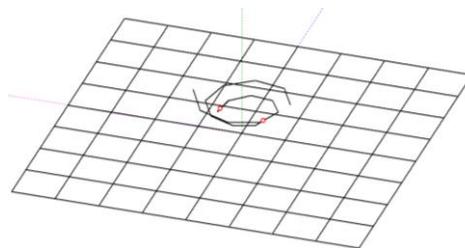


Рисунок 11 – Спираль над рефлектором.

Размер экрана примем в 2 раза больше длины волны. В дальнейшем будем уменьшать его размер, для оценки влияния размера отражающей поверхности.

Анализ графиков показывает, что экраны малых размеров являются частотно зависимыми и не могут продемонстрировать стабильных параметров

поляризации. Рефлектор размером 4х4 метра практически полностью повторяет форму кривой идеальной земли. Размер ячейки не оказывает влияния на коэффициент эллиптичности. Таким образом, размеры рефлектора должны быть соизмеримы с длиной волны.

Так как, от размера ячейки рефлектора сильно зависит процент отраженных волн, то изменяя форму ячеек (рисунок 7) можно добиться улучшения поляризационных характеристик. Так, изменив форму ячеек с квадратной на прямоугольную на частоте 82 МГц удалось добиться значительного уменьшения коэффициента эллиптичности. Результаты приведены на рисунке 12.

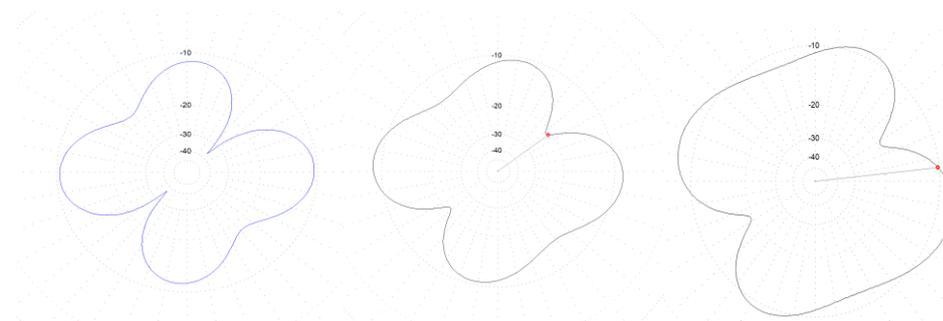


Рисунок 12 – Вид поляризации в зависимости от формы ячеек рефлектора (а – соотношение сторон ячейки 1:1, б – 1:2, в – 1:8).

Проведенное исследование показало, что оптимизация числа витков спирали Архимеда для данного частотного диапазона позволяет значительно сократить массогабаритные характеристики антенны при небольшом увеличении коэффициента эллиптичности излученных волн.

Конструкция и характеристики рефлектора оказывают большое влияние на структуру поля излучения спирали Архимеда.

С точки зрения оптимизации массогабаритных характеристик для изготовления рефлектора следует предпочесть крупные ячейки из

проводника малого сечения. Для изготовления антенны предпочесть малое количество витков частой намотке.

Проведенное исследование сетки из прямоугольных ячеек показало, что значение имеет не только размер ячеек, но и отношение сторон ячейки, а также толщина проводника из которого изготовлен экран.

Аналогичные результаты для такого типа антенн были получены для рефлектора с ячейками сложной формы: сетки гексагональной формы, перфорированные экраны с нерегулярными отверстиями и отверстиями различной формы.

#### **Список использованной литературы:**

1. Рамзей В. Частотно-независимые антенны, под ред. д.т.н. А.Ф.Чаплина. М.: «Мир», 1968. – 172с.
2. Петров Б.М., Горемыкин Е.В., Костромитин Г.И. Логопериодические вибраторные антенны. М.: Горячая-линия, 2005. – 293с.
3. Конторович М.И., Астрахан М.И., Акимов В.П., Ферсман Г.А. и др. Электродинамика сетчатых структур, М: Радио и связь, 1987. – 135с.

*Опубликовано: 20.05.2018 г.*

*© Академия педагогических идей «Новация», 2018*

*© Овчинников Д.А., 2018*