

Всероссийский конкурс учебно-исследовательских работ
старшеклассников по политехническим, естественным, математическим
дисциплинам для учащихся 9-11 классов

физика

**Наблюдение стоячих волн, образованных различными
источниками звука.**

Шорохова Кристина Сергеевна,
11 класс, МБОУ «Лицей № 1»
г. Перми

Саввина Марина Витальевна,
преподаватель физики МБОУ
«Лицея № 1» г. Перми

Пермь.2018.

Содержание

Введение.....	3
1.Что такое звук?.....	4
1.1.Звук	4
1.2.Музыкальный звук.....	4
1.3.Характеристики звука.....	5
1.3.1 Громкость звука (интенсивность).....	5
1.3.2. Тембр.....	5
1.3.3. Длительность звука.....	6
1.3.4. Высота звука (частота).....	6
1.4. Распространение звука.....	7
2. Группы музыкальных инструментов.....	8
2.1 Акустика флейты.....	9
2.2.Изготовление флейты своими руками.....	10
3. Изучение стоячих волн. Получение фигур Хладни.....	10
3.1 Исторические сведения.....	10
3.2 Понятие стоячих волн.....	12
3.3 Схожие явления.....	14
3.4 Математическое обоснование фигур Хладни.....	15
3.5 Получение фигур Хладни на поверхности воды и сыпучего вещества.....	17
3.6 Применение фигур Хладни.....	20
Заключение.....	21
Список литературы.....	22

Введение

Музыка очень многогранна. Это целый мир звуков: тиканье часов и гул моторов, шелест листьев и завывание ветра, пение птиц и голоса людей. Испокон веков наша земля была гигантской музыкальной мастерской и концертной эстрадой. В любой глуши человек пел, играл, выделял то, что свистит, гудит, гремит. Это было нужно как воздух, ибо музыка помогала ему в труде, украшала радость, облегчала печаль.

Но что же издаёт музыку? Это множество музыкальных инструментов. Я решила остановиться на группе духовых, потому что они обладают красочным многообразием звучания, которое позволяет особенно ярко воплощать любые образы – от картин природы и событий общественной жизни до тончайших оттенков человеческих переживаний. Но не только это заинтересовало меня в духовых инструментах, было интересно разобраться в их устройстве и узнать, откуда берётся звук во флейте. Действительно, сейчас, например, на флейте играет почти каждый третий ученик. Но вряд ли кто-то из них хотя бы раз задумывался, почему при нажатии клапана возникает звук и откуда он вообще берётся. А ведь при нажатии только одного клапана, тем более во время исполнения какого-либо произведения, внутри инструмента происходят сотни процессов, которые напрямую связаны с физикой. Именно поэтому, я решила рассмотреть звук флейты с точки зрения физики. Кроме того, я обучалась игре на флейте, что более привлекло меня к этой работе.

Таким образом, я поставила перед собой **цель:**

1. Выяснить значения понятий звук и музыкальный звук.
2. Понять физические основы действия духовых инструментов.
3. Разобраться в характеристиках музыкального звука.
4. Разобраться в понятиях стоячих волн, явления фигур Хладни и экспериментально получить фигуры Хладни

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи:**

1. Найти и изучить информацию о физической природе звука, о характеристиках звука, явлении акустического резонанса, об устройстве и принципах извлечения звука духовыми инструментами.
2. Исследовать условия получения звука духовыми инструментами.
4. Выяснить роль явления резонанса при звучании музыкальных инструментов.
5. Изготовить духовой музыкальный инструмент.
6. Изучить понятие стоячих волн.
7. Изучить явление фигур Хладни.
9. Получить фигуры Хладни на поверхности воды и сыпучего вещества.

Методы исследования:

1. Изучение литературы по данной теме.
2. Изготовление духового инструмента своими руками.
3. Получение фигур Хладни.
4. Обобщение информации по данной теме.

1. Что такое звук?

1.1 Звук

О том, как рождаются звуки, и что они собой представляют, люди начали догадываться очень давно. Замечали, к примеру, что звук создают вибрирующие в воздухе тела. Ещё древнегреческий философ и учёный-энциклопедист Аристотель, исходя из наблюдений, верно, объяснил природу звука, полагая, что звучащее тело создаёт попеременное сжатие и разрежение воздуха. Так, колеблющаяся струна то уплотняет, то разрежает воздух, а благодаря упругости воздуха эти чередующиеся воздействия передаются дальше в пространство – от слоя к слою, возникают упругие волны. Волны - возмущения, распространяющиеся с конечной скоростью в пространстве и несущие с собой энергию без переноса вещества. А упругие волны – это механические возмущения, распространяющиеся в упругой (твёрдой, жидкой или газообразной) среде.[1] Достигая нашего уха, они воздействуют на барабанные перепонки и вызывают ощущения звука. На слух человек воспринимает упругие волны, имеющие частоту в пределах примерно от 16 Гц до 20 кГц (1 Гц - 1 колебание в секунду). В соответствии с этим упругие волны в любой среде, частоты которых лежат в указанных пределах, называют звуковыми волнами или просто звуком. Упругие волны с частотой меньше 16 Гц называют инфразвуком, а волны, частота которых превышает 20 кГц – ультразвуком[18]

1.2 Музыкальный звук

Какими бы разными не были музыкальные инструменты по форме, устройству, размерам, все они создавались для одной цели: извлечения приятных для слуха музыкальных звуков. Что же такое музыкальный звук? С точки зрения физики – это волна, то есть процесс распространения колебаний от точки к точке, от частицы к частице. Упругое тело, выведенное из положения равновесия, совершает гармонические колебания, они передаются воздуху, воздушная волна воздействует на нашу барабанную перепонку, и мы слышим звук.[17]

Звуки бывают очень разные. Те, что создают постоянный фон, не организованные в стройную систему, не связанные между собой, и те, что обладают особыми свойствами: чистые, звонкие, определённой высоты, обладающие смысловой выразительностью, - звуки музыкальные. Издают их музыкальные инструменты, звуковая волна в которых возникает от колебаний струны или столба воздуха внутри металлической или деревянной трубки.[2]

1.3. Характеристики звука

Музыкальные звуки различаются по высоте, длительности, тембру (специфической окраской, которая зависит от материала, величины и формы инструмента), способу звукоизвлечения и по динамике, то есть силе звучания.[3]

1.3.1. Громкость звука (интенсивность)

Если исполнить музыкальное произведение от начала до конца на одном уровне громкости, оно много потеряет в своей выразительности. Если бы инструменты не могли изменять громкость звука, музыка вряд ли могла бы выражать тончайшие оттенки чувств.

Для измерения громкости в физике пользуются единицами, называемыми фонами (децибелами):

$$n_{\text{фонов}} = 10 \lg I' / I,$$

где I' и I — интенсивности звуков. Говорят: громкости I' и I различаются на n фонов, или на n децибел (дБ). [5]

Шкала громкости: порог слышимости — 0 дБ, шепот — 20 дБ, нормальная речь — 40 дБ, крик — 80 дБ, большой оркестр — 100 дБ, боль в ушах — 180 дБ.

Музыкальные термины, которые определяют степень громкости исполнения музыки, называют динамическими оттенками (от греческого слова — силовой, т.е. сила звука). [17]

1.3.2. Тембр

Музыка способна выразить всё. Ей доступны и движения мысли, и любое чувство, и малейший оттенок настроения. Желание человека располагать большим выбором музыкальных голосов и вызвало к жизни многообразие инструментов. И если один инструмент не может что-то передать, то это делает другой. Но как удаётся различить звук взятый, например, на скрипке, от звука точно такой же высоты, взятого на флейте? Это зависит от тембра. Объясняется различие тембра тем, что в обычных звуках присутствуют колебания разных наборов частот и амплитуд. [7]

Колебания самой низкой частоты в этом наборе служат основным тоном. Их амплитуда самая большая. Все остальные колебания называют обертонами. Отдельно мы не слышим обертонов, но именно они, смешиваясь с основным тоном, образуют тембр.[9]

Количество и качество обертонов зависит от длины, толщины и материала струны, от длины и среднего размера инструмента, от материала, из которого он сделан. Влияет на тембр и форма инструмента.[17]

1.3.3. Длительность звука

Если быстро ударить пальцем по клавише, получится отрывистый, очень короткий звук. А если нажать на нее и держать, то звук получится значительно более долгий, постепенно угасающий. Длительность звучания зависит от продолжительности колебаний источника звука.

Флейтист выдувает струю воздуха на переднюю кромку амбушюрного отверстия (Амбушюр - положение губ при игре на духовых инструментах, а также отверстие, в которое дуют). Давление внутри ротовой полости флейтиста выше атмосферного давления (обычно 1 кПа: это примерно 10 см водяного столба). [8]

Энергия, потраченная на ускорение воздушной струи, является источником энергии для создания звука в инструменте. Флейтист выдувает ее непрерывно, по аналогии с электричеством, можно сказать, что это энергия постоянного тока. Создание звука, тем не менее, требует колебательного движения воздушной струи, это аналогично переменному току. Во флейте воздушная струя вместе с резонансами колонки воздуха в инструменте, создают колебания воздушного потока. В свою очередь вибрирующий воздух во флейте излучает свою энергию в виде звука. Значительно больше количество энергии теряется на трении воздуха. Когда звучит нота, эта потеря энергии постоянно восполняется энергией потока воздуха. Колонка воздуха во флейте значительно легче вибрирует (резонирует) на определенных частотах. Такие частоты называют резонансными. Эти частоты, в первую очередь, зависят от длины колонки воздуха, и от направления и скорости, выдуваемой флейтистом, струи воздуха. Таким образом, флейтист задает высоту звука, нажимая комбинацию клапанов, и работой амбушюром.[2,358]

1.3.4. Высота звука (частота)

Стандарты для высоты тона предложены всего поколения три назад, а общеприняты в течение едва ли 25 лет. Как правило, для физиков стандартной высотой тона является "до" первой октавы — 256 колебаний в секунду (С-256). Большинство знает, что музыкальные инструменты настраиваются на определенный звук средней октавы (например, "ля" имеет частоту 426,6 Гц, или 426,6 колебания в секунду).[10]

В музыкальных кругах использовались различные стандарты. Концертная высота тона, которой сейчас редко пользуются, составляла 271 колебание в секунду, что дает для "ля" около 450 Гц, т.е. тон слишком высокий. Международный стандарт высоты тона составлял для "ля" 435 Гц, однако в настоящее время во всем мире (вслед за Американской федерацией музыкантов) принята стандартная высота для "ля" 440 Гц. Это ниже концертной высоты тона, однако, и при таком стандарте спеть арии, сочиненные старыми мастерами, могут не все сопрано.[3,15]

1.4. Распространение звука

Звук может распространяться в виде продольных и поперечных волн. В газообразной и жидкой среде возникают только продольные волны, когда колебательное движение частиц происходит лишь в том направлении, в каком распространяется волна. В твёрдых телах, помимо продольных, возникают также и поперечные волны, когда частицы среды колеблются в направлениях, перпендикулярных к направлению распространения волны.

Так, ударяя по струне перпендикулярно её направлению, мы заставляем бежать волну вдоль струны.[13]

Звуковые волны несут с собой энергию, которую сообщает им источник звука. Величину кинетической энергии, протекающей за одну секунду через один квадратный сантиметр поверхности, перпендикулярной направлению волны, вычислил русский учёный Н.А. Умов. Эту величину назвал потоком энергии. Она выражает меру интенсивности, или, как говорят, силы звука. Чтобы вызывать звуковое ощущение, волна должна обладать некоторой минимальной интенсивностью. Величину её называют порогом слышимости.

Звуковые волны распространяются со скоростью. Скорость звука есть не что иное, как скорость распространения упругих колебаний в твёрдой, жидкой и газообразной среде. Скорость звука можно вычислить по формуле:

$$c = \lambda \nu$$

где c – скорость звука, λ - длина волны, ν - частота колебания. В газах скорость звука меньше чем в жидкостях, а в жидкостях меньше чем в твёрдых телах.

Звуковые колебания, переносимые звуковой волной, могут служить вынуждающей, периодически изменяющейся силой для колебательных систем и вызывать в этих системах явление резонанса, т.е. заставить их звучать. Такой резонанс называют акустическим резонансом. Например, устройство для получения чистого тона, т.е. звука одной частоты, камертон сам по себе даёт очень слабый звук, потому что площадь поверхности колеблющихся ветвей камертона, соприкасающейся с воздухом, мала и в колебательное движение приходит слишком мало частиц воздуха. [12]Поэтому камертон обычно укрепляют на деревянном ящике, подобранном так, чтобы частота его собственных колебаний была равна частоте звука, создаваемого камертоном. Благодаря резонансу стенки ящика тоже начинают колебаться с частотой камертона. Это колебания большой амплитуды (резонанс), да и площадь поверхности ящика велика, поэтому звук камертона оказывается значительно более громким. Ящик так и называют - резонатор. В музыкальных инструментах без резонаторов тоже нельзя обойтись. Ими служат деки. Без них, от одних струн, звуки были бы почти не слышны. Полость рта человека - тоже резонатор для голосовых связок.[4,50]

2. Группы музыкальных инструментов

Музыкальные инструменты — предметы, с помощью которых извлекаются различные музыкальные, а также немusикальные неорганизованные звуки для исполнения произведения.

Их можно разделить по разному принципу. По материалу, из которого они изготовлены, например медные или деревянные. По способу извлечения звука, например щипковые, смычковые, клавишные. Но меня интересует разделение по принципу источника звука.

В разных музыкальных инструментах свой источник звука. В струнных инструментах - колебания струн. Духовые инструменты, представляющие собой деревянные, металлические и иные трубки различного устройства и формы, издают музыкальные звуки в результате колебаний заключённого в них столба воздуха. В ударных музыкальных инструментах звук извлекается ударом молоточков, колотушек, палочек и т. п. по звучащему телу мембране, металлу, дереву и др.[14]

Клавишные музыкальные инструменты — инструменты, извлечение звука в которых осуществляется при помощи системы рычагов и управляется при помощи клавиш, расположенных в определённом порядке и составляющих клавиатуру инструмента.

Когда звучит флейта, то вибрация не наблюдается ни визуально, ни на ощупь. Чтобы понять, как возникает звук в духовом инструменте, нужно поднести звучащую флейту к пламени свечи. Пламя отклонится, так как из флейты выходит воздух.

Таким образом, можно установить, что при звучании струнных и ударных инструментов источником звука является колеблющаяся струна или другое тело. Звучание духовых инструментов происходит благодаря движению столба воздуха в трубке инструмента.

Высота звука определяется частотой колебаний. В ударных инструментах она задаётся размером и формой самого инструмента, и изменяться уже не может. В струнных инструментах высота звука определяется длиной и толщиной струны и изменяется при зажатии струны.

В духовых инструментах высота определяется длиной звучащей трубки. Звуки одной и той же частоты, извлекаемые разными инструментами, отличаются тембром.

Явление резонанса может быть использовано для усиления звучания музыкального инструмента. В духовых инструментах используется такой прием как вибрато – это периодические изменения высоты, громкости или тембра музыкального звука. В духовых инструментах и у вокалистов – пульсацией воздушного давления.

Резонанс используется, главным образом, для усиления звучания и формирования нужного тембра.

Духовые музыкальные инструменты являются резонаторами, снабжаемыми приспособлениями для изменения их резонирующей

способности, по желанию играющего на них музыканта. На флейте резонаторами являются отверстия в клапанах.

Музыкальные инструменты различных народов и эпох ярко демонстрируют нам важнейшую роль резонаторов как усилителей звука. Эолова арфа, изобретение которой приписывается монаху-иезуиту Атанасиусу Кирхеру (1601-1680), обладавшая нежным, но весьма слабым звуком, получила пропуск на сцены музыкальных театров, лишь приобретя резонатор.

Наиболее яркой аналогией голосовому аппарату певца служат духовые музыкальные инструменты.

Во-первых, все духовые инструменты, их корпуса - это и есть, прежде всего, резонаторы, звуковысотными свойствами которых управляет музыкант путем либо изменения длины резонатора (медные, тростевые), либо выбора той или иной звучащей трубы-резонатора, как в органах.

Во-вторых, возбудитель тона в духовых, как в язычковом органе, или в медных трубах (губы трубача) и, тем более, в деревянных (гобой, фагот), находится в сильной зависимости от корпуса-резонатора данного инструмента. Так, в гобое и фаготе язычок-возбудитель сам по себе может издавать практически лишь один высокий тон. Однако под действием резонатора инструмента (настраиваемого музыкантом на разные тоны в процессе игры путем изменения его длины нажатием клавиш) язычок издает разные тоны, высота которых продиктована резонатором-инструментом.

Это очень важное свидетельство сильнейших обратных влияний резонатора на колебания вибратора, что несомненно имеет место в определенной мере и в голосовом аппарате человека.[5,51]

2.1. Акустика флейты.

По способу звукоизвлечения флейта относится к лабиальным инструментам. Флейтист выдувает струю воздуха на переднюю кромку амбушюрного отверстия. Поток воздуха из губ музыканта пересекает открытое амбушюрное отверстие и ударяется о внешнюю его кромку. Таким образом, струя воздуха разделяется примерно пополам: внутрь инструмента и наружу. Часть воздуха, попавшая внутрь инструмента, создаёт звуковую волну (волну сжатия) внутри флейты, распространяется до открытого клапана и частично возвращается назад, вызывая резонанс трубки. Часть воздуха, попавшая наружу инструмента, вызывает лёгкие призвуки типа шума ветра, которые при правильной постановке слышны лишь самому исполнителю, но становятся неразличимы на расстоянии нескольких метров.

Высота звука меняется с помощью изменения скорости и направления подачи воздуха опорой (мышцами брюшного пресса) и губами, а также аппликатурой.

В силу акустических особенностей флейта имеет тенденцию понижать строй при игре на пиано (особенно в нижнем регистре) и повышать строй при игре на форте (особенно в верхнем регистре). На интонацию имеет влияние и

температура помещения — более низкая температура понижает строй инструмента, более высокая, соответственно, повышает.[9]

Настраивают инструмент с помощью выдвижения головки из тела инструмента (чем сильнее выдвинуть головку, тем длиннее и, соответственно, ниже становится инструмент). Этот способ настройки имеет свои недостатки по сравнению со струнными или клавишными инструментами — при выдвижении головки расстраиваются отношения между отверстиями инструмента и октавы перестают строить между собой. При выдвижении головки больше чем на сантиметр (что понижает строй инструмента почти на полутон) звук флейты меняет тембр и становится похожим на звук деревянных барочных инструментов.[4]

2.2.Изготовление флейты своими руками

Я изготовила духовой музыкальный инструмент своими руками – это флейта. Для ее создания мне понадобилось: ПВХ (полимерная) труба с внутренним диаметром примерно 16-17мм.; линейка; карандаш; дрель с тремя разными сверлами; специальный нож для полимерной резки; кусок пробкового дерева.

Флейта представляет собой трубку с рядом отверстий в ней. А чтобы она могла издавать правильные звуки, необходимо следовать определенной схеме для ее изготовления. На данной флейте можно извлекать звуки в двух октавах.

Кроме того, я вычислила частоту для ноты, которая соответствует первому закрытому отверстию, используя формулу:

$$v = \frac{v}{2l}$$

Получила, частоту равную примерно 698, что приблизительно (с учетом погрешностей) соответствует частоте ноты фа второй октавы. Сравнила звучание этой ноты на самодельной флейте со звучанием фа на другом инструменте (большой поперечной флейте) и убедилась том, что эта нота, действительно, фа.

Вывод: флейта сделанная своими руками не противоречит законам физики. Действительно, длина волны во флейте равна $\frac{1}{2}$ длины действующей части столба воздуха во флейте.

3. Изучение стоячих волн. Получение фигур Хладни.

3.1 Исторические сведения.

Киматика — наука, изучающая видимый звук и вибрацию. Обычно производится вибрация поверхности пластинки, диафрагмы или мембраны, и области максимального и минимального смещений видимо проявляются на тонком слое частиц, мастики или жидкости.

Ярким и занимательным примером явлений, изучаемых киматикой, являются, например, фигуры Хладни. Эрнеста Хладни по праву считают отцом экспериментальной акустики. Наибольшую известность принесли Хладни опыты по исследованию колебаний пластин с помощью открытого им метода акустических, или звуковых «фигур», которые произвели огромное впечатление на современников. Хладни наглядно показал, что узловые линии наблюдаются не только на струне, но и существуют на пластинках и мембранах. В 18 веке был введен термин «акустика» - науке о звуке, изучающей физическую природу звука и проблемы, связанные с его возникновением, распространением, восприятием и воздействием. Томас Юнг, дал наглядное объяснение теории волнового движения. Им было замечено, что если струну возбуждать щипком или смычком на различном расстоянии от конца, то тембр струны будет в некоторой степени меняться: чем ближе к одному из концов находится точка возбуждения струны, тем более яркий и более блестящий, более живой и резкий оттенок звука. Дело в том, что при изменении точки возбуждения струны изменяется состав сложного звукового колебания струны. А именно, когда возбуждается какая-либо точка струны, то все высшие гармоники, имеющие в этой точке узел, исчезают из звука. Можно сказать по другому: в звуке струны остаются только те гармоники, которые имеют пучность в точке возбуждения. Например будем зашипывать струну ровно в середине, тогда вторая гармоника, имеющая в середине струны узел, не возбуждается. В действительности дело обстоит сложнее и в реальном звуке струны можно все же обнаружить вторую гармонику, но сильно ослабленную.

Огромное влияние на развитие музыкальной акустики оказало обоснование Жаном Фурье (1768-1830) теоремы, утверждавшей, что любую форму колеблющейся струны возможно представить бесконечной суммой синусоид. Теорема Фурье позволяла сложное колебание струны представить отдельными простыми колебаниями. Теория колебаний гибкой мембраны, важная для понимания природы звуков, издаваемых барабаном, впервые была с успехом рассмотрена французским математиком С. Д. Пуассоном (1781-1840) в 1829 году, хотя он и не сумел до конца решить задачу о колебании круглой мембраны. Пуассону принадлежит честь установления двух видов волн в твердых телах достаточно большого размера: поперечных и продольных. Эта работа, посвященная исследованию изотропных (то есть имеющих одинаковые свойства в любых направлениях) упругих тел, была по достоинству оценена лишь век спустя, когда стали заниматься изучением распространения волн в конструкциях: в деталях корпусов музыкальных инструментов, машинах. [11]

Экспериментальными исследованиями продольных волн в пластинках почти в то же самое время (1827) занимался француз Феликс Савар (1791-1841). В экспериментах им использовался метод песчаных фигур Хладни. Савар наблюдал любопытное явление. Он закреплял круглую пластинку, например в центре, и возбуждал ее смычком. Узловые линии, указываемые песком, располагались так, что смычок оказывался по центру вибрирующего сегмента. Любопытное начиналось после того, как прекращалось воздействие смычка на пластинку, - система узловых линий, оставшаяся неподвижной во время действия смычка, начинала вдруг медленно колебаться или даже вращаться. Объяснение явлению было дано позже, и заключилось оно в том, что вращение узловых линий может быть только на неоднородной пластинке. Неоднородности вызывают перераспределение колеблющихся частей пластинки после прекращения возбуждения.[18]

3.2 Понятие стоячих волн.

Стоячая волна – особого вида интерференционная картина, которая получается в том случае, если две когерентные и одинаковые по интенсивности волны распространяются навстречу друг другу. Наложение таких волн происходит, когда волна падает на хорошо отражающие препятствия перпендикулярное к направлению ее распространения. По закону отражения отраженная волна будет распространяться навстречу падающей и будет почти равна ей по интенсивности, если препятствие почти полностью отражает волну.

Когерентность прямой и обратной волн обеспечена тем, что они представляют собой более раннюю и более позднюю одной и той же волны. Стоячие волны можно получить в шнуре. Волна отражается от закреплённой точки шнура бежит по нему вниз, складывается с идущей навстречу волной создаваемой колебаниям руки так и получается стоячая волна. Неподвижные места называется узлами, а места наибольшей амплитуды колебаний - ее пучностями. Расстояние между двумя узлами равно половине длины волны. Чем быстрее мы колеблем нижний конец шнура, тем больше узлов и пучностей укладывается на шнуре. Штриховыми и штрихпунктирными линиями изображены две волны, бегущие друг другу навстречу. Помещенные в один под другим рисунки дают картину процесса через каждую восьмую часть периода. За это время бегущие волны передвигаются навстречу друг другу вдоль прямой АВ взята на одну восьмую длины волны. В каждой точке прямой АВ взята алгебраическая сумма отклонений от АВ(+ вверх, - вниз), и полученные таким путем точки соединены друг с другом сплошной линией. [14]

Сплошная кривая изображает результат сложения обеих бегущих волн. Если проследить от рисунка к рисунку, как ведет себя сплошная кривая, то мы увидим, что в точках отмеченных светлыми кружками, она все время проходит через положение равновесие, т.е. здесь колебаний нет – это узлы стоячей волны. В промежутках между узлами, наоборот, получаются пучности, наибольший размах колебаний. Все точки, лежащие между двумя соседними узлами, колеблются в одинаковой фазе, но при переходе из одного промежутка между узлами к следующему фаза меняется на 180° . Стоячие волны могут образовываться и в упругих телах. Главным основанием для этого служит следующее: переноса энергии в стоячей волне нет, энергия остается на месте переходя из кинетической в потенциальную, и обратно. Здесь происходит гармонические колебания частиц тела происходящие с известной частотой, определяемой размерами и свойствами данного тела, причем отдельные участки этого тела колеблются с различными амплитудами. [13]

Колебания упругих тел представляют собой стоячие волны в этих телах. Стоячие волны могут образовываться в телах любой формы, а не только в таких сильно удлинённых телах, как струна или шнур. Неподвижные места стоячей волны – ее узлы представляют собой поверхности, пересекающие объем тела на участки, в середине которых наиболее сильны колебания (пучности). Т.е. представляет собой пластинку (плоскую или изогнутую). Узловые поверхности можно считать узловыми линиями. Колебание упругих тел как стоячие волны. Каждая из двух одинаковых бегущих волн, образующих стоячую волну, переносит энергию в направлении своего распространения. Так как эти направления противоположны друг другу, то в результате переноса энергии в стоячей волне нет. Энергия остается на месте, переходя из кинетической в потенциальную и обратно (это и является главным основанием, чтобы называть такую волну «стоячей»). [17]

При колебаниях камертона или зажатой в тиски пластинки мы имеем дело с гармоническим колебанием частиц тела, происходящим с известной частотой, определяемой размерами и свойствами данного тела, причем отдельные участки этого тела колеблются с различными амплитудами. Правда, в случае колеблющейся пластинки мы наблюдали лишь одну точку, остававшуюся в покое («узел» располагался у зажатого конца пластинки), в то время как при колебаниях шнура может образоваться много узлов. Однако, камертон и пластинку можно заставить колебаться с большей частотой, так что на них образуется несколько узлов.

Между упругими колебаниями тела и стоячими волнами в теле нет различия: колебания упругих тел представляет собой стоячие волны в этих

телах. Получая стоячие волны на шнуре, мы поддерживали эти волны извне движением руки. Другими словами, это были вынужденные колебания, их частота была навязана нашим воздействием и равнялась частоте этого воздействия. Но стоячие волны могут быть и свободными. Ударяя камертон, колокол, обыкновенный стакан, оттягивая и затем, отпуская упругую пластину или натянутую струну, мы возбуждаем колебания, представляющие собой именно свободные стоячие волны и получить и наблюдать такие волны, - на колебаниях натянутой струны. [16]

Пучность — участок стоячей волны, в котором колебания имеют наибольшую амплитуду. Противоположностью пучности является **узел** — участок волны, в котором амплитуда колебаний минимальна.[18]

3.3 Схожие явления

Фигуры Лиссажю — замкнутые траектории, прочерчиваемые точкой, совершающей одновременно два гармонических колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Впервые изучены французским учёным Жюлем Антуаном Лиссажу. Вид фигур зависит от соотношения между периодами (частотами), фазами и амплитудами обоих колебаний.. Если периоды обоих колебаний неточно совпадают, то разность фаз всё время меняется, вследствие чего эллипс всё время деформируется. При существенно различных периодах фигуры Лиссажу не наблюдаются. Однако, если периоды относятся как целые числа, то через промежуток времени, равный наименьшему кратному обоим периодам, движущаяся точка снова возвращается в то же положение — получаются фигуры Лиссажу более сложной формы. Фигуры Лиссажу вписываются в прямоугольник, центр которого совпадает с началом координат, а стороны параллельны осям координат и расположены по обе стороны от них на расстояниях, равных амплитудам колебаний.

Зыбь — волны на поверхности жидкости (главным образом, — воды на поверхности водоёмов), образующиеся из ветровых волн после прекращения действия ветра или после выхода ветровых волн из района воздействия ветра в область, где ветер имеет значительно меньшую скорость или отсутствует; слабо связанные с ветром относительно длинные волны. Волны зыби имеют другие параметры, чем ветровые.[7]

Тесно связаны с зыбью слова в наименованиях отдельных, опасных участков территорий с мнимо-устойчивой поверхностью, например, зыбучие пески или зыбкое место — топь.

Рябь — мелкое волнение на поверхности неглубокого водоёма. Появляется из-за ветра над поверхностью воды. В большинстве случаев заметна только при разглядывании отражения объекта. [15]

3.4 Математическое обоснование фигур Хладни.

В феврале 1809 года в дворце Тюильри, официальной резиденции императора Наполеона Бонапарта, в присутствии императора с супругой его матери, ученых Лапласа и Бертоле и других зрителей Хладни продемонстрировал свои эксперименты. Имеются [2, 5] записи самого Хладни об этой демонстрации. Наполеон был настолько восхищен увиденным, что на следующее утро распорядился выдать Хладни 6000 франков для перевода на французский язык и публикации его немецкой книги [2]. Этот заказ был быстро выполнен, причем, по совету Лапласа, Хладни попросил разрешения у Наполеона посвятить книгу императору – воистину, политика иногда непредсказуемым образом влияет на науку. В качестве приложения в книге на 14 страницах приведен протокол заседания отделений математических и физических наук и изящных искусств французской Академии наук [1, с. 353–357], в котором дана развернутая оценка экспериментов Хладни.

Наполеон установил приз в 3000 франков за разработку математической теории колебаний пластин и теоретическому описанию фигур Хладни –узловых линий колеблющихся пластин. Следуя этому, отделение математических и физических наук также установила приз в виде золотой медали стоимостью 3000 франков за создание такой теории и сравнение результатов с экспериментами с конечной датой подачи материалов к октябрю 1811 года [1, с. 353–357]. После нескольких попыток решения и последовавших жарких дискуссий [7] приз в 1816 году был присужден.

Софи Жермен в знак существенного прогресса в этой проблеме, хотя окончательное уравнение для изгибных колебаний пластинки оказалось неточным (Лагранж, будучи членом жюри, указал, как исправить ошибку)

В последующие 200 лет фигуры Хладни экспериментально воспроизводились и классифицировались в большом количестве исследований.

Статья Ритца [3], рис. 6 (увы, последняя в его недолгой, но яркой жизни), содержала изумительный по ясности теоретического изложения и количеству числовых данных анализ спектра собственных частот и форм колебаний квадратной пластинки со свободными краями и сравнение с экспериментами Хладни. Надо отметить, что подход, основанный на приравнивании максимальных амплитудных значений за период при выбранной заранее форме колебаний был впервые применен для определения низшей собственной частоты изгибных колебаний квадратной пластинки со свободными краями при

нулевым коэффициенте Пуассона Рэлеем [16], вполне оценившим трудность этой задачи. Впоследствии он получил название метода Рэля и полностью воспроизведен в его классическом сочинении [17, § 226]. Статьи [18] содержат интересную дискуссию относительно названий методов Рэля и Ритца применительно к вариационному подходу. Впервые используя вариационный алгоритм для исследования колебаний квадратной пластинки со свободными краями, Ритц [3] обратил внимание на важное обстоятельство, ускользнувшее от внимания практически всех других исследователей (кроме Рэля [18]), и сделал предположение о том, что собственные формы колебаний пластинки достаточно надежно описываются комбинациями $u_m(x)u_n(y) \pm u_n(x)u_m(y)$, в которых $u(x)$ – собственные функции упругого стержня со свободными краями. В последующие годы задача о колебаниях пластины со свободными краями была предметом исследований многих авторов.

Цель данного исследования состоит в раскрытии всех преимуществ метода суперпозиции на основе анализа соответствующей бесконечной системы линейных алгебраических уравнений, а также в классификации и оценке точности первых 30 собственных частот и форм, найденных Ритцем.

Представленный новый алгоритм [12] позволил с высокой точностью определить собственные частоты колебаний пластинки и построить фигуры Хладни. Впервые получено явное аналитическое представление для собственных форм колебаний пластинки. В отличие от использовавшихся ранее подходов, для собственных частот построена двойная оценка, которая дала возможность указать величину погрешности в полученных значениях собственных частот. Соответствие результатов численного моделирования и экспериментальных данных свидетельствует об эффективности предложенного подхода. На основе полученного точного решения задачи о собственных частотах и формах колебаний пластинки со свободными краями проведено сравнение с решением Ритца, позволившее сделать следующие выводы:

1. Подтверждено блестящее предположение Ритца о том, что собственные формы пластинки могут быть описаны в виде комбинаций собственных функций стержня.

2. С увеличением частоты колебаний (и порядкового номера собственной формы) точность приближения падает, из-за чего у Ритца взаимное расположение некоторых соседних форм оказалось перепутанным.

3. В ряде фигур Хладни для приближенного решения имеются прямые линии, хотя эксперименты дают некоторое их искривление. Сам Ритц объяснял этот факт погрешностью эксперимента. Точное решение задачи показывает, что кривизна действительно должна наблюдаться.

3.5 Получение фигур Хладни на поверхности воды и сыпучего вещества.

Я решила получить фигуры Хладни на поверхности сыпучего вещества и воды. Для этого мне потребовались: динамик, жестяные крышки, манная крупа, вода.

В данном эксперименте я расположила корпус с динамиком на ровной поверхности. На поверхность динамика я насыпала тонким слоем манную крупу. Далее подключила динамик к звуковому генератору. Поэтапно возбуждала динамик на различных частотах и наблюдала за получаемой картиной узлов и пучностей из крупы. Образование картины происходило примерно от 30 сек до 3 мин.

Фигуры получались в диапазоне 190-5000Гц. Когда частота ниже 290Гц динамик начинал сильно вибрировать.

Крупа “прыгала” по поверхности, впоследствии рисунок не складывался. Если частота выше 5000Гц, то изображение не сложится, из-за того что плотность пластины будет слишком высокой для частоты.

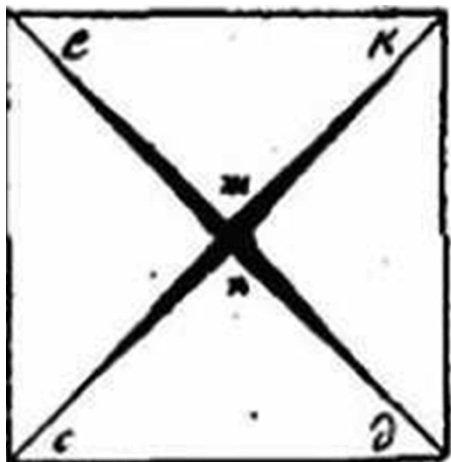
Кроме того, я наливала воду в жестяную крышку и ставила ее на динамик. В диапазоне от 40 до 120 Гц. Мной были замечены волны, которые образовывались на поверхности воды.

В ходе эксперимента было проверено соответствие фигур, полученных Хладни при частотах, которые указаны в таблице и показано, что полученные мной картины узлов и пучностей приблизительно схожи с фигурами Хладни. Если при частоте, при которой фигура Хладни для пластины должна образовываться, не образуется соответствующая (например, для симметричной пластины не образуется симметричная фигура) фигура, то можно говорить о наличии дефектов в пластине, что может быть использовано в прецизионном производстве в качестве метода не разрушающего контроля.

Вывод: полученные мной картины узлов и пучностей похожи, на математически обоснованные фигуры Хладни.

Некоторые из полученных мной фигур Хладни и сравнение их с фигурами, имеющими математическое обоснование:

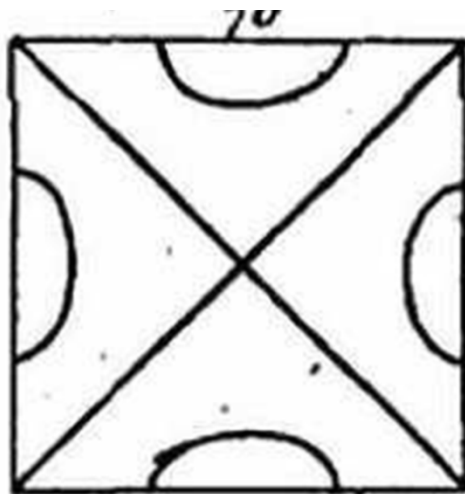
1) $\nu = 254$ Гц



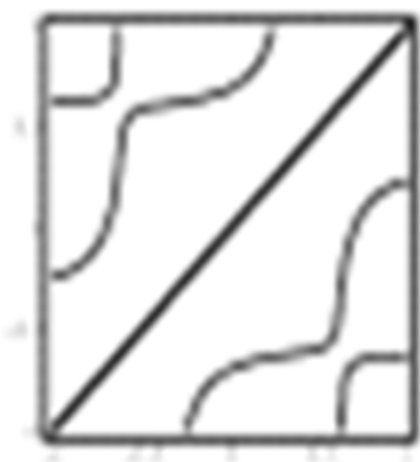
2) $\nu = 290$ Гц



3) $\nu = 1000$ Гц



4) $\nu=40 \Gamma\mu$



5) $\nu=80 \Gamma\mu$



6) $\nu=100 \Gamma\mu$



3.6 Применение фигур Хладни.

Фигуры Хладни применяются для изучения собственных частот диафрагм телефонов, микрофонов, громкоговорителей. Фигуры Хладни используются в дефектоскопии (топографический метод) для исследования изделия в целом (например, пластинки или оболочки).

Образование стоячей волны важно в конструировании музыкальных инструментов. Например, есть фигуры Хладни для корпуса гитары.

Также применение этому стали развивать художники, дизайнеры и прочие любители-энтузиасты, уловившие здесь несомненную эстетическую красоту и чуть ли не безграничный потенциал для творчества. Фигуры, порождаемые с помощью звука, демонстрируют удивительное разнообразие форм и гармоничность пропорций.[6,25]

Заключение

Звучание духовых инструментов происходит благодаря движению столба воздуха в трубке инструмента.

Громкость звука определяется амплитудой колебаний. В разных инструментах громкость меняется схожим образом: чем сильнее воздействие на источник звука, тем громче звук.

Высота звука определяется частотой колебаний. В ударных инструментах она задаётся размером и формой самого инструмента, и изменяться уже не может. В струнных инструментах высота звука определяется длиной и толщиной струны и изменяется при зажатии струны. В духовых инструментах высота определяется длиной звучащей трубки.

Резонанс усиливает звучание музыкального инструмента. Корпус инструмента играет роль резонатора.

Изменение возбуждаемой частоты в динамике влечет за собой изменение картины узлов и пучностей. С увеличением частоты число пучностей и узлов увеличивается, и изображение становится более сложным.

В ряде фигур Хладни для приближенного решения имеются прямые линии, хотя эксперименты дают некоторое их искривление

Сколько сил нужно потратить, чтобы превратить колебания воздуха в чудесный звук! Музыканты, играющие на музыкальных инструментах, вкладывают душу и весь опыт, накопленный годами, в свои творения. Мы можем только восхищаться, как они превращают обыкновенные воздушные волны в прекрасную музыку!

С развитием музыкальной механики в синтезаторах и других современных инструментах используется все больше различных физических спецэффектов, и чем дальше будет совершенствоваться физика, тем дальше пойдет музыкальная наука.

Список литературы

1. А.П. Баранцев «Мастера игры на флейте профессора Петербургского – Ленинградской консерватории 1862-1985 г.» - Петрозаводск, 1990
2. Болотин С.В. «Энциклопедический Биографический Словарь музыкантов-исполнителей на духовых инструментах» - гл. редактор – Гехт Р.М.; изд. «Радуница», М.; 1995
3. Дмитриев Л. Б. «Основы вокальной методики» - М., 1968
4. Качмарчик В.П. «Немецкое флейтовое искусство 18-19 вв.» - Донецк, 2008 ISBN 978-966-7271-44-2
5. Кленов А.С. «Там, где музыка живет» -2-е изд. – М.; Педагогика, 1986. -152 с., ил.
6. Млешко В. В. Папков С. О Изгибные колебания упругих прямоугольных пластин со свободными краями: от Хладни (1809) и Ритца (1909) до наших дней/ В. В. Млешко С. О Папков// Акустичний вестник - 2009. -том 12, №4 С. 34 - 51
7. Платонов Н.И. – Пути развития исполнительского мастерства на флейте:
8. Сайт программы LabView – (<http://www.ni.com>)
9. Тризно Б. Флейта. – М.; Музыка, 1964
10. Усов Ю. «История зарубежного исполнительства на духовых инструментах». – М.; 1989
11. Chladni E. F. F. Entdeckungen über die Theorie des Klanges. Leipzig 1787
12. Daniel R. Aichel The science and applications of acoustics // Springer Science - Business Media - 2006 - 663 с
13. Heilmholt" Н. v., Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage for die Theorie der Musik, Braunschweig, 1863, "1913 (рус. пер. - Гельмгольц Г., Учение о слуховых ощущениях как физиологическая основа для теории музыки, СПб, 1875);
14. Henk Jan van Gerner, Martin A. van der Hoef, Deveraj van der Meer and Ko van der Weele // Physical Review E 82, 012301 – 2010
15. Marius Serban Fetea The vibration of flat plates with various boundary conditions // PhD Thesis The Technical University of Cluj-Napoca - 2009 – 15
16. Schaefer K., Musikalische Akustik, Lpz., 1902, S. 33-38; Skudrzyk E., Die Grundlagen der Akustik, W., 1954 (рус. пер. - Скучик Е., Основы акустики, т. 1-2, М., 1958-59).
17. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Резонанс>
18. <http://www.music-dic.ru/html-music-enc/r/6442.html>