

**Автономная некоммерческая общеобразовательная
организация "Физтех-лицей"
(АНОО «Физтех-лицей» им. П.Л. Капицы)**

XX научно-практическая конференция

«Старт в инновации»

Акустическая левитация

Выполнили:

Даньшов Арсений 8 «А»

Клешня Александр 8 «В»

Лисенков Станислав 8 «В»

Руководитель:

Кичик. М. Г. – студентка МФТИ

Московская область, г. Долгопрудный

2021 г.

Оглавление

1. Введение	3
2. Теоретическая часть	4
2.1 Стоячая звуковая волна.....	4
2.2 Затухание звуковых волн.....	5
2.3 Левитация предметов.....	6
3. Практическая часть	8
3.1 Схема установки	8
3.2 Эксперимент	10
3.2.1 Наблюдение левитации	10
3.2.2 Наблюдение затухания.....	11
4. Результаты работы	12
5. Список литературы	13
6. Приложение	14

1. Введение

Звуковая левитация – это одно из открытий человечества, которое дает возможность сконструировать механизмы, позволяющие людям не рисковать своей жизнью при переносе опасных веществ, получать и перемещать сверхчистые вещества. На сегодняшний день различают два вида левитации: магнитная и акустическая. В данной работе была изучена акустическая (звуковая) левитация, то есть способность веществ левитировать в звуковой волне, а также возможность переноса вещества с помощью левитации.

Акустическая левитация – это устойчивое положение объекта в стоячей звуковой волне.

Акустическая левитация – это процесс, который появился не так давно, например, японские ученые научились приводить в движение частицы воды при помощи акустической системы [1]. На самом деле, левитировать могут не только жидкости, но и легкие частицы.

С использованием акустической левитации удобно передвигать легкие предметы, к которым нельзя прикасаться на производстве, в таких сферах, как фармацевтика и электроника.

Цель исследования: создание установки для наблюдения и изучения акустической левитации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Познакомиться с явлением акустической левитации;
2. Сформулировать теоретическое описание явления;
3. Собрать установку для наблюдения акустической левитации.

Методы исследования:

- Анализ научной литературы и интернет-ресурсов;
- Сборка установки и экспериментальное изучение наблюдаемых эффектов;
- Сравнение;
- Наблюдение.

В нашей работе для наблюдения акустической левитации были использованы два звуковых генератора, работа которых обеспечивалась микросхемой с записанным на неё кодом. Для тестирования установки (подвешивания в стоячей звуковой волне) использовали кусочки пенопласта.

2. Теоретическая часть

2.1 Стоячая звуковая волна

Звук – физическое явление, представляющее собой распространение в виде упругих волн механических колебаний в твердой, жидкой или газообразной среде.

Звуковая волна – упругая волна, воспринимаемая человеческим ухом.

Стоячая волна — это волна, которая образуется при наложении двух встречных, совпадающими по фазам и с одинаковой частотой волн.

Скорость распространения звуковой волны – это расстояние, на которое распространяется область сжатия или область разрежения волны за единицу времени. Обозначается эта величина буквой v . Выражение для скорости звуковой волны через длину волны и её частоту имеет вид $v = \lambda \cdot f$.

Для синусоидальной волны с частотой f , периодом T и скоростью распространения формула длины волны имеет вид $\lambda = \frac{v}{f} = v \cdot T$.

Представим, что некоторая скалярная величина s следующим образом зависит от координат x, y, z рассматриваемой точки и времени t : $s = F(x, y, z) \cos(\omega t - \varphi)$, где $F(x, y, z)$ – некоторая однозначная функция, ω и φ – постоянные. Это значит, что величина s во всех точках пространства совершает гармоническое колебание с одинаковой частотой и фазой. Но амплитуда колебания различна для различных точек пространства. Это и есть стоячая волна.

Плоская стоячая звуковая волна, как частный случай звуковой волны, может быть получена, как суперпозиция двух плоских синусоидальных звуковых волн с одинаковой частотой, распространяющихся в противоположных направлениях. Допустим, амплитуда давления стоячей волны p будет зависеть от координаты x , а сама волна будет представлена суммой волн p_1 и p_2 :

$$p_1 = \frac{1}{2} p_0 \cos(\omega t - kx),$$

$$p_2 = \frac{1}{2} p_0 \cos(\omega t + kx),$$

$$p = p_1 + p_2 = \frac{1}{2} p_0 \cos(\omega t - kx) + \frac{1}{2} p_0 \cos(\omega t + kx) = p_0 \cos(kx) \cos(\omega t),$$

где k – волновой вектор, направление которого перпендикулярно фронту бегущей волны, а абсолютное значение равно волновому числу ($2\pi/\lambda$). Важно заметить, что для наблюдения стоячих волн расстояние между источниками звука должно быть кратным длине звуковой волны.

В нашем случае волна сферическая, и она также может быть получена, как сумма или разность двух синусоидальных сферических звуковых волн. Точки, в которых $\cos(kx) = 0$ называются узлами стоячей волны. Давление в этих точках постоянно, и около них располагаются левитирующие тела (Приложение 1). Подъёмная сила возникает за счёт разности давлений, действующих на тело снизу и сверху.

2.2 Затухание звуковых волн

Тот факт, что звук распространяется с конечной скоростью, известен с давних времен – например, по наблюдению эхо. Измерения скорости звука всегда были довольно точны. Еще в 1738 г. французская академия наук получила для скорости звука в воздухе при 0°С значение 337 м/сек, всего на 1,7% отличающееся от современных измерений (332,45 м/сек). Но другое фундаментальное свойство процесса распространения — затухание в результате поглощения звука (т. е. перехода звуковой энергии в тепловую) — привлекло внимание только в XIX веке, а экспериментальное обнаружение и измерение поглощения было выполнено только в нашем веке. Это объясняется тем, что при умеренных частотах поглощение звука в воздухе или в воде удивительно мало и поэтому полностью маскируется другими причинами затухания [2].

Затухающие колебания — колебания, энергия которых уменьшается с течением времени. Свободные колебания любого осциллятора рано или поздно затухают и прекращаются. Поэтому на практике обычно имеют дело с затухающими колебаниями.

Уменьшение интенсивности звуковой волны по мере её распространения обусловлено рядом причин, основными из которых являются расхождение волны, рассеяние и поглощение звука.

Затухание вследствие расхождения волны связано с тем, что на больших расстояниях r от источника поток излучаемой звуковой энергии по мере распространения распределяется на всю увеличивающуюся площадь волновой поверхности и, соответственно, уменьшается поток энергии, приходящийся на единицу поверхности [3].

Обычно затухание происходит под действием сил сопротивления среды.

Уменьшение интенсивности сферической волны обуславливается ее расхождением и затуханием колебаний, а плоской — только затуханием.

Распространение сферической звуковой волны с амплитудой p можно представить в виде $p = \frac{p_0}{r} \cos(\omega t - kr)$, где r – расстояние от рассматриваемой точки до источника. То есть, зная амплитуду давления p_1 в некоторой точке, характерной расстоянием r_1 , можно получить значение амплитуды p_2 в точке r_2 из соотношения

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Помимо затухания звуковой волны, связанного с увеличением расстояния, существует затухание, связанное с потерями энергии в окружающую среду. Эти потери обусловлены вязкостью и теплопроводностью, но, поскольку они очень малы, мы их рассматривать не будем.

2.3 Левитация предметов

Величина силы, действующей на твердую сферическую частицу, в поле стоячей и прогрессивной волн в невязкой жидкости была теоретически найдена Л. Кингом ещё в 1934 г. Это явление не изучалось вплоть до 1988 года, когда Д. Фелипе Гейтану удалось захватить один пузырь в центре колбы, вибрирующий на своем уровне акустического резонанса; затем наблюдалась звуколюминесценция. Как только Гейтан получил этот эффект, он потерял интерес к дальнейшему исследованию.

Группа ученых из Университета Сан-Паулу и Эдинбургского университета представили свою методику акустической левитации в журнале *Applied Physics Letters*. Они отметили, что левитация небольших предметов с помощью стоячих волн давно практикуется в научном сообществе. При этом максимальный размер объекта составляет лишь четверть от длины акустической звуковой волны.

Исследователи заставили парить в воздухе пенопластовый шарик, который в 3,6 раза превышает используемую для его левитации длину звуковой волны. Исследователям удалось поднять в воздух пенопластовый шарик, который в 3,6 раза превышает по размеру длину волны (диаметр шарика составляет 50 мм, длина волны — 14 мм).

Исследователи из Бристольского университета (Великобритания) впервые добились устойчивой акустической левитации для объекта крупнее длины звуковой волны. Обычно проблема использования акустической левитации в том, что размеры звуковых волн, как правило, невелики, а наиболее длинные волны (инфразвук) вообще очень сложно применять поблизости от людей, поскольку такие волны могут вызвать у них неприятные ощущения. Звуки в слышимой части акустического диапазона — тоже не лучший выбор для акустической левитации, поскольку волны нужной энергии будут источником сильного шума. Поэтому авторы новой работы для своего эксперимента подобрали звуковые волны частотой в 40 кГц, ультразвук, не мешающий человеку:

В эксперименте удалось заставить левитировать шарик из пенополистирола диаметром в 1,6 сантиметра. Во всех предыдущих опытах по акустической левитации с трудом удерживали объекты диаметром даже в миллиметр-другой. Размер левитировавшего объекта в этом эксперименте в 1,88 раза длиннее звуковых волн, использованных в эксперименте. Чтобы добиться удержания такого сравнительного большого объекта, авторы работы пошли на хитрость: они поддерживали объект не одним звуковым вихрем, как это делали раньше другие научные группы, а сразу несколькими совместно действующими звуковыми вихрями. Именно за счёт этого и удалось удерживать в воздухе объект таких размеров.

Однако пока поднять объект в воздух можно только в неподвижном режиме. Со временем ученые планируют поднимать в воздух более крупные объекты разной формы.

В качестве левитирующих объектов мы выбрали сферы из пенопласта. Зная их параметры, мы можем оценить давление в узлах стоячей звуковой волны.

Для описания явления акустической левитации запишем второй закон Ньютона: $mg + F_d = ma$, где $a = 0$, т.к. тело находится в равновесии: $mg + F_d = 0$, $F_d = P \cdot S$ — сила давления, где S — площадь половинки сферы равна $S = 2 \cdot \pi \cdot r^2$.

Для вычисления массы груза воспользуемся формулой $m = \rho V$, где $V = \frac{4}{3} \pi r^3$.

Теперь, можем найти давление звуковой волны, необходимое для поддержания левитации сферы из пенопласта: $P = -\frac{mg}{S} = -\frac{2}{3}\rho r g$ (минус в формуле показывает, что сила давления должна быть направлена против силы тяжести).

3. Практическая часть

3.1 Схема установки

В нашей работе мы собрали и использовали установку, создающую стоячую звуковую волну. Это устройство работает с использованием двух ультразвуковых датчиков, расположенных друг против друга.

Во время работы они создают две одинаковые по амплитуде и частоте, но противоположные по направлению волны. В сумме эти волны образуют стоячую звуковую волну. Такая волна имеет неподвижные точки, в которых давление волны всегда равно атмосферному. В других частях волны амплитуда давления постоянно меняется.

Именно наличие неподвижных точек и дает название стоячим волнам. Такие точки называются узлами стоячей волны, а точки, где достигается максимальная амплитуда давления, называются пучностями.

Размещая звукогенераторы на правильном расстоянии от преобразователя, акустический левитатор создает стоячую волну. Когда ориентация волны параллельна силе тяжести, части стоячей волны имеют постоянное давление вниз, а другие - постоянное давление вверх. Помещая между ними какой-то небольшой легкий предмет, мы можем наблюдать левитацию.

Экспериментальная установка представляет деревянную пластину, укрепленную на деревянной подставке (Приложение 2). В верхней части пластины неподвижно закреплена платформа со звукогенератором (отмечена буквой А). В середине платформы находится продольное отверстие (отмечено буквой Б), вдоль которого может передвигаться вторая платформа со звукогенератором (показана крупным планом, отмечен буквой В). Эта платформа фиксируется в нужном положении с помощью винта и гайки «барашек» (не показаны на рисунке). В пластине также есть два отверстия под провода (верхнее отмечено буквой Г, провода не показаны на рисунке). На деревянной подставке стоит деревянная коробочка (отмечена буквой Д) с электронной системой, обеспечивающей работу установки.

Электронная схема представлена в Приложении 3. Она состоит из платы Arduino Uno (отмечена буквой А), драйвера моторов МХ1508 (отмечен буквой Б), и двух звукогенераторов (отмечены буквой В). Схема питается от батарейки А23(12В). Между собой все элементы схемы соединены проводами Dupont.

Ультразвуковой датчик передает акустическую волну на частоте от 25 кГц до 50 кГц. Эти ультразвуковые волны создают стоячие волны с узлами и пучностями. Рабочая частота данного ультразвукового преобразователя составляет 40 кГц.

Для реализации работы звукогенераторов на плату Arduino Uno записан следующий код (Приложение 4).

Цель использования Arduino состоит в том, чтобы генерировать высокочастотный колебательный сигнал 40 кГц для ультразвукового датчика или преобразователя, и этот импульс подается на вход IC драйвера двигателя для управления ультразвуковым преобразователем. В результате ультразвуковой преобразователь производит акустические звуковые волны.

Итак, для изготовления звукогенератора сначала нужно демонтировать ультразвуковые датчики. Такие ультразвуковые излучатели используются в датчиках расстояния. Затем нужно снять защитный колпачок и нарастить провода. Далее отрезаем две пластинки от платы. Сверлим отверстие под винт. Ультразвуковые датчики размещаем на концах плат.

Положение ультразвуковых преобразователей очень важно. Они должны быть обращены друг к другу и они должны находиться на одной линии, чтобы ультразвуковые звуковые волны могли распространяться и пересекаться друг с другом в противоположных направлениях.

Дальше нужно передать на Arduino код. Используя этот код с помощью таймера и функций прерывания генерируется сигнал 40 кГц на выходные контакты Arduino.

Собираем устройство согласно схеме (Приложение 3).

Размещение датчика очень важно, поэтому нужно постараться установить его в правильном положении.

Мощность устройства небольшая и "работать" оно будет только с небольшими легкими предметами, например, бумагой или пенопластом. Как уже упоминалось ранее, в данной работе мы используем пенопласт.

3.2 Эксперимент

3.2.1 Наблюдение левитации

Для наблюдения акустической левитации мы помещали один или несколько кусочков пенопласта между включенными звукогенераторами. Звукогенераторы размещали друг над другом на расстоянии кратном половине длины волны [4]. Эти расстояния подсчитывали по формуле: $l = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{v}{f}$ (n – целое число). Скорость звука в нормальных условиях ≈ 340 м/с, а частота звукогенераторов = 40 кГц. Таким образом, в нашем случае $l = \frac{n}{2} \cdot 8,5$ мм. В ходе экспериментов были зафиксированы следующие результаты:

1. Тела (кусочки пенопласта) действительно левитируют, то есть находятся в воздухе в устойчивом положении между звукогенераторами (Приложение 5)
2. Когда между генераторами подвешены несколько кусочков пенопласта, между соседними приблизительно равное расстояние, которое примерно равно вычисленной половине длины волны. Это целиком согласуется с проведенными теоретическими выкладками.

Оценим давление в звуковой волне. Для этого оценим массу левитирующих грузиков и воспользуемся формулами из раздела 2.3.

Средний диаметр кусочков пенопласта, использованных в работе $d \approx 1,5$ мм. Плотность пенопласта ρ составляет $\rho = 16,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Таким образом, приблизительная масса одного кусочка пенопласта составляет:

$$m = \rho V = \rho \frac{1}{6} \pi d^3 = 0,00029 \text{ г}$$

Тогда минимальное давление, необходимое для удержания такого шарика в воздухе равно:

$$p_{min} = mg = 0,0029 \text{ Па}$$

Теперь мы можем сделать вывод, о том, что минимальное давление звука в нашей установке не меньше вычисленного p_{min} .

3.2.2 Наблюдение затухания

Затухание в результате поглощения звука (т. е. перехода звуковой энергии в тепловую), объясняется тем, что при умеренных частотах поглощение звука в воздухе или в воде удивительно мало.

Если бы не было расхождения в стороны, рассеяния на препятствиях и других причин затухания звуковых волн, помимо поглощения, то, например, звук громкого разговора в Ленинграде можно было бы услышать в Москве (по прошествии получаса, требующегося для пробега звуком этой дистанции) при громкости еще заметно большей порога слышимости: потеря интенсивности составила бы всего 60 дБ [5].

В ходе этого эксперимента мы изучали способность пенопластового шарика левитировать в стоячей звуковой волне в зависимости от расстояния между звукогенераторами. Для этого мы подвешивали грузик в звуковой волне, а потом медленно увеличивали расстояние между звукогенераторами, в результате чего в какой-то момент грузик переставал левитировать и падал вниз.

В другой части этого эксперимента мы сначала фиксировали расстояние между звукогенераторами, а потом подвешивали шарик в узлах звуковой волны. В ходе экспериментов были зафиксированы следующие результаты:

1. Если расстояние между звукогенераторами достаточно маленькое (порядка 3см), то шарик левитирует практически в любом узле стоячей звуковой волны. Если же расстояние большое (порядка 5-6см), то шарик может левитировать в нижних узлах звуковой волны.
2. Если расстояние между звукогенераторами слишком большое (порядка 10см), то шарик вообще не левитирует.

Полученные результаты подтверждают тот факт, что звуковая волна действительно затухает.

4. Результаты работы

Различные методы физической левитации используются уже давно и по мере развития техники они становятся все более и более распространенными в самых разных сферах. Существует множество перспективных проектов, основанных на том или ином способе левитирования. Возможно, уже в ближайшем будущем в каждом городе появятся поезда на магнитной подушке, левитирующие лифты,двигающиеся не только вверх и вниз, но и по горизонтали; парящие диваны и кресла, зависшие в воздухе без опоры аквариумы и вазы. Быть может, именно левитация поможет нам в изучении других планет или самых отдаленных морских глубин, а транспорт на магнитной подушке станет более комфортной и экологически чистой заменой уже существующим сейчас средствам передвижения. Научный прогресс стал столь стремительным, что мы давно перестали удивляться бесконечным техническим новинкам. Однако всегда следует помнить, что именно мы, увлеченные своим делом люди, двигаем его вперед. Поэтому не стоит останавливаться на достигнутом, мириться с невозможным; ведь невозможное – возможно, а возможным его делам мы.

В данной работе была рассмотрена акустическая (звуковая) левитация, способность веществ левитировать, благодаря звуковой волне, а также возможность переноса вещества с помощью левитации.

Акустическая левитация небольших объектов считается перспективной для ряда особо чистых производств, типа той же электроники. Там часто нужно перемещать по производственному помещению фрагменты полупроводниковых небольших размеров. Любые твёрдые манипуляторы могут повредить фрагмент или занести на него пыль — еще до того, как на него нанесут защитное покрытие. Звуковая левитация поможет избежать этого. Как полагают исследователи, их новый подход к левитации позволяет поднять в воздух объекты ещё больших размеров — вплоть до человека.

Возможно, в обозримом будущем акустическая левитация сможет заменить магнитную, которая сегодня активно применяется для создания оригинального дизайна различных устройств, в том числе акустических систем и проигрывателей винила. Не исключено, что когда-нибудь человечество увидит и мощный акустический tractor beam (как в Ascendancy), способный фиксировать и перемещать действительно крупные объекты.

В результате работы мы:

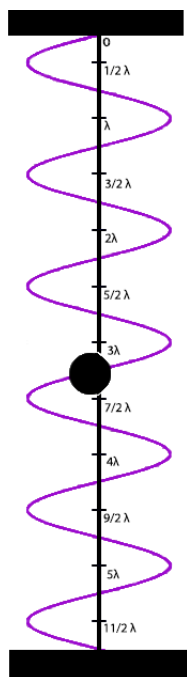
1. Сформулировали теоретическое описание наблюдаемых эффектов.
2. Собрали и запустили установку для наблюдения акустической левитации.
3. Провели ряд экспериментов, подтверждающих справедливость наших теоретических выкладок.

5. Список литературы

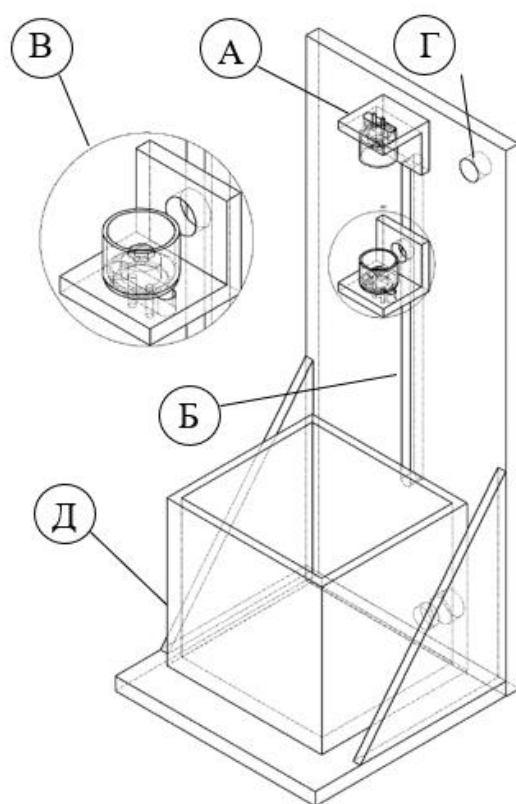
1. Т.И. Трофимова Курс физики: Уч. пособие. – М.: Издательский центр «Академия», 2008.
2. Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. – М.: Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1988.
3. М.А. Исакович «Общая акустика», издательство «Наука», 1973г.
4. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики (в трех томах): Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1979
5. Г.С. Горелик, «Колебания и волны, введение в акустику, радиофизику и оптику», издание второе, Государственное издательство физико-математической литературы, 1959г.
6. Акустическая левитация [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.metodolog.ru/01346/01346.html> (Дата обращения 18.01.2021)

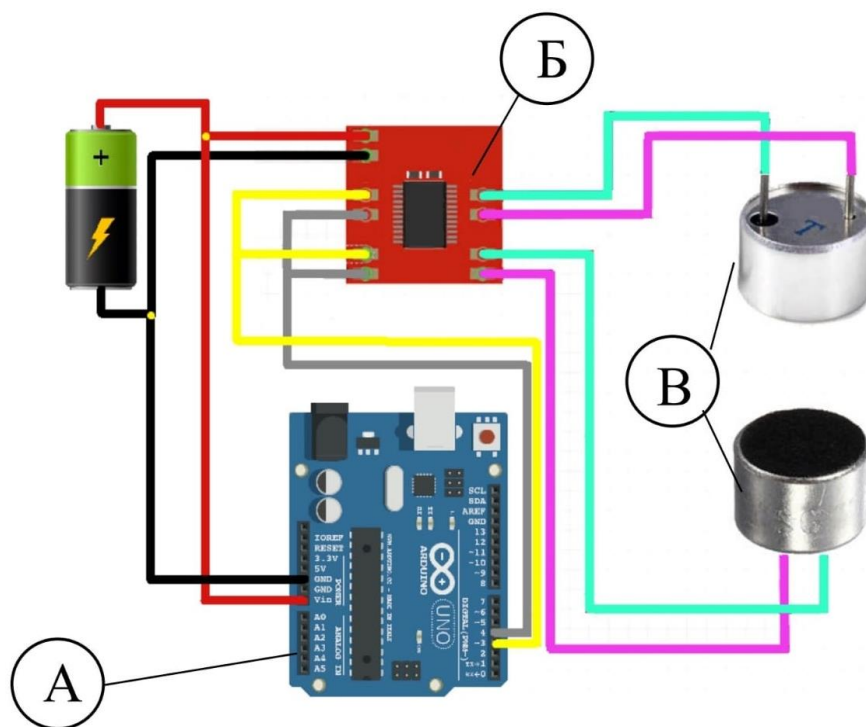
6. Приложение

Приложение 1



Приложение 2





```

volatile uint8_t portD3_D4 = 8;
void setup()
{
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);

  TCNT1 = 0;
  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;
  OCR1A = 199;
  TCCR1B = (1 << WGM12)|(1 << CS10);
  TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
}

void loop () {}

ISR (TIMER1_COMPA_vect)
{
  PORTD = portD3_D4;
  portD3_D4 = 255-portD3_D4;
}

```

