

# Оптика и атомная физика

Лектор: профессор кафедры оптики  
и биомедицинской физики СГУ, д.ф.

м.н., Dr. Habilit

Проф. С.С.Ульянов

В основу настоящего конспекта лекций положен курс лекций по оптике, разработанный профессором кафедры оптики **Н.К. Сидоровым** и заведующим кафедры оптики и биомедицинской физики профессором **В.В. Тучиным**

# Лекция 1

Введение

Оптикой называют учение о свете. В процессе исторического развития оптика неоднократно занимала лидирующие позиции в познании окружающего нас мира, создании методов и устройств для улучшения жизни человека. В настоящее время в связи с появлением лазеров и волоконной оптики оптика переживает очередную период бурного развития.

В свое время оптика сыграла решающую роль в познании строения атома, строения вещества. До сих пор оптическая спектроскопия является одним из наиболее эффективных средств изучения строения сложных биологических объектов, вновь синтезированных материалов, контроля загрязнения окружающей среды и пр.

В технике и технологии, особенно в микроэлектронике, существенную роль играют оптические методы контроля и измерения (неразрушающие методы), а также технологические процессы с использованием света (например, фотолитография).

Немного истории. Еще у древних людей в разных формах существовали два подхода к проблеме передачи энергии от Солнца к Земле светом: либо свет должен быть потоком частиц (типа летящей пули, среда не нужна), либо свет является системой волн (аналогично морской волне, акустическим волнам) и должен переносить энергию посредством среды.

Первая научная теория света была предложена Ньютоном во второй половине 17 века. Ньютон отстаивал корпускулярную теорию - теорию истечения световых частиц, летящих прямолинейно, согласно законам механики. Главные аргументы для Ньютона - это прямолинейность распространения света, отражение света, как механических частиц (угол падения равен углу отражения).



Против волновой теории - это необходимость наличия среды - эфира, что затрудняло бы движение планет. Преломление света Ньютон объяснял притяжением световых частиц преломляющей средой (силы притяжения действуют по нормали), теория дает, что скорость света в среде больше, чем в воздухе. У самого Ньютона, однако, были экспериментальные факты, не укладывающиеся в корпускулярную теорию - кольца Ньютона.

Основы волновой теории были заложены Гюйгенсом (хотя он не может считаться творцом волновой теории света). Всякий волновой процесс характеризуется пространственно-временной периодичностью, но Гюйгенс не считал световой импульс периодическим. Под волной он понимал сферическую поверхность, подобную волнам на воде.

Из идей Гюйгенса наибольшую ценность представляет общий принцип, носящий его имя и выдвинутый им для отыскания направления распространения света. При помощи принципа Гюйгенса легко объяснялись законы преломления и отражения.

Он гласит: каждая точка, до которой доходит световое возмущение, является, в свою очередь, центром вторичных волн; поверхность, огибающая эти вторичные волны, указывает положение фронта действительно распространяющейся волны.

В отличие от теории корпускул волновая теория дает, что скорость света в оптически более плотной среде  $v_2$  меньше, чем в оптически менее плотной  $v_1$ . Для разрешения противоречия нужны были прямые измерения  $v_1$  и  $v_2$ .

Интерференционные опыты Юнга и Френеля противоречили механистической теории корпускул  
(  $I > I_1 + I_2$  и  $I < I_1 + I_2 \rightarrow 0$  ).

Было также обнаружено, что свет (подобно звуку) может отклоняться от прямолинейного распространения, огибать препятствия. Это явление дифракции, которое в полной мере не объясняется корпускулярной теорией.

Дальнейшее развитие волновая теория света получила в работах Эйлера и Ломоносова. Эйлер критиковал теорию истечения - Солнце испускает непрерывно и должно иссякнуть.

Ломоносов - свет есть колебательное движение в эфире, и цвет определяется длиной волны, при поглощении света вес вещества не увеличивается.

Развитие волновой теории - Юнг и Френель.

Волновая теория прекрасно объясняет явления дифракции, интерференции (и поляризации), законы отражения и преломления, и даже прямолинейное распространение света.



Шла постоянная борьба между сторонниками корпускулярной и волновой теорий. Решающий опыт - это прямое измерение скорости света в среде. В 1862 году Фуко произвел такой опыт, и оказалось, что в воде скорость света меньше, чем в воздухе. Волновая теория победила теорию истечения. Но насколько прочна была эта победа?

Все дифракционные опыты в том виде,  
как они производились со времен Юнга  
и Френеля, описывались волновым  
дифференциальным уравнением при  
данных граничных и начальных  
условиях

$$m \square = F$$

Все дифракционные опыты в том виде,  
как они производились со времен Юнга  
и Френеля, описывались волновым  
дифференциальным уравнением при  
данных граничных и начальных  
условиях

$$\Delta\varphi - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0$$

Само уравнение легко выводится в теории упругости сплошной среды. Если бы удалось независимо доказать существование среды - эфира, то волновая механистическая теория света была бы доказана. Два главных возражения - движение небесных тел, и необходимость (из-за большой частоты световых колебаний  $\sim 10^{15} \text{ с}^{-1}$ ) высокой упругости, следовательно, и плотности среды (на уровне стали). Что доказывает немеханистическую природу света.

Волновая теория света получила неожиданную поддержку в области электрических и магнитных явлений, в области электродинамики, немеханистической теории Максвелла. Путем, совершенно независимым от классической механики, математическим обобщением опытных законов электромагнетизма Максвелл получил основные уравнения электродинамики, из которых однозначно вытекало волновое уравнение света.

На опыте было показано, что электрические и магнитные возмущения распространяются со скоростью света, при этом связь электрических и магнитных состояний такова, что в пространстве должны распространяться электромагнитные волны. Эти волны, предсказанные теоретически Максвеллом, были на опыте обнаружены Герцем.

В изолирующей среде распространяются электромагнитные волны; изменение скорости движущегося электрона (а движение заряда под действием сил всегда ускоренное) можно рассматривать как ослабление или усиление электрического тока; оно сопровождается ослаблением (или усилением) связанного с движущимся электроном магнитного поля.

Изменение магнитного поля  
индуцирует в окружающем  
пространстве переменное  
электрическое поле, которое образует  
вокруг себя свое магнитное поле и т.д.



Свет - электромагнитная волна. Это объясняло и взаимодействие света с веществом: движение заряженных частиц - излучение света; поглощение и рассеяние света - это взаимодействие электромагнитной волны с заряженными частицами внутри атома.

Волновая теория света на электромагнитной основе к концу 19 века была доказана, отпало главное возражение Ньютона о необходимости эфира для механической волновой теории. Казалось бы, это окончательная победа волновой теории.

Однако новые факты и осмысления  
хорошо известных фактов по  
взаимодействию света с веществом, а  
именно давление света, химическое  
действие света (например, выцветание  
ткани, которое идет постепенно),  
фотоэффект, поглощение света,  
рассеяние, флуоресценция, нагрев и пр.  
привели к тому, что гипотеза о  
корпускулах - квантах света - получила  
новое развитие.

В самом начале 20 века Макс Планк, рассматривая излучение нагретого тела, сделал замечательное открытие. Оказалось, что свет может поглощаться и излучаться лишь вполне определенными порциями энергии, названными квантами:

$$\varepsilon = h\nu$$

В 1887 году Герц открыл фотоэффект, который детально был изучен Столетовым. Энергия выбитых электронов не зависит от интенсивности, а определяется лишь частотой (длиной волны) света

Красная граница фотоэффекта. Нет объяснений со стороны волновой теории. Эйнштейн в 1905 году построил теорию фотоэффекта, согласно которой свет - это поток частиц квантов или фотонов с энергией  $h\nu$  каждого, следовательно, энергия выбитых электронов пропорциональна частоте света, что и имеет место на опыте:

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{m v_e^2}{2}$$

$$i_{\phi} \sim N \sim I_{\text{света}}$$

Квантовый характер света можно наблюдать визуально - опыты Вавилова (малые интенсивности в затемненной комнате, т.к. в темноте глаз имеет чрезвычайно высокую чувствительность, наблюдается прерывистость потока, флуктуации, шумы).



Итак, снова возродилась идея квантовой природы света. Но это не было возвратом к ньютоновским представлениям. Это было формирование новых, более глубоких и сложных понятий. Налицо противоречие, которое не укладывается в нашу систему привычных понятий.

Кажущиеся непреодолимыми  
внутренние противоречия были  
обнаружены на пороге 19 - 20 веков не  
только в световых явлениях, но и в  
свойствах вещества: масса тел  
оказалась зависящей от их скорости,  
потребовался пересмотр понятий  
пространства и времени.

С этой точки зрения вскрытое в итоге развития оптики "непреодолимое" противоречие волновых и корпускулярных свойств света - есть новое выражение диалектики природы, реального единства противоположностей.

Упрощенные механистические  
представления классической физики о  
непрерывных волнах и частицах,  
якобы исключающих друг друга, в  
действительных явлениях природы  
уживаются одновременно.

Это непривычное для нас  
противоречивое единство  
свидетельствует только о  
недостаточности и примитивности  
нашей механистической картины.

Материя действительного мира  
бесконечно сложнее упрощенных  
метафизических образов, возникающих  
у нас в силу привычки и длительного,  
обыденного опыта.

Существующий материальный мир - движущаяся материя - представляется нам в двух основных формах - как вещество и свет (электромагнитное поле). Вещество во всем своем многообразии состоит из электронов, протонов и нейтронов. Вещество казалось более понятным, чем свет, который одновременно обнаруживал свойства волн и частиц. Свет всегда отождествлялся с движением. Однако физика вполне примирилась с "покоящимся" веществом.

Однако с точки зрения диалектического мировоззрения такая форма материи, лишенная движения, чистая абстракция. Она действительно оказалась таковой, как это показали совсем неожиданные и удивительные опыты, проведенные в 1927 году. Было обнаружено, что поток электронов, протонов и молекул, встречая малые препятствия и отверстия, дает такие же отчетливые дифракционные явления, как и свет, т.е. обладает теми же основными свойствами волн.

Таким образом, с механикой случилось то же самое, что с оптикой - лучевая (геометрическая) оптика → волновая оптика (малые размеры); механика Ньютона была "лучевой механикой", но открытия нашего времени (в микромасштабе) показали, что за ней скрывается более общая "волновая механика".



Не следует, однако, отождествлять "волны вещества" с волнами света. Природа их различна - свет - это электромагнитные волны.

Материя, т.е. вещество и свет, одновременно обладают свойствами волн и частиц, но в целом это не волны и не частицы и не смесь того и другого. Наши механические понятия не в состоянии полностью охватить реальность, для этого не хватает наглядных образов.

Формальная математическая теория света, хотя и не вполне совершенная, в настоящее время существует, она создана Дираком и охватывает почти весь круг известных явлений. В частности, на основании этой формальной математической теории света Дираком было предсказано, что в сильном электрическом поле, которое реализуется вблизи атомного ядра, световые кванты с длинами волн не более 0,001 нм могут распадаться на две противоположно заряженные частицы - электрон и позитрон.

Т.е. свет превращается в вещество, возможно и обратное превращение. Это предсказание блестяще подтвердил эксперимент при облучении свинца  $\gamma$ -квантами.

История исследования света, его природы и сущности далеко не закончена; несомненно, что впереди науку ждут новые открытия в этой области, что мы ближе подойдем к истине, а техника обогатится новыми средствами. К наиболее революционным достижениям 20-го века в области оптики - это, конечно, создание лазеров и разработка волоконно-оптических технологий.

# **Уравнения Максвелла для изотропного однородного незаряженного диэлектрика**

**$\epsilon, \mu$  - скаляры ,  $\epsilon = \text{const}$ ,**

**$\mu = 1, \rho = 0, j = 0$**

# СИ

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j}, \operatorname{div} \mathbf{B} = 0,$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho,$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E},$$

$$\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi C} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ генри/м},$$

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{C^2}, C = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

# CGSE (СГСЭ)

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \operatorname{div} \mathbf{B} = 0,$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho,$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E},$$

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$$

Для анизотропного диэлектрика

$$D_i = \sum_k \varepsilon_{ik} E_k$$

$$B_i = \sum_k \mu_{ik} H_k$$

$$\varepsilon=\text{const}, \mu=1, \rho=0, j=0$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad \text{div } \mathbf{H} = 0$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad \text{div } \mathbf{E} = 0$$



$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \operatorname{rot} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{c}{\mu} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} = \\ &= -\frac{c}{\mu} (\operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E}) = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}\end{aligned}$$

# Волновое уравнение

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

Или: волновое уравнение

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

Или: волновое уравнение

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

Здесь:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (\mathbf{CGSE}) \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \quad (\text{СИ})$$

# Скалярные волны

- Плоские волны
- Сферические волны
- Цилиндрические волны

# Плоские волны.

Рассмотрим волновое уравнение:

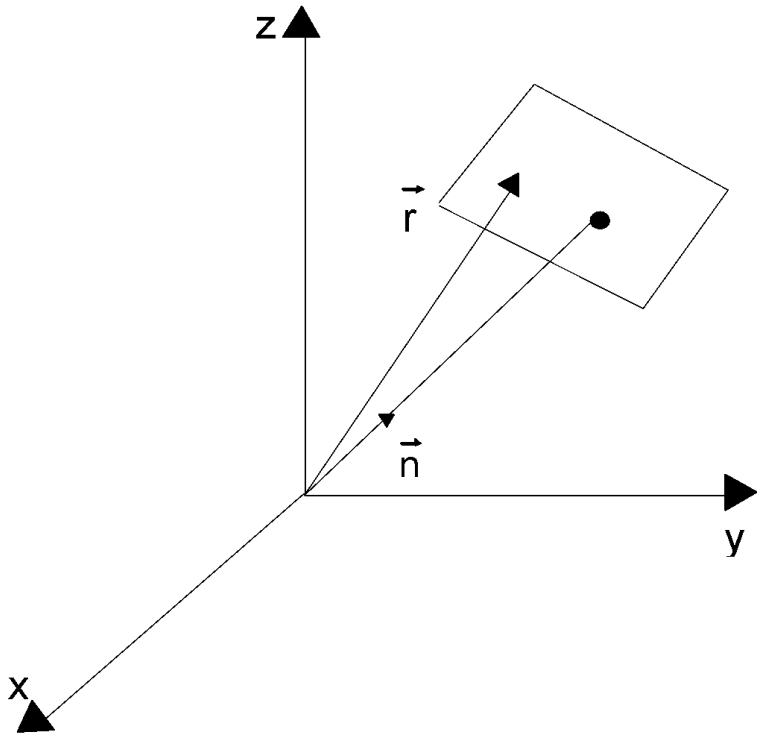
$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu} \approx \sqrt{\epsilon}$$

$$E = f\left(t - \frac{\mathbf{n}\mathbf{r}}{v}\right)$$

уравнение *плоской* волны,  
распространяющейся вдоль единичного  
вектора  $\mathbf{n}$ , т.к. в каждый момент времени  
величина  $E$  постоянна в плоскостях  
 $\mathbf{n}\mathbf{r} = \text{const}$  (уравнение плоскости).  
Поверхностью одинаковой фазы  
является плоскость.



$$\frac{\partial E}{\partial x} = f' \cdot \left(-\frac{n_x}{v}\right), \quad \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = f'' \cdot \left(\frac{n_x^2}{v^2}\right)$$

$$n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1$$

$$\mathbf{nr} = n_x x + n_y y + n_z z$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = f' \quad , \quad \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = f'' \rightarrow$$

$$\nabla^2 E - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = f''' \frac{1}{v^2} - f''' \frac{1}{v^2} = 0$$



Если вместо трехмерного волнового уравнения взять одномерное:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

то ему удовлетворяет *плоская* волна, распространяющаяся вдоль оси  $z$ :

$$E(z, t) = f\left(t - \frac{z}{v}\right)$$

Если  $\mathbf{n}$  направлен вдоль  $\mathbf{r}$ , то  $\mathbf{n}\mathbf{r} = r$  и решением волнового уравнения является выражение:

$$E(r) = \frac{1}{r} f\left(t - \frac{r}{v}\right)$$

представляющее собой уравнение *сферической* волны, т.к. в каждый момент времени  $E$  постоянна на поверхности сферы  $r = \text{const}$ .

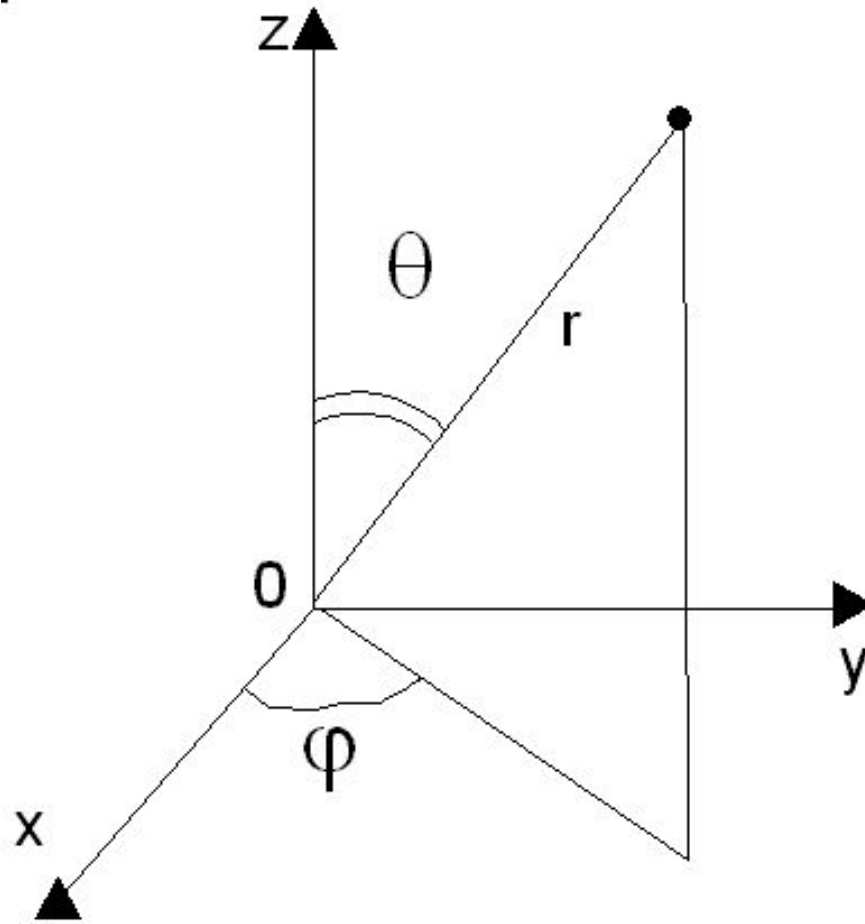
## Решение в виде

$$E = f\left(t - \frac{z}{v}\right)$$

представляет собой волну, т.е. процесс  
*распространения* *колебаний*.

Для описания сферических волн используются сферическая система координат:

$$x = r \sin \theta \cdot \cos \varphi; y = r \sin \theta \cdot \sin \varphi; z = r \cos \theta.$$



Тогда волновое уравнение

$$\nabla^2 E - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

приобретает вид

$$\left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial E}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \cdot \frac{\partial E}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial \varphi^2} \right] -$$
$$- \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

В частном случае, когда  $E$  не зависит от угловых координат,  $\theta$  и  $\phi$ , волновое уравнение можно записать в виде:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial E}{\partial r} \right) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

ИЛИ

$$\frac{2}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$



Замена переменных  $u=rE$ ,

дает:

$$\frac{\partial E}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{r^2} u, \quad \frac{2}{r} \frac{\partial E}{\partial r} = \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{r^3} u,$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2}{r^3} u = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2}{r^3} u,$$

$$\frac{2}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} = \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{r^3} u + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2}{r^3} u = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2}.$$

После подстановки в

$$\frac{2}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

Получаем:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

Решением этого уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

является

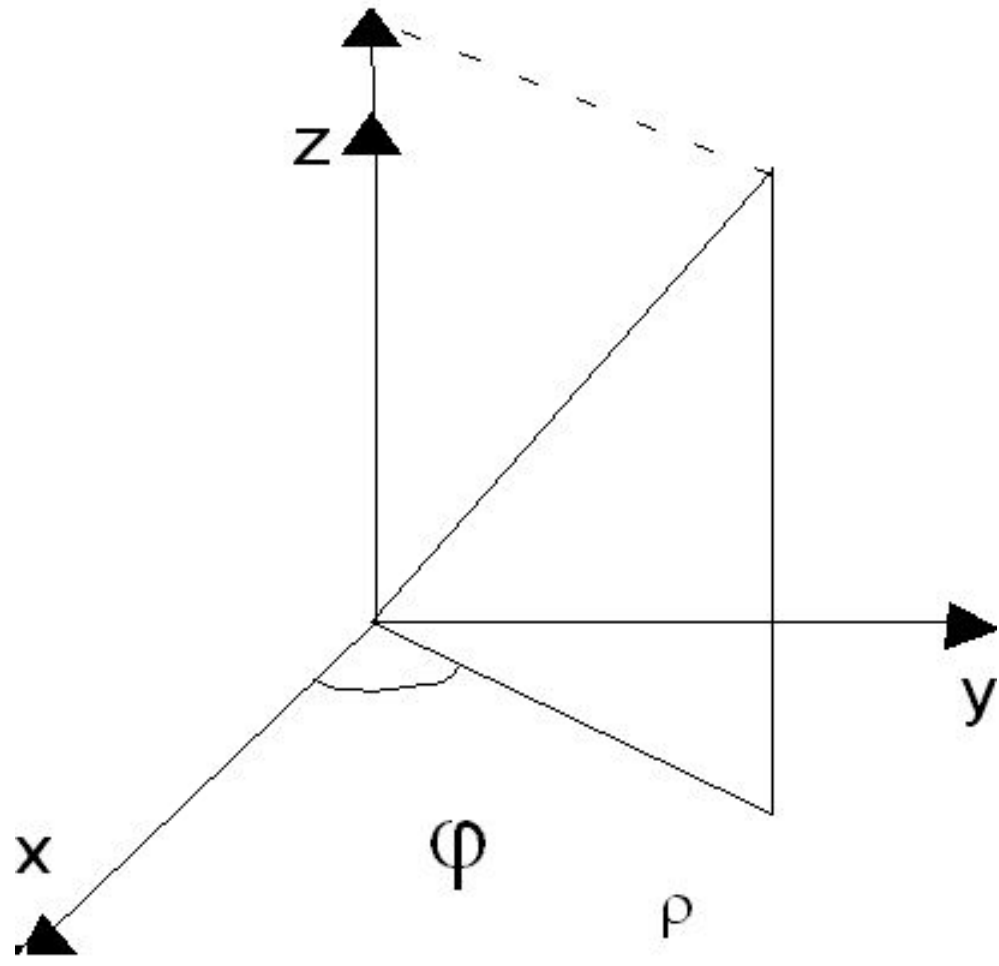
$$u = f\left(t - \frac{r}{v}\right)$$

Тогда, окончательно, выражение для  $E$  примет вид:

$$E = \frac{1}{r} f\left(t - \frac{r}{v}\right)$$

цилиндрическая система координат:

$$x = \rho \cos \varphi \quad , \quad y = \rho \sin \varphi \quad , \quad z = z$$



В частном случае, когда  $E$  не зависит от азимутального угла  $\phi$  и от координаты  $z$ , решением волнового уравнения, имеющего

ВИД:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial^2 E}{\partial \rho^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

решением волнового уравнения

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial^2 E}{\partial \rho^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

является:

$$E = \frac{1}{\sqrt{\rho}} f\left(t - \frac{\rho}{v}\right)$$