

Отчет по лабораторной работе №7
**Определение коэффициента направленного действия
рупорной антенны**

Выполнили студенты 430 группы
Виноградов И.Д., Шиков А.П.

Нижний Новгород, 2019

Цель работы: Нахождение коэффициента направленного действия пирамидальной рупорной антенны с помощью зеркального метода (метод Парселла), сравнение с теоретическими значениями.

1. Теоритическая часть

Антенна — устройство, предназначенное для излучения или приема волн (в нашем случае — электромагнитных). Одна из важнейших функций антенны состоит в формировании излучения с определенными направленными свойствами. Основными характеристиками направленности антенны являются диаграмма направленности (ДН) по амплитуде или по мощности, коэффициент направленного действия (КНД) и коэффициент усиления (КУ).

Диаграмма направленности по мощности есть угловое распределение мощности излучения в единицу телесного угла

$$P(\theta, \varphi) = r^2 S_r(r, \theta, \varphi),$$

где S_r — радиальная компонента вектора Пойнтинга на большом расстоянии r от антенны. Диаграмма направленности антенны, характерный размер l излучающей апертуры которой порядка или больше длины излучаемой волны λ , окончательно формируется в зоне Фраунгофера, определяемой соотношением

$$r \gg \frac{l^2}{\lambda} \quad (1)$$

Коэффициент направленного действия D характеризует выигрыш по мощности в направлении максимального излучения вследствие направленности антенны. Он равен отношению мощности, излучаемой в единицу телесного угла в направлении максимума диаграммы направленности $P(\theta_m, \varphi_m)$, к средней мощности $P_{cp} = P_{изл}/(4\pi)$, излучаемой антенной по всем направлениям:

$$D = \frac{4\pi P(\theta_m, \varphi_m)}{\int_0^\pi d\varphi \int P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta} \quad (2)$$

Коэффициент усиления G определяется как произведение КНД на коэффициент полезного действия (КПД) антенны η (или, точнее, всего антенного тракта):

$$G = D\eta \quad (3)$$

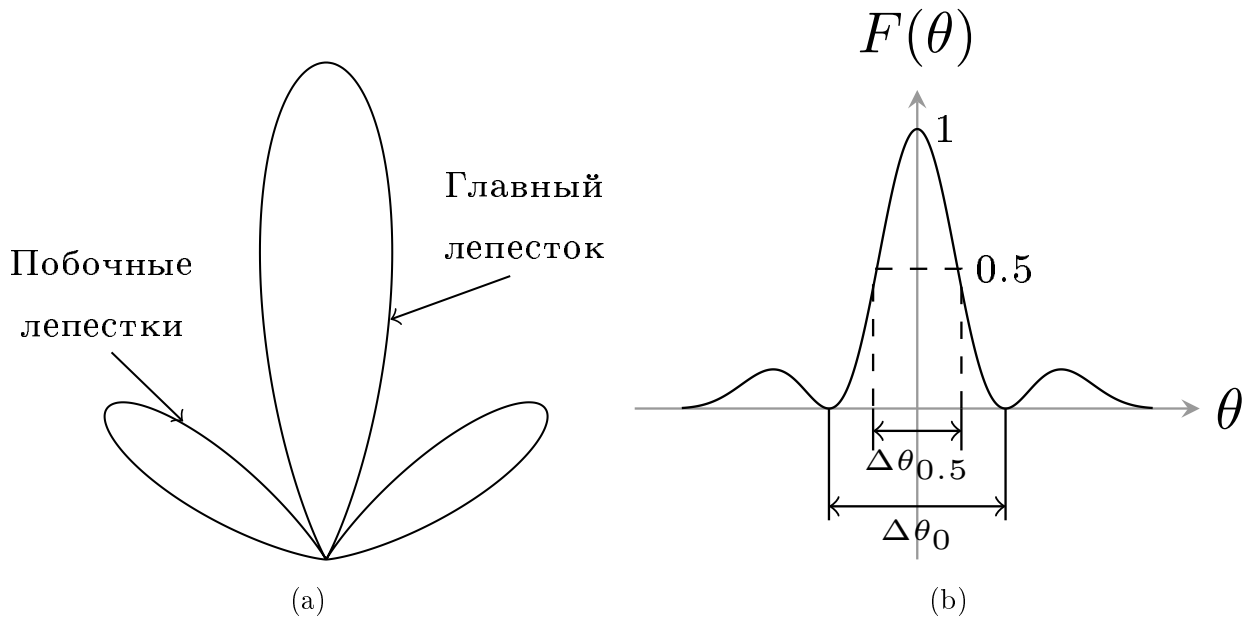


Рис. 1: Диаграмма направленности

Этот последний коэффициент в свою очередь есть отношение полной мощности $P_{\text{изл}}$, излучаемой антенной, к полной мощности $P_{\text{подв}}$, подводимой к антенне, т.е.

$$\eta = \frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{подв}}} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta}{P_{\text{подв}}} \quad (4)$$

В силу принципа взаимности ДН и КНД антенны при ее работе в режиме передачи и в режиме приема совпадают.

Для адекватного описания *приемной антенны* вводятся некоторые дополнительные характеристики. Одна из основных таких характеристик — эффективная площадь приема антенны A .

Эффективная площадь приема A определяется как отношение полной принимаемой антенной мощности $P_{\text{пр}}$ к плотности потока падающего излучения S_n в месте расположения антенны:

$$A = \frac{P_{\text{пр}}}{S_n} \quad (5)$$

Величины A и D связаны соотношением

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} D. \quad (6)$$

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном определении КНД пирамидальной рупорной антенны с помощью так называемого зеркального метода (метода Парселла) и сравнении измеренного значения с рассчитанным теоретически. Зеркальный

метод опирается на использование идеально (зеркально) отражающей плоской поверхности, расположенной в зоне Фраунгофера и ориентированной параллельно излучающей апертуре.

Согласно методу изображений отыскание отраженного поля, поступающего в антенну, сводится к нахождению поля, принимаемого от аналогичной зеркальной относительно отражающей плоскости излучающей антенны. В результате последовательного пересчета имеем: мощность, излучаемая гипотетической зеркальной антенной в единицу телесного угла в направлении на реальную антенну, равна $P_n = DP_{\text{изл}}/4\pi$, откуда плотность потока энергии в месте приема $S_n = P_n/4X^2 = DP_{\text{изл}}/(16\pi X^2)$, где X — расстояние между антенной и отражающей плоскостью; наконец, мощность, принимаемая антенной, равна $P_{np} = AS_n = ADP_{\text{изл}}/(16\pi X^2)$. С учетом 6 окончательно получаем

$$\frac{P_{np}}{P_{\text{изл}}} = \frac{D^2 \lambda^2}{64\pi^2 X^2} \quad (7)$$

отсюда интересующая нас величина D представляется в виде

$$D = \frac{8\pi X}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{np}}{P_{\text{изл}}}} \quad (8)$$

Таким образом, экспериментальное определение КНД требует нахождения отношения принимаемой зеркально отраженной мощности к мощности, излучаемой пирамидальной рупорной антенной.

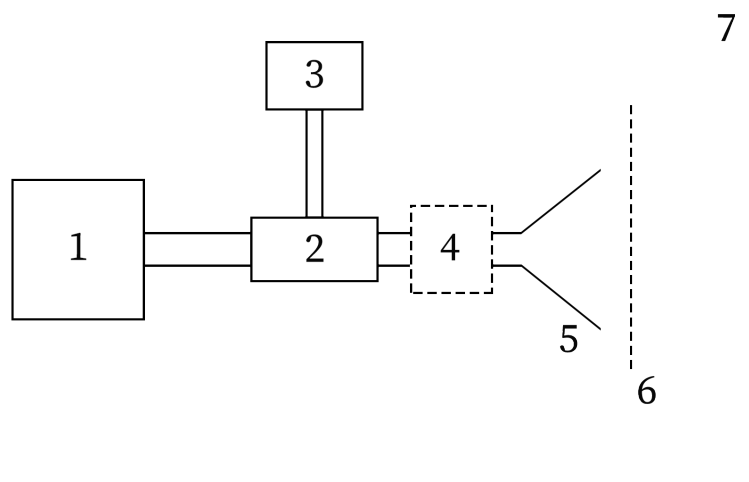


Рис. 2: Блок-схема установки: Схема установки: 1 – генератор, 2 – измерительная линия, 3 – амперметр, 4 – согласующее устройство, 5 – рупорная антенна, 6 – поглощающий щит, 7 – отражающий щит

Измерительная установка включает генератор СВЧ диапазона (длина излучаемой волны $\lambda \approx 3$ см) с отдельным блоком питания, волноводный тракт с измерительной линией

и амперметром к ней, пирамидальный рупор, отражающий щит, щит с поглощающим покрытием. Блок-схема установки на рис. 2. Установка позволяет контролируемо менять расстояние $X + \Delta X$ между антенной и отражательным щитом в пределах $\Delta X \approx 100$ см.

Работа будет производиться в несогласованном режиме, когда специальной процедуры согласования не проводится. Учитывая отражения от конца подводящего тракта поле на оси волновода, отнормированное на амплитуду падающей волны, для некоторого фиксированного положения рупора запишется в виде

$$E = 1e^{-ihx} + \Gamma_{\kappa}e^{i\varphi_{\kappa}}e^{ihx} + \Gamma e^{e\varphi}e^{ihx} \quad (9)$$

Смещение антенны на величину ΔX приведет к появлению в последнем члене дополнительного множителя $e^{ik_0 2\Delta X}$, связанного с дополнительным набегом фазы в свободном пространстве. Поскольку Γ_{κ} и Γ достаточно малы, то квадратичными величинами в первом приближении можно пренебречь. В результате для $|E|^2$ будем иметь

$$|E|^2 \approx 1 + 2\Gamma_{\kappa} \cos(2hx + \varphi_{\kappa}) + 2\Gamma \cos(2hx + \varphi + k_0 2\Delta X) \quad (10)$$

Из уравнения выше и экспериментальных данных можно найти коэффициент Γ , тогда мы сможем определить интересующую нас величину D :

$$D = \frac{8\pi X}{\lambda} \Gamma. \quad (11)$$

Теоретический расчет КНД:

В работе использовался рупор с размером апертуры $l_1 \times l_2 = 9.2 \times 13.7$ см, подсоединенный к волноводу размером 2.9×1.02 см.

Чтобы рассчитать КНД рупорной антенны в зоне Фраунгофера, будем пользоваться интегралом Кирхгофа-Гюйгенса. Значение компоненты поля в точке P , выражая через интеграл Кирхгофа :

$$\Psi(P) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left(\Psi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \Psi}{\partial n} \right) dS \quad (12)$$

где P - точка наблюдения, S - замкнутая поверхность, содержащая точку P , n - внутренняя нормаль к S , G - функция Грина свободного пространства

$$G = \frac{1}{r} e^{ikr}.$$

Поверхность S выбираем так, чтобы она проходила через апертуру антенны, а в отдаленном пространстве удаляется на бесконечность. Рассматривая малые отклонения от центральной оси (т.е. в положении максимума), интеграл приводится к виду

$$\Psi(P) = \frac{\Psi_0 \exp(ikz_0)}{z_0 \lambda i} \iint_{\Sigma} \exp\left(\frac{ik}{2z_0}(x^2 + y^2)\right) dx dy \quad (13)$$

где Σ - площадь апертуры. Интегралы Френеля, появляющиеся при дальнейшем решении не считаются аналитически, при этом численный расчет показал, что интеграл дает значение, приблизительно равное площади апертуры (Интегралы Френеля в первом приближении дают значение площади апертуры). Таким образом, компонента поля в точке наблюдения:

$$\Psi(P) \simeq \frac{\Psi_0}{z_0 \lambda i} S e^{ikz_0} \quad (14)$$

Зная компоненту поля в максимуме, можно выразить плотность потока энергии:

$$S_{max} = \frac{c}{8\pi} \frac{\Psi_0^2 S^2}{r^2 \lambda^2} \quad (15)$$

Для расчета КНД, также необходима плотность потока энергии во всех направлениях. Для эквивалентного источника имеем:

$$S_r = \frac{c}{8\pi} \frac{\Psi_0^2 S}{r^2 \lambda^2} \frac{1}{4\pi} \quad (16)$$

Подставляя это в выражение для КНД, получаем:

$$D = \frac{S_{max}}{S_r} = \frac{S}{\lambda^2} 4\pi \simeq 156 \quad (17)$$

Однако, как мы увидим дальше, выражение (17) дает завышенный КНД, что связано с неоднородностью распределения поля на апертуре рупора.

2. Экспериментальная часть

Оборудование:

- Генератор
- Измерительные линейки
- Амперметр квадратичного детектора
- Рупорная антенна (апертура $l_1 \times l_2 = 9.2 \times 13.7 \text{ cm}$)
- Поглощающий щит
- Отражающий щит

Начальное расстояние от отражающего щита до раскрыва рупора $X = 280 \text{ cm}$.

Подготовка

Для правильности проведения эксперимента, необходимо удостовериться, что экран находится в зоне Фраунгофера, т.е.:

$$X = 280 \text{ cm} \gg \frac{\max l_1, l_2}{\lambda} \simeq 63 \text{ cm} \quad (18)$$

2.1. Задание 1

Перед антенной помещается щит с поглощающим покрытием, позволяя не учитывать отраженную от металлического щита часть поля. Была снята зависимость интенсивности электрического поля $|E|^2$ от координаты внутри волновода x . Полученная зависимость приведена на рис. 3.

При отсутствии отраженной компоненты, уравнение (10) упрощается к виду

$$|E|^2 \approx 1 + 2\Gamma_\kappa \cos(2hx + \varphi_\kappa) \quad (19)$$

Отсюда, по полученной зависимости $|E|^2(x)$ можно определить коэффициент Γ_κ :

$$\Gamma_\kappa = \frac{|E_{\max}|^2 - |E_{\min}|^2}{2(|E_{\max}|^2 + |E_{\min}|^2)} \approx 0.026 \quad (20)$$

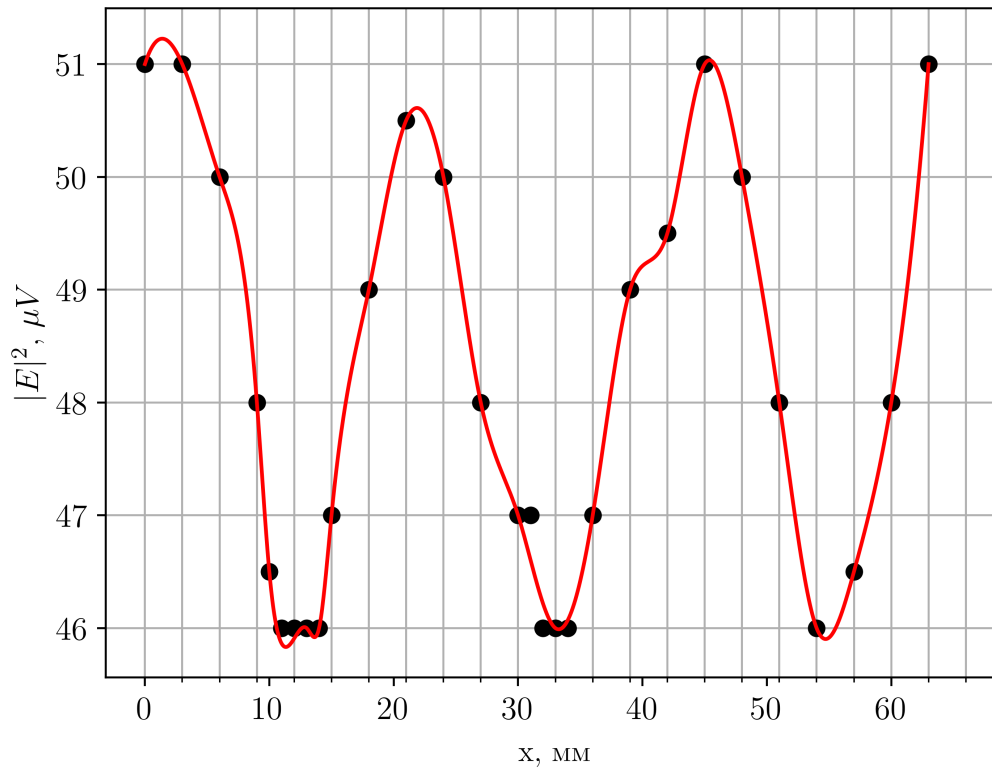
Длина волны в волноводе $\lambda_\text{в}$ составила:

$$\lambda_\text{в} \simeq 4.5 \text{ cm} \quad (21)$$

Зная $\lambda_\text{в}$, можно найти λ в свободном пространстве:

$$h^2 + \kappa^2 = k^2 \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_\text{в}^2 4a^2}{4a^2 + \lambda_\text{в}^2} \simeq 3.21 \text{ cm} \quad (22)$$

где $a = 2.29 \text{ cm}$ - ширина волновода.

Рис. 3: Зависимость интенсивности $|E|^2$ от координаты x

2.2. Задание 2

Найдя такое положение, что $\cos(2hx + \varphi_\kappa) = 0$ и зафиксировав его ($x = 2.6 \text{ cm}$), был убран отражающий щит и снималась зависимость $|E|^2(\Delta X)$, где ΔX - смещение относительно металлического экрана. Полученная зависимость приведена на рис. 4.

Коэффициента отражения Γ вычисляется аналогично первому заданию

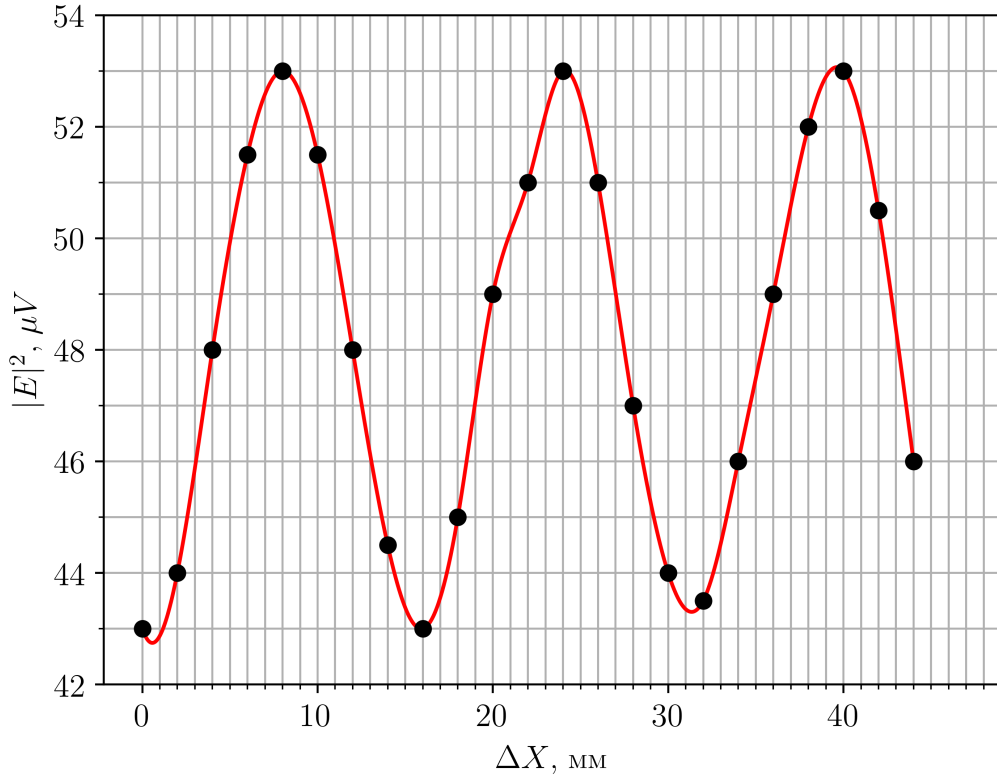
$$\Gamma = \frac{|E_{max}|^2 - |E_{min}|^2}{2(|E_{max}|^2 + |E_{min}|^2)} \approx 0.05 \quad (23)$$

Тогда КНД, исходя из формулы (11)

$$D = \Gamma \frac{8\pi X}{\lambda} \simeq 109.6 \quad (24)$$

2.3. Задание 3

Меняя положение $X + \Delta X$ относительно отражающего щита, были измерены $|E_{max}|^2$ и $|E_{min}|^2$ и вычислен КБВ в волноводе $\kappa = E_{min}/E_{max}$. Также был рассчитан коэффициент

Рис. 4: Зависимость интенсивности $|E|^2$ от координаты смещения ΔX

$\tilde{\Gamma}$:

$$\tilde{\Gamma}(\Delta X) = \frac{1 - \kappa(\Delta X)}{1 + \kappa(\Delta X)} = \frac{1 - \sqrt{K(\Delta X)}}{1 + \sqrt{K(\Delta X)}} \quad (25)$$

Полученная зависимость приведена на рис. 5.

Из полученного значения $\tilde{\Gamma}_{max} \simeq 0.064$ можно получить значение $\Gamma \simeq \tilde{\Gamma}_{max} - \Gamma_{\kappa} \simeq 0.04$, откуда значение D :

$$D \simeq 87.69$$

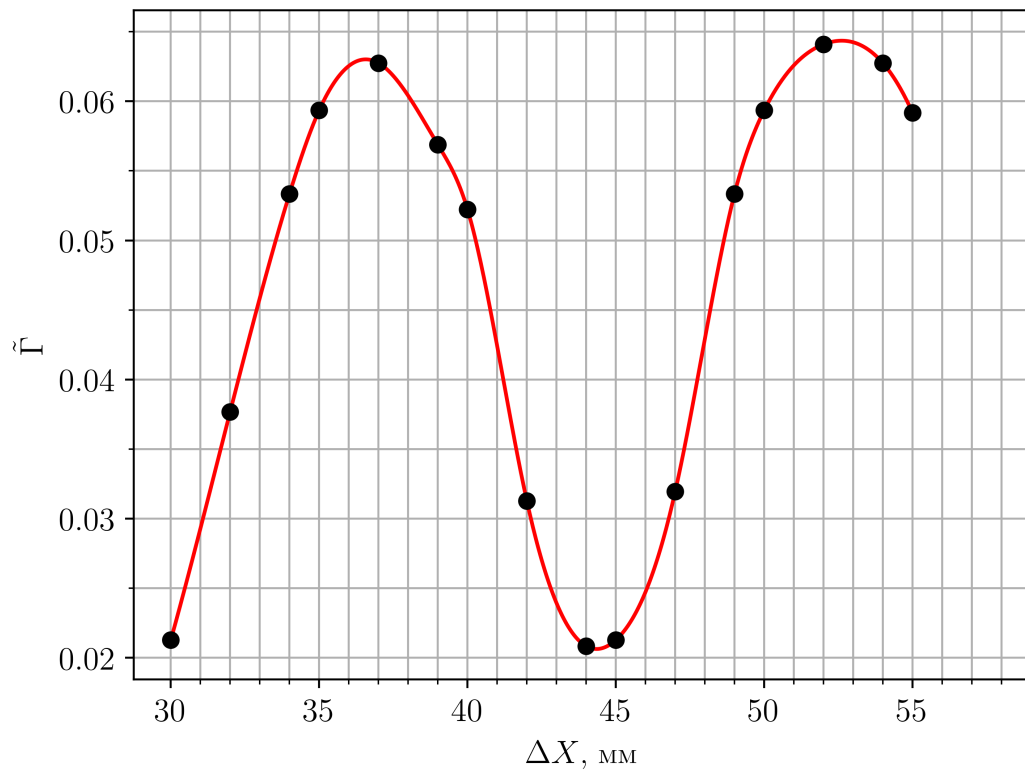
Проверка предположения малости

Ранее мы пренебрегли значениями Γ_{κ}^2 , Γ^2 , $\Gamma_{\kappa}\Gamma$. Теперь, зная их, мы можем убедиться в их малости:

$$\Gamma_{\kappa}^2 \simeq 0.026^2 \simeq 6.76 \cdot 10^{-4}$$

$$\Gamma^2 \simeq 0.05^2 \simeq 2.5 \cdot 10^{-3}$$

$$\Gamma_{\kappa}\Gamma \simeq 0.026 \cdot 0.05 \simeq 1.3 \cdot 10^{-3}$$

Рис. 5: Зависимость $\tilde{\Gamma}(\Delta X)$

2.4. Вывод

В результате двух экспериментов были получены значения $D_1 = 109.6$, $D_2 = 87.7$, а также рассчитано теоретическое значение $D_t = 156$. Расхождение экспериментальных значений связано с погрешностью измерений величин E_{min} и E_{max} . Расхождение же с теоретическим расчетом, связано с неоднородностью поля на апертуре рупора.