

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПА ИСПОЛНЕНИЯ МУЗЫКИ НА УРОВЕНЬ БАСОВЫХ НОТ

© 2021 г. В. А. Зверев\*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук”,  
ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

\*e-mail: zverev.24@mail.ru

Поступила в редакцию 01.01.2020 г.

После доработки 13.01.2021 г.

Принята к публикации 08.02.2021 г.

Обнаружен и исследован эффект значительного (до 20 дБ) уменьшения уровня слышимости звуков рояля низкой частоты (аккомпанемента в басовом регистре) на фоне звуков высокой частоты (мелодии) при исполнении музыки в быстром темпе. Это указывает на существенное влияние темпа исполнения произведения на восприятие слушателем звукового ряда музыкального произведения. Объяснение эффекта дано на основе анализа физических особенностей формирования звуков в рояле в зависимости от темпа игры и восприятия звуков человеческим ухом. Эффект наглядно демонстрируется на примере исполнения первой части (*Allegro di molto e con brio*) сонаты № 8 до минор (“Патетической”) Бетховена.

*Ключевые слова:* слышимость низкочастотных звуков, предельно короткие звуки, затухание звука, отклик инструмента

DOI: 10.31857/S0320791921030151

### ВВЕДЕНИЕ

Это исследование началось, когда автор обратил свое внимание на то, что *Allegro* первой части Патетической сонаты Бетховена исполняется профессиональными исполнителями в темпе *Presto* — таком же самом быстром в музыке темпе с чередованием клавиш с частотой 11 Гц, как и быстрые этюды Шопена. Это заметно изменяет восприятие этой части сонаты, сравнительно с ее исполнением в темпе *Allegro*, в силу одного и весьма существенного фактора. Этот фактор состоит в том, что написанный композитором аккомпанемент в целом ряде мест сонаты при исполнении ее в темпе *Presto* сильно (почти на 20 дБ) ослабляется звучащей одновременно с ним мелодией, которая на 2 октавы выше. При исполнении этой сонаты во вдвое более медленном темпе столь заметного уменьшения уровня слышимости аккомпанемента не происходит.

Назовем этот эффект уменьшения уровня восприятия (слышимости) низкочастотных и кратковременных звуков рояля звучащими одновременно с ними звуками более высокой частоты “эффектом ослабления” (ЭО). Для его объяснения потребовалось провести специальное исследование с учетом различных особенностей и ха-

рактеристик как самого инструмента (рояля), так и человеческого слуха.

Исследование ЭО позволяет взглянуть глубже на то, как воспринимаются человеком музыкальные звуки. Существует ли объективно зависимость уровня громкости и восприятия звуков исполняемой музыки от темпа ее исполнения и, если да, то когда и как это влияет, а когда, напротив, это не оказывает никакого заметного влияния на качество восприятия исполняемой музыки?

При выполнении исследования автор исходил из физической природы человеческого слуха [1]. Упомянутая книга [1] опирается на результаты исследований по синтезу апертуры, опубликованных в *Акустическом журнале*, обзор которых приведен в книге [2].

Цель настоящей статьи — провести подробный физический анализ процесса восприятия звуков рояля слушателем с учетом всей совокупности известных физических факторов, сопровождающих этот процесс. Автор надеется, что результаты такого анализа привлекут к себе внимание не только специалистов в области музыкальной акустики, но и исполнителей музыки.

## ФИЗИКА СЛЫШИМОГО ЗВУКА

Известно, что мы способны в слышимом нами звуке определять частоты колебаний, из которых состоит звук — так называемый частотный спектр звуков [1, 3]. Но долгое время было неизвестно, как и где это происходит у слушателя.

В 1961 году Дьердь фон Бекешти был удостоен Нобелевской премии за работы по теории слуха человека, среди которых было и открытие закономерности колебаний базилярной мембраны улитки внутреннего уха при действии звука [4]. Эти закономерности приводят к тому, что колебания базилярной мембраны преобразуют поступающие сигналы в их частотный спектр, располагающийся вдоль улитки. Улитка в этом случае работает как преобразователь “частота—место” [5]. Это происходит благодаря тому, что скорость распространения колебаний вдоль базилярной мембраны зависит от частоты звука. Аналогичным свойством — дисперсией — обладают многие среды. В [6, 7] приведено описание принципа работы приборов спектрального анализа электрических сигналов, основой для которых послужили среды с дисперсией, подобные той, которая наблюдается в базилярной мембране внутреннего уха.

Колебания и волны базилярной мембраны внутреннего уха обладают сложной формой, вычисленной в [5] с хорошим приближением. Для нас важно, что в результате этих процессов на базилярной мембране образуется частотный спектр исходного колебания.

Математически эти закономерности, независимо от способа и путей образования спектра, описываются преобразованием Фурье вида:

$$q(\omega) = \int_0^T \varphi(t) \exp(-i\omega t) dt, \quad (1)$$

где  $t$  — время в секундах;  $\omega$  — круговая частота, равная  $2\pi f$ , где  $f$  — частота в герцах;  $T$  — время, определяемое как обратное от величины разрешающей способности слушателя. Слух человека обладает разрешением в  $1/r$  долю октавы, где  $r = 12$  и выше в зависимости от способности слушателя. В соответствии с вышеизложенным,  $T$  описывается формулой:

$$T \geq \frac{r}{\Delta f}, \quad (2)$$

где  $\Delta f$  — ширина спектра октавы, в которой находится звук частоты  $f$ . Далее формуле (2) придадим более простой и универсальный вид, учитывая, что  $\Delta f_N \approx f$ . С учетом (2) и того, что обратная к  $\Delta f$  величина представляет собой  $\Delta t$  — период колебаний на частоте звука  $f$ , запишем (2) в виде:

$$T \geq r\Delta t. \quad (3)$$

Таким образом, преобразование Фурье для своего осуществления слушателем требует, чтобы прошло более  $r$  колебаний данной частоты звука независимо от того, каково ее значение. Наименьшее число колебаний получается при частотном разрешении в  $1/12$  октавы или, в музыкальной терминологии, на полтона. Обычно разрешение бывает выше, люди способны различать высоту звучания звуков и на четверть тона, что уже приводит в (3) к удвоению числа периодов звука, необходимых для осуществления преобразования Фурье (1).

Уровень слышимого звука и возможности определения его частоты зависят от длительности импульса (звучащей ноты). При условии, что время импульса больше, чем  $T$ , определяемое (3), то звук слышен с уровнем, определяемым излучателем и спектральным составом, определяемым слушателем в соответствии с его возможностями.

На рис. 1 показан спектр звучания ноты “соль” на частоте 49 Гц в зависимости от числа колебаний в импульсе. Спектр показан в зависимости от частоты, а на базилярной мембране частота соответствует месту расположения соответствующего сигнала [5]. Спектр, показанный на рис. 1 для частоты 49 Гц, универсален и сохраняет свой вид для любой частоты  $f$ , записанной в виде:

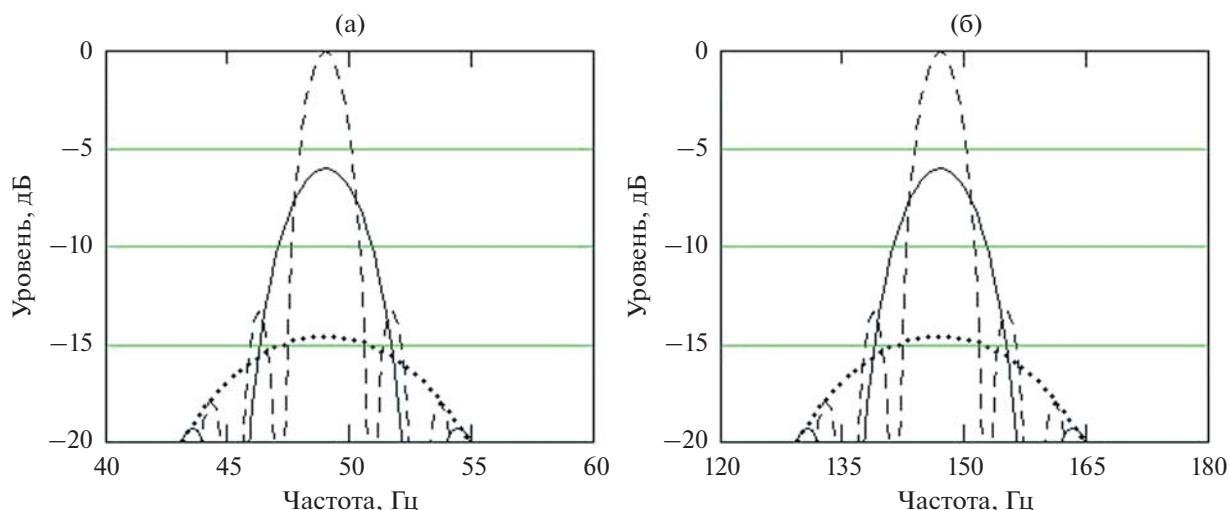
$$f = 49m, \quad (4)$$

где  $m$  — целое число. При этом шкалу частот следует тоже умножить на  $m$ . Например, при  $m = 3$  спектр будет выглядеть так, как это показано на рис. 1б.

При этом получается, что при той же длине импульса на высоких частотах происходит тем больше колебаний, чем выше частота. Поэтому при длине импульса, равной 100 мс, что соответствует наиболее короткому музыкальному звуку при наивысшем темпе исполнения, обозначаемом Presto, на низких частотах, меньше 50 Гц, число колебаний недостаточно для получения полного звука. На частоте 50 Гц за время 100 мс происходит всего 5 колебаний. На частоте выше всего на 2 октавы при той же длительности звучания происходит уже 20 колебаний.

В том случае, когда длительность импульса меньше  $T$ , картина изменяется. В этом случае падает разрешение звуков по частотам, и звук слышен с меньшим уровнем. Уровень звука при длительности импульса  $\tau < T$ , как следует из (1), линейно растет по амплитуде с ростом  $\tau$ , пока  $\tau \leq T$ .

Отметим, что величина разрешения звука по частотам определяет возможность выделения звуков разных частот, звучащих одновременно. Определение частоты звука, содержащего всего один тон, как в технике, так и слухом происходит независимо от длительности звучания тона по положению максимума модуля функции (1) при



**Рис. 1.** Частотный спектр тона “соль” (а) — на частоте 49 Гц и (б) — на частоте в три раза выше в зависимости от числа колебаний в импульсе: 4 колебания (мелкий пунктир); 12 колебаний (сплошная линия); 24 колебания (крупный пунктир).

условии, что уровень звука значительно превышает посторонний аддитивный шум, что всегда справедливо для музыкальных звуков. Поэтому тон звука может быть точно определен по малому числу слышимых колебаний сразу же после возникновения хорошо слышимого звука.

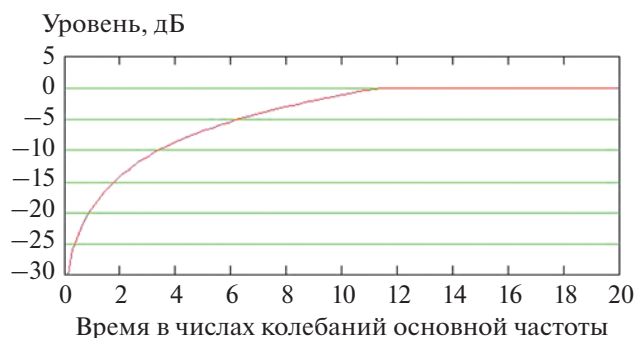
Акустические излучатели, работающие на низких частотах, для увеличения уровня излучаемого ими звука, как правило, используют резонанс, который тоже требует времени, независимо от того времени, которое требует преобразование Фурье. Рояль тоже использует резонанс деки рояля. Наличие резонанса оказывает влияние на спектральный состав звука, формируя тембр звучания рояля. Увеличение амплитуды звука рояля со временем определяется числом колебаний основной частоты за время установления колебаний в резонаторе после единичного толчка [8]. Таких колебаний может быть тоже порядка 12, что усилит амплитуду звука рояля в 12 раз, а мощность звука — в 144 раз или на 22 дБ. Действие резонанса эквивалентно действию преобразования Фурье в восприятии звука. Поэтому можно не рассматривать резонанс в качестве отдельного эффекта, а учесть его путем добавления этого эффекта изменения уровня звука, вызванного резонансом, к изменению уровня вызванного нашим восприятием звука, описываемого (1).

Как происходит процесс восприятия звука во времени согласно (1), показано на рис. 2 и 3. Рис. 2 и 3 построены по формуле (1) при следующих начальных условиях. Вначале нет сигнала, а затем производится нажатие на клавишу и ее удержание в нажатом положении. При этом на входе все время происходят колебания струны с постоянной частотой. Результирующий сигнал, форми-

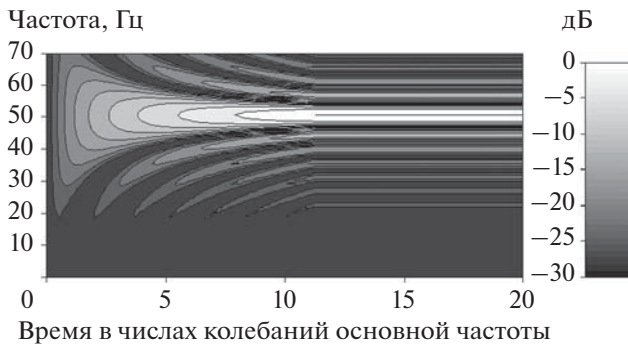
рующийся на выходе формулы (1), показан на рис. 2 и 3.

### КАК ОБСТОИТ ДЕЛО В ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТИ

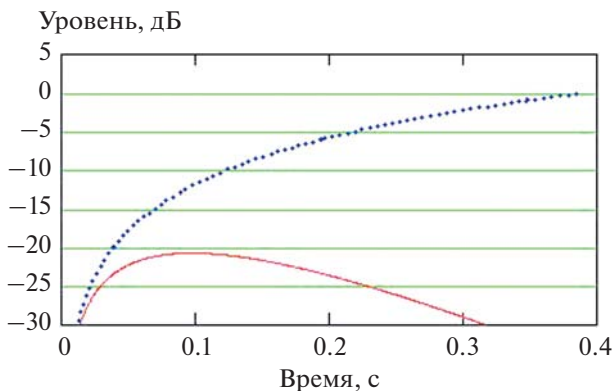
В действительности, если нажать самую крайнюю басовую клавишу рояля, возбуждающую звук частоты 27 Гц, то мы услышим звук сразу после нажатия на эту клавишу. Никакого плавного нарастания уровня звука в течение 12 или более колебаний частотой 27 Гц за время нарастания уровня звука явно не наблюдается. Этого запаздывания нет при нажатии на любую клавишу, в том числе, самую первую басовую клавишу. Звук с полной интенсивностью возникает сразу, а не после  $t$  колебаний основной частоты, занимающих на частоте 27 Гц первой клавиши 0.436 с или



**Рис. 2.** Как воспринимается во времени звук после нажатия на любую одну клавишу рояля по своему уровню, где время отсчитывается в числах колебаний основной частоты звука, возбуждаемой этой клавишей рояля.



**Рис. 3.** Текущий спектр того, как воспринимается звук рояля частоты 50 Гц с момента его возбуждения до его установления. Изолинии проведены через 3 дБ.



**Рис. 4.** Отклик на частоте первой клавиши рояля (27 Гц) с учетом затухания (сплошная линия) и без учета затухания (пунктир).

более. Такой интервал возрастания уровня звука во времени должен был бы быть непременно слышен, если он есть — но никакого запаздывания нет, и это немедленно подтверждается опытом! Получился так называемый парадокс, когда опыт вступает в противоречие с теорией, относительно которой нет никаких сомнений в ее правильности.

Рассмотрим объяснение возникшему парадоксу. На рис. 4 сплошной линией показан отклик на нажатие первой клавиши рояля (частота 27 Гц) с учетом фактически имеющегося экспоненциального затухания звука инструмента и пунктиром без учета этого затухания. Слышимый нами отклик инструмента на нажатие первой клавиши достигает максимального уровня звучания за время, которое значительно короче времени полного установления уровня звучания без учета затухания звука.

Это значительное смещение максимума звучания в сторону его начала, обусловленное затуханием звука, объясняет возникший парадокс. Парадокс состоит в том, что мы фактически не слышим того запаздывания возникновения звука на

низких частотах, которое показано на рис. 2 и рис. 3 даже на самой низкой частоте, где оно максимально (0,4 с). Если же учесть затухание звука, которое есть у инструмента, то, как видно по рис. 4, это запаздывание становится значительно меньше, что уже, по-видимому, лежит за пределами возможностей нашего слуха определять величину и сам факт запаздывания.

Что касается того факта, что при возникновении звука мы сразу слышим его тон еще до того момента, когда устанавливается полная разрешающая способность нашего слуха, то этот факт можно объяснить на основании рис. 1 и 3. Из этих рисунков следует, что максимум отклика по частоте с самого начала возникновения звука остается неизменным и лежит на одной частоте или в одном и том же месте базилярной мембраны. Это и объясняет мгновенное ощущение правильного тона звучания. Для этого надо учесть, что наше ощущение высоты тона звука основано на положении максимума возникающего текущего спектра звука, а не на уже сформированной разрешающей способности слуха.

#### КАК И КОГДА ПОЯВЛЯЕТСЯ ЭФФЕКТ ОСЛАБЛЕНИЯ

Обратим внимание на то, что затухание как функция времени слабо зависит от частоты и оно одинаково (имеет почти одинаковый декремент) практически для всех звуков, находящихся в пределах 2–3 октав. С учетом этого факта рассмотрим, что происходит с исполнением Allegro Патетической сонаты Бетховена в наиболее быстром темпе Presto.

В рассматриваемом нами примере исполнения Патетической сонаты Бетховена низкий короткий звук аккомпанемента слышен на фоне сильного и уже установившегося более высокого звука мелодии. Если бы эти два звука были неразличимы, то мы имели бы дело с логарифмом суммы двух сигналов, так как шкала уровней восприятия звуков у человека логарифмическая. Но благодаря спектральному анализу мы различаем эти звуки, и поэтому логарифмический масштаб применим к каждому из двух звуков по отдельности.

При этом нас интересует эффект уменьшения уровня аккомпанемента относительно уровня мелодии, а именно величина разностей уровней аккомпанемента и мелодии в виде функции времени. Оба сравниваемые уровня звуков одинаково затухают во времени, что не оказывает влияния на их разность в децибелах. Поэтому для сопоставления уровней этих звуков можно не учитывать их затухание во времени.

В этой сонате, в первой ее части, в нотах указан темп исполнения. В нотах [9] указано, что за одну минуту должно быть исполнено 168–176 нот дли-

тельностью в половину такта. При этом аккомпанемент в басовом ключе изложен нотами длительностью в одну восьмую такта. Длительность ноты в аккомпанементе в этом случае при минимальном указанном темпе исполнения составляет минуту (60 секунд), деленную на 168, и умноженную на 4 (число восьмых такта в половине такта). В результате получаем, что одна восьмая такта должна быть исполнена за время  $\Delta\tau = 0.098$  с. При этом чередование восьмых нот должно происходить с частотой 11.2 Гц.

Много это или мало и как это часто встречается, поясним, подсчитав частоту чередования нот минимальной длительности в этюде Шопена Оп. 10 № 4. В этом этюде [10] указан темп Presto – самый быстрый в музыке. При этом должно быть исполнено 88 нот длительностью половины такта в минуту, а минимальная длительность ноты в этом этюде одна шестнадцатая такта, чередование которых происходит с частотой 11.75 Гц. Частота чередования нот в этом этюде Шопена близка к той, которая рекомендована и соблюдается исполнителями Патетической сонаты Бетховена, что дает нам право утверждать, что и Allegro Патетической сонаты исполняется фактически в темпе Presto, самом быстром в музыке. Но автором Патетической сонаты указан иной темп, а именно Allegro. При темпе Presto нижняя нота аккомпанемента, обладающая частотой, близкой к 50 Гц, за отведенное время 0.098 с совершит всего 4.3 колебания. К какому ослаблению это приводит, можно судить по рис. 5. Одновременно с нотой аккомпанемента (рис. 5, пунктир) возбуждается нота мелодии (рис. 5, сплошная линия), которая на две октавы выше, и ее частота близка к 200 Гц. Время установления колебаний разных частот одинаково, если это время измерять в числе колебаний. На рис. 5 показан процесс установления колебаний во времени при условии, что это время для этих двух частот составляет равное число колебаний каждой частоты. Но при этом время установления колебаний во времени отличается в 4 раза, вследствие чего уровень звука мелодии в процессе установления остается значительно выше уровня аккомпанемента. При принятом темпе исполнения этой сонаты уровень аккомпанемента еще далек от своего установления за время звучания (98 мс), в то время как уровень мелодии уже успел установиться за время 60 мс. В результате при исполнении этой сонаты в темпе Presto, как показано на рис. 5, аккомпанемент становится слабее мелодии на 8 дБ, а с учетом резонанса это ослабление будет около 16 дБ. Учет затухания в данном случае не изменяет тот факт, что мелодия на 16 дБ (с учетом резонанса деки рояля) превышает уровень аккомпанемента, так как затухание во времени одинаково уменьшает как уровень аккомпанемента, так и уровень мелодии. Поэтому исполнение этой сонаты происходит фактически

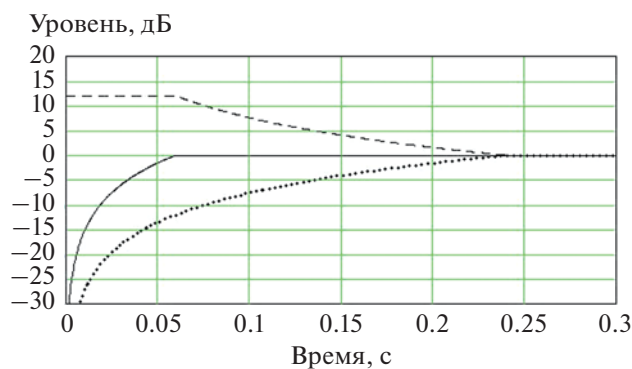


Рис. 5. Картина установления колебаний на частотах 50 (мелкий пунктир) и 200 Гц (сплошная линия) без учета затухания колебаний. Крупным пунктиром показана разность уровней установления колебаний на частотах 200 и 50 Гц.

без хорошо слышимого аккомпанемента. Образно выражаясь, пианист может не играть этот аккомпанемент, слушатель это вряд ли заметит.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве вывода отметим два установленных факта из проведенного исследования.

Во-первых, рассмотренный эффект имеет значение только при исполнении предельно коротких звуков на очень низких частотах, и проявляется только при наличии одновременно звучащих звуков заметно более высокой частоты, успевших полностью сформироваться за то же самое короткое время. Такая ситуация встречается в музыке чрезвычайно редко.

Во-вторых, отметим, что затухающие со временем звуки рояля вносят существенные поправки в наше восприятие звуков, что лишает нас возможности наипростейшим путем (нажатием на басовую клавишу) убедиться в том, что звук рояля нарастает не сразу.

Автор благодарен Л.А. Островскому, А.И. Малеханову, И.Н. Диденкулову, П.И. Коротину, В.К. Стромковой за интерес к работе и замечания, которые мной учтены перед отправкой статьи в журнал.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### ДАВАЙТЕ ПОСЛУШАЕМ

Послушаем, как это звучит. Все пианисты играют Allegro di molto e con brio Патетической сонаты Бетховена в наиболее быстром возможном темпе, в котором исполняются быстрые этюды Шопена, игнорируя указания композитора на темп Allegro. В [11] показано это Allegro в испол-

нении звезды пианистического искусства Tiffany Roop.

Интересно послушать, как звучит это произведение, если сыграть его во вдвое более медленном темпе. В [12] показано исполнение первой части Патетической сонаты в любительском исполнении во вдвое меньшем темпе, в качестве которого пришлось выступить автору этой статьи, так как в Интернете не оказалось медленного исполнения этой сонаты.

Несмотря на очевидные несовершенства записи и воспроизведения исполнения, из-за которых, в частности, сужен частотный диапазон звучания инструмента, обращает на себя внимание то, что в [11] практически не слышно аккомпанемента, а в [12] он слышен гораздо сильнее. В этюдах Шопена тоже точно такой же быстрый темп и при этом используются низкие частоты, которые почему-то отчетливо слышны. Почему? Потому что в этюдах Шопена низкие частоты звучат отдельно, а в Патетической сонате аккомпанемент сопровождает мелодию одновременно с ней. Здесь проявляется еще одна особенность человеческого слуха, а именно то, что его чувствительность есть величина переменная — она возрастает с уменьшением уровня слышимого звука, но только если этот слабый звук слышен отдельно. Если же слабый звук воспринимается на фоне другого сильного звука, то повышения чувствительности слуха не происходит. Поэтому в [11] басовый аккомпанемент едва слышен. Если же звучат только одни низкие ноты, пусть и с малым уровнем, то слух слушателя повышает свою чувствительность и усиливает эти звуки.

Отметим, что уменьшение темпа исполнения вдвое не привело к тому, что исполнение [12] стало выглядеть нарочито замедленным. Этого не произошло, так как гораздо большую роль стал играть аккомпанемент в левой руке, а он обладает вдвое высшим темпом, что компенсирует общую потерю темпа. Но при этом быстрые места, которые просто проскакивают в [11], в [12] обретают выразительность.

К этому исполнению есть еще и вопрос, выходящий за пределы физики. Почему сам пианист, старательно и вовремя нажимая на все нужные клавиши и не слыша при этом почти половины нот, спокойно продолжает играть, делая вид, что все отлично слышно? У меня есть ответ на этот вопрос только потому, что я сам играю. Дело в том, что у пианиста есть еще и некоторый внутренний слух, состоящий в том, что ощущение звука возникает вследствие нажатия пальцем на клавишу без возбуждения звука. Например, я могу для себя играть на своем инструменте ночью, когда все спят. Я не включаю свой инструмент в сеть, и он звуков при игре на нем не производит. Но я отчетливо слышу свою игру. То же самое

ощущает и виртуоз при исполнении 8 сонаты Бетховена в темпе Presto, и для него нет проблемы с аккомпанементом. Внутренний слух не по физике работает! Но виртуоз не для себя играет, а для публики, а она по-другому все воспринимает, как это и описано выше в статье.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Редколлегия считает целесообразным и интересным для читателей Акустического журнала привести выдержки из рецензии на статью, дополняющие и развивающие исследуемую тему.

“В статье затрагивается вопрос о влиянии длительности звучания хора (струны) фортепиано (преимущественно в басовом регистре фортепиано) на время Фурье-анализа при заданной разрешающей способности анализатора. Сделан вывод, что малое число колебаний в импульсе, соответствующем короткому нажатию на клавишу (например, при игре в быстром темпе), приводит не только к частотной неопределенности воспринимаемой слушателем основной частоты звука, но и к уменьшению воспринимаемого слушателем уровня звучания по сравнению с более длительным звуковым импульсом, что приводит к снижению воспринимаемого уровня звуков в басовом регистре. На этом основании сделан вывод о чрезмерно быстром темпе исполнения музыки многими пианистами (на примере фортепианной Сонаты № 8 Бетховена).

Сам по себе вопрос о слишком быстром темпе исполнения музыкальных произведений исполнителями, плохо контролирующими возникающее при этом звучание музыкального инструмента, как нам представляется, весьма актуален. Например, автору этой рецензии приходилось неоднократно отмечать на примере органного исполнительства, что некоторые органисты, пытаясь продемонстрировать виртуозную технику, берут басовые ноты на педальной клавиатуре органа столь коротко, что звучание басовых труб органа просто не успевает сформироваться, прерываясь на стадии атаки, т.е. переходного процесса (время атаки в звучании басовых органных труб может достигать секунды и более).

Однако, для фортепиано, которому посвящена статья, эта проблема является не столь простой, как может показаться. Это связано с психофизиологией восприятия музыкальных звуков человеком.

Прежде всего, восприятие звучания фортепиано, в т.ч. частоты звука, определяется не только уровнем основной частоты, но и обертонами (которых в фортепианном звуке довольно много), а в басовом регистре фортепиано слушатель определяет основную частоту (точнее, субъективную характеристику основной частоты — высоту звука) не столько по звуку основной частоты, сколько по разности частот обертонов. Частота основного тона может вообще почти отсутствовать, тем не

менее, слушатель идентифицирует ее по разности частот обертонов. В книге А.С. Галембо “Фортепиано. Качество звучания” (М., 1987, стр. 21) указано: “Если в богатом обертонами музыкальном звуке отсутствует основной тон, высота его не изменяется (см.: Тейлор, 1976); это происходит благодаря нелинейным свойствам слуха, способствующим ощущению разностных тонов, в частности, тонов, имеющих частоту, равную разности частот соседних обертонов; эта разница равна (или приблизительно равна) частоте основного тона. Такое сложное восприятие высоты характеризует, например, басовые звуки фортепиано, спектр которых не содержит слышимого основного тона, в иногда и одного или двух наиболее низких обертонов”. Строго говоря, этот факт во многом снимает проблему, заявленную автором статьи применительно к фортепиано.

Можно отметить следующие моменты в статье, выходящие за рамки использованной упрощенной модели:

– автор утверждает, что слух человека обладает разрешением в  $1/12$  долю октавы (очевидно, ориентируясь на интервал между ступенями современной равномерно темперированной гаммы), но реально разрешающая способность слуха человека намного выше;

– убывание звука (декремент затухания) считается в статье независимым от частоты;

– усиление звука декой фортепиано не может быть независимым от частоты, т.к. дека является многорезонансной системой, и в усиливаемом звуке присутствуют форманты;

– автор ссылается на указанный Бетховеном темп исполнения сонаты (по шкале метронома) и справедливо отмечает, что фактически этот темп соответствует темпу Presto, а не Allegro, указанному Бетховеном словесно в начале сонаты. Но известно, что практически оркестры редко играют произведения Бетховена по указанному им метроному, т.к. это приводит к чрезмерно быстрому темпу; а в первой части Девятой симфонии Бетховен указал сразу 2 метронома (108 и 120). Как считают исследователи, Бетховен, по-видимому, ошибочно указывал темп по цифре не у верхней, а у нижней границы грузика метронома, что и приводило к завышению темпа, в Девятой же

симфонии он указал сразу обе цифры. Это может объяснить проблему быстрого темпа в сочинениях Бетховена (см. A.Martin-Castro, I.Ucar. Conductors’ tempo choices shed light over Beethoven’s metronome // Plos One. 2020. December).

В заключение подчеркнем, что в статье описывается один из реальных факторов, который может влиять на восприятие звука фортепиано или иного инструмента с короткой атакой”.

*П.Н. Кравчун*  
*Московский государственный*  
*университет имени М.В. Ломоносова,*  
*физический факультет*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зверев В.А.* Физические основы формирования изображений в акустике. Publisher LAP Academic Publishing RU, 2018. 102 p.
2. *Зверев В.А.* Формирование изображений акустических источников в мелком море. Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2019. 112 с. (доступна на сайте ИПФ РАН <https://ipfran.ru/publishing/ipfran/books>).
3. *de Mayo B.* The everyday physics of hearing and vision. Morgan and Claypool Publ., 2015.
4. *von Békésy G.* Travelling waves as frequency analysers in the cochlea // Nature. 1970. V. 225. P. 1207-1209.
5. *Островский Л.А., Сутин А.М.* О колебаниях базиллярной мембраны улитки уха // Акуст. журн. 1974. Т. 20. № 6. С. 874–880.
6. *Зверев В.А.* К вопросу сжатия и расплывания модулированных сигналов в диспергирующих средах // Известия ВУЗ. Радиофизика. 1970. Т. 13. С. 150–152.
7. *Тверской В.И.* Одноканальный дисперсионный анализатор спектров радиоимпульсов // Вопросы радиоэлектроники. Радиоизмерительная техника. 1970. Вып. 5. С. 61.
8. *Горелик Г.С.* Колебания и волны. М.: Физматгиз, 1959.
9. *Бетховен Л.* Соната № 8 “Патетическая”; Соната № 14 “Лунная” для фортепиано. Редакция Артура Шнабеля. М.: КИФАРА, 1995. С. 40.
10. *Шопен Ф.* Этюды для фортепиано; тетрадь (№ 1–12). СПб.: Композитор, 1997. С. 55.
11. <https://www.youtube.com/watch?v=YOB8zlwBYIM> (дата обращения 25.01.2021 г.)
12. <https://youtu.be/IIЕuaL6M53o>