Научный Отдел Народн. Коммиссар. Просвещ. Т. С. С. Р.

В. А. Богородицкий.
Профессор Казанского Университета.

КУРС
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФОНЕТИКИ

ПРИМЕНИТЕЛЬНО

к литературному русскому произношению.

(С рисунками в тексте).

Вып. III. Физико-акустическая сторона произношения.

К 1(2)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО АВТ. ТАТ. С. С. РЕСП.
КАЗАНЬ 1922 г.

2-й Экз.

ПРОВ. 1954

Фундаментальная
БИБЛИОТЕКА
Общественных Наук
Академии Наук СССР
988
53

Р. В. Ц. г. Казань. Тираж 2000 экз.

ЦПК СССР
им. М. Горького
36-40628

Казань 1-я Государственная типография 1922. г.

I. Важнейшие физико-акустические данные в применении к человеческой речи.

Произносимые слова, пока они идут от говорящего к слушающему, суть не что иное, как чисто механическое колебательное состояние промежуточного воздуха. Если бы мы могли видеть состояние воздуха во время произношения, то заметили бы то разнообразие форм колебания, от которого зависит разнообразие слышимых нами звуков. Физическое учение о звуке или акустика вводит в понимание этого вопроса. Отсюда естественное стремление лингвистов дополнить описание языков и их говоров физико-акустическим. Мы и перейдем теперь к изложению физического учения о звуке, предпослав некоторые библиографические указания.

Кроме общих курсов физики, где излагается и учение о звуке или акустика (напр. элементарные—Краевича, Гано, и научные—Камена и Вюльнера, Зилова, Хвольсона, Лоренца), назовем следующие специальные монографии:

Тиндаль Звук—восемь лекций, читанных в королев. институте Великобритании, перев. с англ., 1870 (перевод не вполне исправен).

Гельмгольц Учение о слуховых ощущениях как физиологическая основа для теории музыки, перев. с нем., 1875, в сокращении=Гельмгольц.

Блацерна Теория звука в приложении к музыке, перев. с итал., 1878.

Майер Звук—ряд простых, занимательных и недорогих опытов, перев. с англ., 1881.

Слугинов Акустика, 1894.

Столетов Введение в акустику и оптику, 1896; его же „Работы Гельмгольца по акустике", см. Общедоступные лекции и речи А. Г. Столетова, 1897, стр. 152—178.

Rayleigh The theory of sound, I—II (1896)[2].

Auerbach Akustik (в Hdb. der Physik, hrsg. von A. Winkelmaa, B. II[2], 1909)=Auerbach.

Strouhal Akustika. V Praze, 1902=Strouhal.

Акустическая сторона произношения трактуется более специально в трудах по экспериментальной фонетике (в которых можно найти и дальнейшие библиографические подробности):

Grützner Physiologie der Stimme und Sprache (в Hermann's Hdb. der Physiol. II, a, 1879)=Grützner.

Rousselot Principes de Phonétique expérimentale, I—II (1897—1908)=Rousselot.

Scripture The Elements of Experimental Phonetics, New-Jork (1904)=Scripture.

Gutzmann Physiologie der Stimme und Sprache (1909)=Gutzmann.

Poirot Die Phonetik (в Hdb. der physiologischen Methodik, hrsg. von Tigerstedt, B. III, 6-te Abt., 1911)=Poirot.

Итак, во время нашей речи происходит колебательное движение воздуха, которое, достигнув барабанной перепонки уха слушающего и сообщившись затем слуховому нерву, вызывает в мозгу неизвестным для нас образом ощущение соответствующих речевых звуков. При этом колебательно-звуковом движении воздушные частицы, получая толчки от органов речи, сообщают движение соседним частицам, которые в свою очередь последовательно передают его ряду дальнейших и таким образом наконец будет приведена в колебание барабанная перепонка уха слушателей. Стало быть, мы воспринимаем звуки нашим ухом от колебаний прилегающей воздушной среды, а не непосредственно от самого производителя звуков, мы лишь об'ективируем воспринимаемые звуки на этого производителя, относим к нему, благодаря своему опыту, идущему с детства.

Для об'яснения процесса распространения колебательно-звукового движения вообразим прежде всего ряд воздушных частичек в состоянии покоя:

$$a\ b\ c\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ o\ \ldots\ldots\ x\ .$$

Так как между частичками действует сила упругости, то если одна из частиц будет сдвинута с своего положения покоя, движение это, благодаря упругой силе, передастся через весь ряд. Пусть, напр., частичка a толкнута по направлению к x. В тот момент, когда начинается движение a в данном направлении, движение это передается b; b передает движение c и т. д. Таким образом, в то время как a совершит свое движение вперед, движение это успеет распространиться на целый ряд смежных частиц, напр. до какой-нибудь точки o, и весь этот ряд частичек находится теперь в состоянии *сгущения*. Но так как движение частички a вперед встречает противодействие в возрастающей упругости между сгущающимися воздушными частичками, то движение это, вначале более быстрое, затем постепенно замедляется и наконец останавливается, после чего начинается обратное движение частички. И вот, в то время как o передает полученный толчок следующей частичке, частичка a начинает движение назад, увлекая за собою b и другие частички до точки o, производя таким образом *разрежение*. Между тем как здесь происходит разрежение, вправо от точки o продолжается первое движение в виде сгущения, и т. д. Описанное сгущение ряда частичек с сопровождающим его и идущим назад разрежением называется *звуковою волной* в силу сходства с водяною волной, а расстояние, по которому проходит сгущение и обратно разрежение, называется *длиною волны*. Как в водяной волне длина считается от одной вершины до другой или от одного углубления до другого, так и в звуковой волне длина волны определяется расстоянием между двумя следующими одно за другим сгущениями, или же от начала одного

разрежения до начала следующего разрежения: при этом сгущение звуковой волны соответствует выпуклости, а разрежение углублению водяной волны.

Движение звуковой волны не должно быть смешиваемо с движением частичек. Во время прохождения звуковой волны каждая частичка, участвующая в ее передаче, совершает только небольшое движение вперед и назад, составляющее *амплитуду* колебания,[1]) при чем это движение частички может быть не больше маленькой части дюйма, между тем как расстояние, на которое может распространиться движение в то время, как частичка совершит свой небольшой путь, может доходить до нескольких футов.

Примечание. Когда говорится о колебании или вибрации частички, то обыкновенно разумеются полные вибрации, т. е. колебание вперед и назад, и когда говорится о звуковой волне, то разумеется сгущение с обратно идущим разрежением (такая волна толкает барабанную перепонку уха сначала внутрь, а затем наружу). Однако во Франции чаще принимается, что вибрация состоит в колебании только в одном направлении—или вперед или назад. Поэтому французские вибрации составляют половину наших, и мы на этом основании считаем их полувибрациями. В свою очередь французские ученые называют „полные" вибрации двойными (vibrations doubles, в сокращенном обозначении v. d.), а свои простыми (vibrations simples, сокращенно v. s.). Поэтому напр. 512 v. s. французских физиков=256 v. d. наших; при обратном переходе от числа полных вибраций к простым или полувибрациям нужно удвоить число полных вибраций. Длина соответствующей волны при том и другом счете остается одна и та же.

До сих пор мы рассматривали звуковое движение по одной прямой. Но звук распространяется во все стороны от звучащего тела, как бы шаровыми поверхностями, вследствие чего движение сообщается постоянно увеличивающейся массе воздуха. Очевидно, это не может происходить без ослабления движения, другими словами—без уменьшения амплитуды колебаний частиц воздуха по мере распространения движения. А так как воздушная масса шаровых об'емов возрастает пропорционально квадрату радиусов, то и ослабление звука или уменьшение амплитуды происходит в той же пропорции. Напр., если силу звука на расстоянии одной сажени обозначим единицею, то на расстоянии 4-х сажен она уменьшится в 16 раз (т. е. 4^2) и будет равняться $^1/_{16}$ первоначальной, и т. д. Мы выражаем этот закон, говоря, что *сила звука* изменяется обратно пропорционально квадратам расстояния.[2]) Закон этот был подтвержден также и эмпирически разнообразными опытами, напр. с звонками и т. п.

---

[1]) Амплитудой (от латинского слова *amplus* „обширный") или шириной качания наз. расстояние, по которому воздушная частичка движется вперед и назад, когда по ней проходит звуковая волна.

[2]) Этим об'ясняется то обстоятельство, что лица с ослабленным слухом, еще довольно хорошо воспринимающие разговор в непосредственном соседстве, уже при небольшом даже удалении перестают воспринимать точно слова, нередко смешивая их с другими более или менее созвучными словами, вследствие чего слышимая речь и не вызывает у них вполне надлежащей смысловой стороны (при недослышивании и ослышках кроме расстояния существенным фактором являются еще качественные различия звуков воспринимаемой речи).

Примечание. Указанный закон изменения силы звука неприложим к широким трубам, особенно если они цилиндрические и без поворотов, так как в них звуковые волны распространяются не в форме концентрических возвращающих сфер, а слоями с одним и тем же диаметром, и потому звук может передаваться без заметного ослабления на значительное расстояние. Но при распространении звука по узким трубам уже заметным становится влияние трения, при чем сила звука тем более ослабевает, чем уже труба. Все-таки трубки не слишком малого диаметра еще достаточны для отчетливой передачи разговора на значительное расстояние (срв. говорные трубы в гостинницах и больших заведениях). [1])

Скорость распространения звука в воздухе была определена как теоретически, так и посредством опытов. Теоретическое определение скорости звука было сделано впервые Ньютоном, при чем он исходил из того соображения, что, зная упругость и плотность воздуха, можно вычислить скорость звука не прибегая к прямым опытам. В самом деле, так как между воздушными частицами действует сила упругости, то этим определяется то, что скорость звука должна стоять в прямой зависимости от упругости воздуха; если же, с другой стороны, мы будем сжимать воздух, то будет возрастать его плотность, т. е. то же количество частиц будет содержаться в меньшем об'еме, а при этом условии скорость звука должна уменьшаться, и следовательно будет находиться в обратной зависимости от плотности. По Ньютону скорость звука прямо пропорциональна квадратному корню упругости воздуха и обратно пропорциональна квадратному корню плотности воздуха. [2]) Таким образом имеем формулу для v (скорости звука):

$$v = \sqrt{\frac{p}{d}},$$

---

[1]) Нейренёф (Neyreneuf) путем опытов над сравнительно узкими трубками из латуни (диам. 12—18 мм., длина 0,7—1,7 м) пришел к установлению следующего правила для выражения измененной силы (j) звука при выходе его из узкой трубы длиною l и диаметром d:

$$j = k\,\frac{d^4}{l},$$

где k постоянная, зависящая от силы звука источника и природы вещества трубки. При наших экспериментально-фонетических опытах число k не меняющееся, потому что у нас соединительные трубки из одного и того же материала (каучуковые) и сила произношения при опытах во время сеанса сохраняется по возможности одна и та же, также и длина каучуковых трубок почти всегда одинакова=ок. 0,3 м., и только диаметр двоякий=5 мм. и 3 мм. Так как отношение диаметров трубок=5:3, то (при прочих равных условиях) звук во втором случае по сравнению с первым случаем, согласно приведенной формуле, будет слабее почти в 8 раз:

$$\left(\frac{5}{3}\right)^4 = \frac{625}{81} = 7{,}7.$$

[2]) Читатель, желающий проследить собственный ход мысли Ньютона и его вычисление, должен обратиться к его творению „Математические начала натуральной философии“ (перев. проф. А. Н. Крылова), в Изв. Никол. Морск. Акад., вып. V, 1916, стр. 431—436.

где p упругость воздуха, а d—его плотность (в числителе по правилу поставлена величина с прямой пропорциональностью, а в знаменателе—с обратной). Что касается упругости, то так как газы не имеют самостоятельного об'ема, то таковой зависит от давления, под которым они находятся и которое служит мерою их упругости. *Упругость* воздуха (p) измеряется высотою (h) ртутного столба, уравновешивающего своим весом вес атмосферного столба той же площади основания; на уровне моря ртутный этот столб имеет высоту 76 см. или 30 дюймов; плотность же (σ) ртути, определяющая массу данного барометрического столба, =ок. 13,6 и, наконец, ускорение (g) при падении тела в свободном пространстве, определяющее давление или вес данной массы ртутного столба, а следовательно и уравновешиваемого атмосферного столба, равно около 981 см. в секунду времени; отсюда мы можем заменить p произведением $h.\sigma.g$ (ибо если величина пропорциональна нескольким факторам, то она пропорциональна их произведению). Что касается *плотности* воздуха (d), показанной в знаменателе, то она при 0^0=0,001293. Произведя по этим данным вычисление формулы, в результате получаем число Ньютона для скорости звука в воздухе при температуре 0^0 и при давлении 76 см.:

$$c=\sqrt{\frac{h\,\sigma\,g}{d}}=\sqrt{\frac{76\times13{,}6\times981}{0{,}001293}}=\text{ок. 280 м. или 916 ф. в секунду.}^{1})$$

Однако числа, получающиеся из прямых опытов над скоростью распространения звука в воздухе, больше этого числа, равняясь в общем ок. 332 м. или 1090 ф. в секунду.[2]) Эту разницу об'яснил Лаплас; согласно его об'яснению, при прохождении звуковых волн температура в уплотнейном воздушном слое повышается, при чем изменения плотности происходят так быстро, что теплота, возникшая при уплотнении, не успевает перейти в заметном количестве в окружающую среду, а потому такой слой будет стремиться расшириться с соответственно большей силой, что должно увеличить скорость звука: равным образом слой разреженный и потому охладившийся не

[1]) Из исследования и формулы Ньютона явствует, что скорость распространения звукового колебания не стоит в зависимости ни от силы или амплитуды, ни от высоты звука.

[2]) Эти опыты, в которых главное участие принадлежит французским и голландским экспериментаторам, производились так: звук выстрела исходил одновременно из двух отдаленных станций; было точно измерено *расстояние* между станциями; *время*, употребленное звуком на прохождение от станции до станции, определялось по промежутку между появлением огня и прибытием звука. Расстояние, выраженное в метрах или футах, и разделенное на время, выраженное в секундах, и приводит к эмпирическому определению скорости звука в воздухе, т. е. расстояния, проходимого звуком в секунду времени.

получит заметного количества тепла от окружающей среды и потому давление в нем будет убывать соответственно больше; в силу всего этого скорость распространения звука увеличивается. Таким образом получается некоторый коэффициент (k), которым нужно дополнить Ньютонову формулу, помножив на него подкоренную величину, и тогда получится эмпирическое или наблюденное число скорости звука. Исходя из этого соображения, Лаплас и определил искомый коэффициент; для этого нужно разделить квадрат наблюденной скорости звука на квадрат вычисленной Ньютоном, т. е. $1090^2 : 916^2$, и мы получим значение искомого коэффициента k, который оказывается равным 1,4 для воздуха. Таким образом, с поправкою Лапласа, имеем для воздуха

$$v = \sqrt{\frac{p}{d} \cdot k} = 280 \text{ м.} \times 1{,}2 = \text{ок. } 332 \text{ м. или } 1090 \text{ ф. в секунду.}$$

Справедливость данной формулы подтверждается и тем, что mutatis mutandis она является согласующеюся не только с действительною скоростью звука в воздухе, но также и в других газах и вообще телах. Так, при одинаковой с воздухом упругости плотность водорода меньше, чем плотность воздухом, и потому скорость звука в водороде превосходит скорость его в воздухе; наоборот, в тяжелом углекислом газе при одинаковой упругости с воздухом плотность больше и, следов., скорость звука меньше. В жидких телах и особенно в твердых упругость сравнительно с плотностью значительно больше, чем в воздухе, а отсюда и распространение звука быстрее, напр. в воде приблизительно в 4 раза, в дереве (в некоторых породах, вдоль фибр) в 14, в железе в 16 раз и проч. В этих телах сравнительно с воздухом звук распространяется быстрее вследствие их большой упругости сравнительно с плотностью. Вообще, при суждении о скорости звука нужно иметь в виду как плотность, так и упругость среды, так как скорость звука зависит не от одной которой-нибудь из них, а от отношения между ними, при чем увеличение упругости увеличивает, а увеличение плотности уменьшает скорость звука. На вершине горы упругость воздуха меньше, чем у подошвы, и потому ожидалось бы уменьшение скорости (при одинаковых условиях температуры), но так как в первом случае соответственно и плотность меньше, то от действия этого второго фактора происходит увеличение скорости, так что в итоге скорость звука будет одинакова на вершине горы и у подошвы при одной и той же температуре.[1])

[1]) Но *сила* звука с уменьшением плотности или разрежением воздуха уменьшается. Де-Соссюр наблюдал, что выстрел пистолетный на вершине Монблана по

Изменение температуры среды оказывает влияние на скорость распространения звука; так, при повышении температуры воздуха скорость звука в нем возрастает, так как при этом плотность (т. е. знаменатель d в вышеприведенных формулах) уменьшается, именно —на каждый градус стоградусного термометра скорость звука увеличивается на 0,6 м. или почти на 2 фута в секунду и, наоборот, при понижении температуры уменьшается; следующая табличка представляет скорость звука (v) в метрах по позднейшим измерениям в связи с изменением температуры (ϑ):[1])

ϑ	v	ϑ	v
—70	285,6 м.	+10	337,8
—40	306,5	+20	348,8
—20	319,3	+30	349,6
—10	325,6	+40	355,3
0	331,8	+50	361,0

Примечание. В узких трубках скорость распространения звуковых колебаний значительно меньше, чем в широких или в пространстве простирающемся во все стороны, благодаря трению о стенки трубки и внутреннему трению между слоями воздуха, отчасти теплопроводности (в узкой трубке теплота, возникающая при уплотнении воздуха, достигая стенок легко может быть удаляема последними), при чем уменьшение скорости принимают обратно пропорциональным поперечнику трубки и квадратному корню из числа колебаний (в трубке в 2 см. диаметром при 1000 колебаний в секунду скорость приблизительно на 10 метров меньше).[2]) Таким образом, в узких трубках при распространении звуковых колебаний происходит уменьшение как силы звука (см. выше стр. 6), так и скорости распространения.

До сих пор мы имели в виду распространение по воздуху отдельной звуковой волны. Когда проходит по воздуху ряд волн, то в этом случае получается нашим слухом ощущение более или менее длящегося звука. Это происходит благодаря тому, что впечатление, сообщаемое через слуховой нерв мозгу каждым отдельным толчком такого ряда, еще продолжается в мозгу в тот момент, когда дохо-

---

силе звука равняется впечатлению от взрыва ракеты на низменности. Выстрел из пушки, сделанный на вершине Монблана, не будет слышен внизу, тогда как произведенный у подножия будет слышен на вершине, потому что звук, возникший в более плотном воздухе, сильнее соответствующего звука, произведенного в разреженном воздухе.

[1]) См. Auerb. стр. 512.

[2]) По формуле Гельмгольца скорость звука в цилиндрической трубе равна

$$v = a\left[1 - \frac{k}{2R\sqrt{\pi n}}\right],$$

где a скорость звука в открытом пространстве, k коэффициент трения, n частота колебаний и R радиус трубы.

дит следующий за ним толчок, и таким образом впечатления сливаются, производя ощущение длительного звука—*музыкального* или же *шума*. Ощущение музыкального звука получается от быстрых *периодических* колебаний звучащих тел, а ощущение шума—от колебаний *непериодических*. Периодическое колебание есть такое колебание, которое одинаково повторяется в совершенно одинаковые промежутки времени. Напр., движение обыкновенного маятника есть периодическое: качаясь по воздуху, он производит волны или толчки, которые следуют друг за другом с совершенною правильностью. Однако эти волны слишком медленны и редки, чтобы перейти в нашем восприятии в непрерывное звуковое ощущение. Для того, чтобы получился *музыкальный тон*, мы должны взять для звучания тело, которое способно колебаться с неуклонною правильностью маятника и которое может сообщить воздуху достаточно частые толчки, напр. натянутая струна, камертон, сирена, голосовые связки гортани и т. п. Ощущение *шума* вызывается воздушными толчками, которые повторяются неправильно и с неправильной силой. При нашем произношении периодические колебания вызываются вибрированием голосовых связок и имеют место, напр. при *гласных* (а, о...), а непериодические, обычно вызываемые прохождением воздуха чрез ртовые артикуляционные преграды, характеризуют категорию *глухих согласных* (п, с...), но если при этом участвуют своими вибрациями еще и голосовые связки, то получаются *звонкие согласные*, представляющие собою таким образом тоношумы (б, з...). В музыкальных звуках, как и в шумах, различаются *высота* звука, *сила* и *тембр*. Сила звука, как мы уже знаем, сводится к амплитуде колебаний частиц воздуха при прохождении звуковых волн. Высота звука обусловливается частотою колебаний, при чем с увеличением числа колебаний в секунду тон повышается, с уменьшением числа колебаний—понижается. Под тембром разумеется оттенок звука, по которому мы различаем тон одной и той же высоты и силы, но произведенный различными источниками, напр. разными инструментами или голосами. К различию тембра сводится и качественное различие звуков речи, как гласных, так и согласных.

Так как в акустике наиболее полно изучена физическая природа музыкальных звуков и пока слишком недостаточно исследована природа шумов, то мы и остановимся в дальнейшем на характеристике музыкальных звуков и притом главным образом в отношении высоты и затем тембра, ибо момент силы звука достаточно раз'яснен выше. Существуют различные способы для получения музыкальных звуков, т. е. для приведения воздуха в звуковое периодическое движение, напр. посредством струны или камертона. Когда мы заставляем звучать струну или камертон, то звук их сначала имеет наибольшую силу и потом постепенно становится слабее по мере того,

как продолжается колебание струны или камертона от полученного удара; при этом не трудно подметить, что пространство, на которое раскачивается струна или камертон, иначе говоря—амплитуда или размах колебаний их, становится постепенно все меньше и меньше, при чем однако и самое опытное ухо не могло бы заметить ни малейшей разницы в высоте тона; наконец струна или камертон смолкает вследствие прекращения колебаний и амплитуда теперь равняется нулю. Если заставим тот же камертон чертить свои вибрации на закопченном, равномерно вращающемся цилиндре, то ясно увидим, как размах или амплитуда чертимых вибраций постепенно уменьшается, пока наконец кривая, с прекращением колебания, не перейдет в прямую, между тем как длина и частота вибраций все время сохраняется одна и та же (если при этом будут одновременно отмечаться на цилиндре, с помощью особого сигнального аппарата, доли секунды, то легко высчитать число колебаний камертона в секунду, которое и будет служить указателем высоты тона данного камертона). Из опытов этого рода следует, что высота и сила звука не зависят друг от друга и потому должны быть строго различаемы: сила звука зависит только от амплитуды, а высота только от частоты вибраций звучащего тела.

Когда два тона, исходящие из двух различных источников, имеют одинаковую высоту, то это значит, что частота их вибраций одинакова. Имеется особый прибор, весьма употребительный у физиков при акустических опытах,—т. наз. сирена,[1]) с помощью которого не трудно определить число колебаний данного звучащего тона. Дело в том, что прибор может сам производить периодические колебания воздуха любой частоты и тем самым вызывать соответствующей высоты тон; в то же время приспособленный к аппарату двойной счетный циферблат показывает число происшедших колебаний тона, производимого сиреною, и время его звучания, а по этим данным не трудно установить число колебаний, приходящееся на секунду, которое и служит для определения высоты тона сирены. Если мы приведем в унисон тон сирены с тоном другого звучащего тела, то следовательно определим число колебаний и этого последнего. Однако при экспериментально-фонетических исследованиях не пользуются сиреною, так как высота речевых звуков не остается постоянною, но быстро изменяется; поэтому прибегают к другому приему, определяя ход изменения высоты голосового тона, записываемого кимографом, при помощи записанных на том же кимографе вибраций камертона определенной высоты (см. вып. II, стр. 30—31).

---

[1]) Для ознакомления с подробностями устройства сирены см. Гельмгольц стр. 18 сл., 228 сл., Тиндаль стр. 67—68, 73—74.

Переходя к более частному изучению вопроса о высоте музыкальных звуков, мы отметим прежде всего *законы вибрирования струн*, выясненные уже давно (еще в XVII в. француз. ученым Мерсенном) и доказываемые на монохорде. Законы эти, определяющие влияние целого ряда факторов, от которых зависит быстрота вибраций (и следов. высота тона) струн, приложимы и к колебаниям голосовых связок, представляющих собою как бы агломерат струн весьма сложного мышечного и соединительно-тканного строения. Когда вибрирует вся натянутая на монохорде некоторою тяжестью струна, она издает свой основной тон, число вибраций которого в секунду времени определяется с помощью сирены; если подставку подвести под половину струны, то вибрации каждой половины будут вдвое чаще и получится верхняя октава основного тона; если подвести под треть, то эта последняя будет вибрировать в три раза чаще, четверть струны при том же натяжении—в четыре раза чаще и, вообще, число колебаний струны обратно пропорционально ее длине (при том же натяжении), т. е. чем короче струна при данном натяжении, тем выше тон; далее, на высоту тона струны оказывает влияние ее толщина: число вибраций обратно пропорционально толщине струны, т. е. чем толще струна при прочих равных условиях, тем реже ее вибрации и, следов., тем ниже ее тон; кроме того влияет плотность струны: число вибраций обратно пропорционально корню квадратному плотности струны, т. е. напр. струна, имеющая плотность вчетверо меньшую, чем другая струна такой же длины, натяжения и толщины, будет совершать свои вибрации вдвое чаще: струна с плотностью в девять раз меньшею будет вибрировать втрое скорее, и т. д. (напр. платиновая и железная проволоки одинаковой толщины и длины, натянутые одинаковою тяжестью, не будут вибрировать с одинаковою быстротою, так как плотность или удельный вес железа равняется 7,8, а платины 21,5). В согласии с изложенными тремя законами вибрирования струн голосовые связки взрослых, как более длинные, более массивные и в то же время более плотные, чем у детей, издают более низкий тон по сравнению с детской гортанью; у женщины голосовые связки короче, чем у мужчины, и потому женский голос выше мужского.[1]) Нам осталось указать еще на четвертый закон вибрирования струн, определяющий изменение высоты тона струны с изменением натяжения и гласящий, что числа вибраций струны прямо пропорциональны квадратным корням натягивающих тяжестей, т. е.

---

[1]) Средняя длина голосовых связок детей=ок. 7 мм., взрослого мужчины=ок. 1,8 см. и у женщины=ок. 1,3 см. (т. е. приблизительно на $^1/_4$ короче, чем у мужчины); ширина голосовых связок 2—5 мм.

если напр. тяжесть в четыре раза больше, то число вибраций увеличится только в два раза (получится верхняя октава), а если натягивающий груз увеличится в 9 раз, то число вибраций возрастет в 3 раза (квинта первой октавы), и т. д. [1]) Этому закону следует изменение высоты тона в произношении одного и того же индивидуума, с одною впрочем особенностью, зависящею от того, что голосовые связки с увеличением натяжения одновременно еще удлиняются (тогда как струна монохорда при данном опыте не меняет своей длины), почему указанный закон видоизменяется присоединением этого фактора. И действительно, опыты физиолога J. Müller'a над мертвой гортанью показали, что нагрузка для натяжения голосовых связок, привешиваемая к краю щитовидного хряща для повышения тона, возрастает в несколько большей степени; он получил следующие цифры: для c_1 = $1^1/_2$ лота; для c_2 (верхняя октава и, следов., вдвое больше число вибраций) ожидалась бы 6 лотов (т. е. $1^1/_2 \times 2^2 = 6$), но на деле оказалось $7^1/_2$ лотов: для следующей октавы c_3 ожидался бы груз в 24 лота (т. е. 6×4), а вышло 28 лотов. [2])

Зная число вибраций в секунду, легко найти *длину* соответствующих *звуковых волн*. Как мы знаем, звук при 0^0 проходит 332 метра или 1090 футов в секунду. Следовательно, если высота тона определяется, напр., числом 256 колебаний в секунду (т. е. тон c_1), то это значит, что за время одной секунды последовательно двинутся 256 звуковых волн, из которых самая первая образовавшаяся волна успеет пройти все расстояние в 1090 футов; а так как на этом протяжении уместится 256 волн, то, разделяя 1090 ф. на 256, находим, что длина каждой волны составляет около 4 футов $3^1/_2$ дюймов, а время или период каждой волны равняется $^1/_{256}$ секунды, так как в секунду пройдет 256 волн. Теперь не трудно видеть, что чем быстрее вибрации, тем короче будут волны и, напр., для тона c_2 (=512 v. d.) длина волны будет около 2 ф. $1^3/_4$ д. Как уже указывалось (стр. 9), при понижении температуры скорость звука уменьшается, а при повышении возрастает на каждый градус стоградусного термометра приблизительно на 2 фута или 0,63 м. Поэтому, если напр. имеем температуру 15^0 Ц., то в таком случае звук пройдет в секунду 341 м. или 1120 футов, откуда и длина каждой волны

---

[1]) Все четыре закона обнимаются следующею формулой:

$$N = \frac{1}{l}\sqrt{\frac{P}{d.s}},$$

где N частота колебаний, l длина струны, s площадь ее поперечного сечения, d ее плотность и P натягивающая струну тяжесть.

[2]) Срв. Grützner стр. 81.

тона в 256 колебаний будет несколько большею, именно 1120 ф.: 256, т. е. около 4 ф. 4 д. или 1,3 м.[1])

Примечание. Вообще, так как скорость распространения звука в свободном пространстве одна и та же для тонов всякой высоты и силы (равно как и для шумов)[2]) и притом известна, то по числу колебаний в секунду — как мы только-что показали — легко определяется длина волн и, наоборот, по длине волны можно определить число колебаний в секунду, а произведение из длины волны на это число составляет скорость звука, т. е. пространство, проходимое звуком в течение секунды. Таким образом имеем формулы:

$$\lambda = \frac{v}{N}, \quad N = \frac{v}{\lambda}, \quad v = N\lambda,$$

где λ длина волны, N число колебаний в секунду, v скорость распространения звука за одну секунду. Наконец, по числу колебаний в одну секунду мы можем заключить о времени или „периоде" (T) одного колебания:

$$T = \frac{1''}{N}.$$

Так как высота тона может быть указываема не только числом колебаний, но также и соответствующими *нотными обозначениями*, то мы дадим теперь понятие о так называемой звуковой „гамме", под которою разумеют определенную последовательность тонов с определенными интервалами или промежутками. Существуют научная или физическая гамма и гамма общеупотребительная или темперированая. Мы дадим понятие о той и другой, чтобы видеть, которой из них отдать предпочтение при экспериментально-фонетических исследованиях над изменением высоты голосового тона при произношении.

Мы уже знаем (см. стр. 12), что если звук или тон содержит некоторое число колебаний (обозначим это число посредством N), то при числе колебаний вдвое большем (т. е. при $2N$) получится тон октавою выше. Таким образом высшая октава того или другого тона представляет отношение 2 : 1 (напр. для тона в 256 колебаний в секунду высшая октава будет содержать 512 колебаний в секунду, и т. д.), в промежутке же между этими тонами заключается безконечный ряд переходных тонов соответственно безконечному ряду промежуточных возможных чисел; но тоны гаммы ограничены, при чем находятся в строго определенном числовом соотношении между собою и к исходному тону или тонике. Обозначим этот последний посредством единицы, могущей быть замененною любым числом N, допустим, что это будет обычный начальный тон гаммы, т. е. *до*; так как высшая октава этой ноты содержит вдвое большее число колебаний ($2N$), то промежуточные тоны

---

[1]) Существуют разные способы наглядного обнаружения звуковых волн; таков напр. способ Кундта (см. Тиндаль стр. 241, Лоренц II[2] стр. 29).

[2]) Действительно, слушая издали музыкальную пьесу, мы получаем одновременные впечатления от аккордов, состоящих из тонов разной высоты, и вообще характер слышимой пьесы нисколько не нарушается.

гаммы будут получаться из N умножением на последовательно возрастающий ряд неправильных дробей, лежащих между 1 и 2. Если возьмем вместо N для основного тона *do* число 1, тогда ближайший тон (*re*) получится от умножения 1 на $^9/_8$, дальнейший тон (*mi*) от умножения $1\times{}^5/_4$, затем $1\times{}^4/_3$ (*fa*), $1\times{}^3/_2$ (*sol*), $1\times{}^5/_3$ (*la*), $1\times{}^{15}/_8$ (*si*). Представим себе, что начало гаммы не единица, а напр. 128; число колебаний следующей ноты *re* будет $128\times{}^9/_8=144$; далее $128\times{}^5/_4=160$ (*mi*), $128\times{}^4/_3=170^2/_3$ (*fa*) и т. д. Интервал или промежуток между двумя смежными нотами определяется отношением второго числа к непосредственно предшествующему числу; величина его получается от деления числа второй ноты на непосредственно предшествующее число: $^9/_8 : 1={}^9/_8$ (интервал между *do* и *re*); $^5/_4 : {}^9/_8={}^{10}/_9$ (интервал между *re* и *mi*); $^4/_3 : {}^5/_4={}^{16}/_{15}$ (интервал между *mi* и *fa*); $^3/_2 : {}^4/_3={}^9/_8$ (интервал между *fa* и *sol*); $^5/_3 : {}^3/_2={}^{10}/_9$ (интервал между *sol* и *la*); $^{15}/_8 : {}^5/_3={}^9/_8$ (интервал между *la* и *si*); $2 : {}^{15}/_8={}^{16}/_{15}$ (интервал между *si* и *do*). Таким образом получается возможность не только от тоники с любым числом колебаний получить числа колебаний всех дальнейших тонов гаммы, но кроме того перейти от числа колебаний непосредственно предшествующей ноты чрез умножение на соответствующий интервал к числу колебаний дальнейшей соседней ноты. Следующая таблица указывает последовательные ноты гаммы в их наименовании французском (*ut* или *do*, *re*...) и соответствующем немецком (*c*, *d*...), а внизу проставлены множители для получения тонов гаммы из основного тона или тоники, а еще ниже под соединительными дугами указаны интервалы между смежными нотами, в виде множителей, служащих для перехода от числа колебаний предшествующей ноты к следующей:

Француз. названия нот	*do*	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*.....верхняя октава
Немецк. названия нот	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*a*	*h*	*c*
Множители для получения тонов гаммы из основного	1	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	2
Интервалы между соседними нотами гаммы		$^9/_8$	$^{10}/_9$	$^{16}/_{15}$	$^9/_8$	$^{10}/_9$	$^9/_8$	$^{16}/_{15}$

Как видим, интервалы между соседними нотами гаммы не все одинаковы и по величине распадаются на три группы: $^9/_8$, $^{10}/_9$ и $^{16}/_{15}$. Первые два интервала, очень близкие между собою по величине, считаются за *целый тон* (из них больший, т. е. $^9/_8$, называется мажорным целым тоном, а меньший или $^{10}/_9$—минорным целым тоном), последний же интервал $^{16}/_{15}$, значительно меньший, считается за

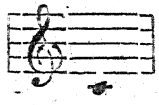
полутон (называемый мажорным в отличие от еще меньшего или минорного интервала $^{25}/_{24}$, о котором скажем далее). Эти интервалы распределены в известном порядке в представленной гамме (называемой мажорною) в соответствии с запросами нашего эстетического чувства: сначала идет самый большой $^{9}/_{8}$, затем несколько меньший—$^{10}/_{9}$ и, наконец, полутонный $^{16}/_{15}$; во второй половине гаммы интервалы идут в порядке $^{9}/_{8}$, $^{10}/_{9}$, $^{9}/_{8}$ и $^{16}/_{15}$. Во всей гамме наибольший интервал повторяется три раза, несколько меньший—два раза и полутон.— два раза. Что касается интервалов между тою или другою нотою гаммы и исходною нотою, они характеризуются определенными названиями:

интервал от *do* к *re* — секунда (один тон);
от *do* к *mi* — терция (два тона);
от *do* к *fa* — кварта (2^{1}_{2} тона);
от *do* к *sol* — квинта (3^{1}_{2} тона);
от *do* к *la* — секста (4^{1}_{2} тона);
от *do* к *si* — септима (5^{1}_{2} тонов);
от *do* к *do* — октава (6 тонов).

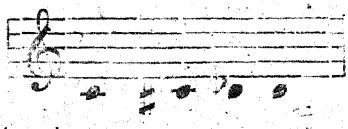
Так называемая минорная гамма хотя и составлена из таких же интервалов между смежными нотами, но интервалы распределены другим образом, чем обусловливается уже иное эстетическое впечатление. Так, в минорной гамме интервал *re-mi* равняется не целому тону, а полутону, соответственно чему и интервал между *mi* и исходною нотою *do* или терция равняется в минорной гамме не двум целым тонам, как в мажорной гамме (образующим здесь мажорную или большую терцию), а $1^{1}/_{2}$ тонам, и этот интервал наз. минорною или малой терцией, при чем такое минорное *mi* получается из числа колебаний исходного тона чрез умножение не на $^{5}/_{4}$, а на ближайшую меньшую дробь $^{6}/_{5}$.

Рассмотренные вариации гаммы, мажорная и минорная, образуют так называемую *диатоническую* гамму или гамму тонами, отличающуюся от гаммы, усложненной более мелкими интервалами и называемой *хроматическою*, к которой и обратимся. Предварительно найдем величину полутонового промежутка, отделяющего обе терции (мажорную и минорную) при общем исходном или начальном тоне; для этого мы должны разделить числовой множитель мажорной терции на множителя минорной терции, т. е. $^{5}/_{4} : {}^{6}/_{5} = {}^{25}/_{24}$; этот-то интервал, наименьший среди всех рассмотренных, и называется, как упоминалось, *минорным полутоном*, хотя его нет в диатонической гамме. Введение этого интервала в гамму составляет дальнейшее развитие ее, дающее начало гамме хроматической. Чтобы ввести в гамму минорный полутон, мы должны число колебаний каждой ноты помножить на $^{25}/_{24}$, и тогда мы получим малое повышение соот-

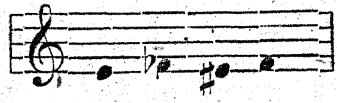
ветствующей ноты, называемое *диезом* и обозначаемое в нотной транскрипции прибавлением к ноте знака ♯; с другой стороны, каждую ноту мы можем понизить на минорный полутон, именно умножив число колебаний тона на обратную дробь, т. е. на $^{24}/_{25}$, и мы получим малое понижение, называемое *бемолем* и обозначаемое знаком ♭.[1]) Возьмем пример. В физической гамме нота do^2



имеет 256 колебаний в секунду: умножая это число на $^{9}/_{8}$, мы получим ноту re=288 v. d., а между этими нотами имеются еще две ноты: do ♯ и re ♭: так как диез при do не доходит до половины тона, равно как и бемоль re тоже не достигает до половины, то между диезом и бемолем оказывается еще очень малый интервал: таким образом имеем последовательно восходящее движение тона:



Так как интервал между re и mi (малый тон) меньше, чем между do и re, то и малый промежуток, остающийся между диезом и бемолем в этом интервале, еще меньше, чем между do ♯ и re ♭. Бемоли и диезы имеются также и при промежутках в полутон, напр. между mi и fa; но здесь промежуточные ноты идут в таком порядке: fa ♭ и mi ♯, так как диез при mi и бемоль при fa заходят друг за друга, при чем промежуток между ними еще меньше, чем между re ♯ и mi ♭ (эти минимальные промежутки называются коммами); следов., здесь имеем последовательность:



Такая, усложненная диезами и бемолями, гамма носит название хроматической, в отличие от основной, без этих усложнений, или диатонической.

Из сказанного достаточно видно, как сложна физическая гамма в своем хроматическом виде: рояль для такой хроматической гаммы должен содержать еще две клавиатуры — для диезов и бемолей, или даже более, если присоединить двойные диезы и бемоли. Это крайне

---

[1]) Промежутки между основным тоном и нотою с диезом или бемолем получают теперь сложное название, напр. промежуток между do и sol ♭ считается за уменьшенную квинту, а между do и sol ♯ за увеличенную квинту, и т. д.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ БИБЛИОТЕКА Общественных Наук Академии Наук СССР

АН СССР

затрудняло бы технику фортепианной игры. Поэтому потребовалось *упрощение* путем приведения мало отличающихся между собою по высоте смежных диезов и бемолей к некоторой средней величине. Так создалась в первой половине XVIII в. так наз. *темперированная* настройка, в которой мажорные и минорные тоны были уравнены, при чем диез известного тона стал совпадать с бемолем последующего,[1]) а полутоновые промежутки *mi—fa*, *si—do* не заключая уже промежуточных диезов и бемолей. Так составилась лестница тонов темперированной гаммы в пределах октавы из 12 полутонов с совершенно равными промежутками, для чего число вибраций следующего полутона должно получаться из предыдущего числа чрез умножение последнего на некоторый постоянный множитель, именно—на $\sqrt[12]{2} = 1{,}0594$ (а для целого тона на $\sqrt[6]{2} = 1{,}1225$).[2]) Мы уже указывали, что в научной или физической гамме принято c_1=256 v. d., для темперированной же гаммы в основание берется нота a_1 (или la_3)=435 v. d.[3]), и соответственно ей нота c_1 (или do_3), согласно вычислению, должна равняться иррациональному числу ок. 258, 65 v. d., и вообще числа колебаний тонов и полутонов темперированной гаммы, за исключением лишь тона *a* или *la*, взя-

---

[1]) Таким образом в этой гамме нет разницы в высоте между нотою *c* диезом и следующею нотою *c* бемолем; отсюда и промежутки между тоникою и этими нотами совпадают, напр. промежуток между *do* и *sol* ♯ тождествен с промежутком между *do* и *la* ♭, так что получается безразличие между увеличенною квинтою и уменьшенною секстою, и т. п.

[2]) Искомый множитель для полутонов темперированной гаммы получается путем решения задачи на геометрическую прогрессию: между двумя числами (напр. *c*=128 и c_1=256) надо вставить 11 промежуточных чисел (для полутонов с равными промежутками), при чем каждое следующее число должно получаться из предшествующего чрез умножение на один и тот же множитель *q*—знаменатель прогрессии; требуется узнать, чему равняется этот последний?

$$c \underbrace{\ldots}_{m=11} c_1$$

В общем виде, когда между *a* и *b* нужно вставить *m* промежуточных членов, то по формуле последний член *b*

$$b = a \cdot q^{m+1}, \text{ откуда}$$

$$q^{m+1} = \frac{b}{a}$$

$$q = \sqrt[m+1]{\frac{b}{a}}$$

В нашем случае $m+1=12$, а *b* октава по отношению к исходной ноте *a*, так что отношение $\frac{b}{a}=2$, следов.

$$q = \sqrt[12]{2} \text{ или } 2^{\frac{1}{12}}$$

Поэтому, если $c=N$, то $c\sharp = N.2^{\frac{1}{12}}$, $d = N2^{\frac{1}{2}}$ и т. д.

[3]) Ранее принималось a_1=440 v. d (это именно и встречаем в трудах старших физиков, напр. Гельмгольца, Rayleigh), но на парижской международной конференции было установлено число 435 v. d. для данной ноты.

того за основание, будут выражаться иррационально, так как переход к каждому высшему полутону от предшествующего происходит от умножения числа колебаний предшествующего полутона на ир-

рациональную дробь $\sqrt[12]{2}$ (отсюда и аккорды при этой гамме, за исключением октав, уже не могут звучать столь стройно, как соответствующие аккорды гаммы физической, где все тоны получаются от умножения на рациональные дроби: впрочем ухо привыкает к темперированным аккордам и мирится). Если мы пожелаем в темперированной гамме переходить не от полутона к полутону, а от тоники к любому полутону в данной октаве, то будем иметь следующие множители (примем исходное *c* за единицу; в скобках помещаем названия тех же нот, принятые в немецкой музыке):

ut (c) = 1,00000

ut ♯ (cis) $2^{\frac{1}{12}}$ = 1,05946

re (d) $2^{\frac{2}{12}}$ = 1,18921

re ♯ (dis) $2^{\frac{3}{12}}$ = 1,18921

mi (e) $2^{\frac{4}{12}}$ = 1,25992

fa (f) $2^{\frac{5}{12}}$ = 1,33484

fa ♯ (fis) $2^{\frac{6}{12}}$ = 1,41421

sol (g) $2^{\frac{7}{12}}$ = 1,49831

sol ♯ (gis) $2^{\frac{8}{12}}$ = 1,58740

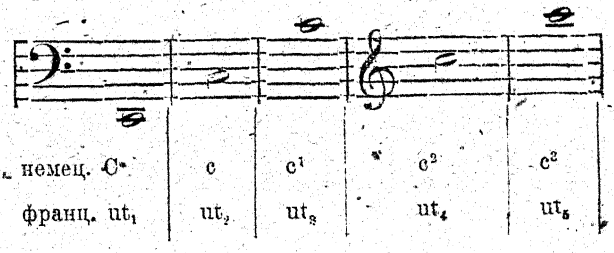
la (a) $2^{\frac{9}{12}}$ = 1,681179

la ♯ (ais) $2^{\frac{10}{12}}$ = 1,78180

si (h)[1]) $2^{\frac{11}{12}}$ = 1,88775

ut (c) верхней октавы = 2,00000

Примечание. Французы обозначают иначе не только ноты, но и их октавы, сравнительно с немецким обозначением, как это можно видеть из следующего примера:



Теперь мы дадим таблицу (стр. 21—22) с числами вибраций для хроматической гаммы физической и темперированной в пределах двух октав (с указанием для физической гаммы длины соответствующих звуко-

[1]) Вместо *h* применяется также обозначение посредством *b*.

вых волн в частях метра), при чем для темперированной гаммы указываются три ряда чисел: соответственно La^3=435 v. d., 440 v. d. и, кроме того, для удобства сравнения с физической гаммой, приводятся числа вибраций соответственно ut_2=128 v. d. [1])

Рассмотрев вопрос о высоте и силе звука мы перейдем к изучению природы т е м б р а, т. е. окраски или характера звука (см. стр. 10). Тембр в звуках представляет собою нечто отличающееся как от высоты, так и от силы их. В самом деле, мы легко различаем тон одной и той же высоты и силы, но взятый на разных инструментах, равно как разные гласные при одной силе и высоте произношения, или один и тот же гласный в произношении разных лиц. Во всех этих случаях различие сводится к различию тембра, для выяснения которого мы должны ознакомиться с так-называемыми *верхними тонами*, а также *резонансом полостей*.

Разнообразными опытами доказывается, что натянутая струна, вибрируя как одно целое, в то же время делится на большее или меньшее число равных частей, из которых каждая вибрирует как самостоятельная струна (при этом самостоятельно вибрирующие части струны разделяются между собою *узлами* или точками, не имеющими движения, между которыми находятся колеблющиеся пучности частей струны); другими словами—к вибрациям всей струны всегда присоединяются в большем или меньшем количестве вибрации ее аликвотных частей. Эти последние вибрации производят, разумеется (см. стр. 12), высшие тоны в сравнении с тоном целой струны—так называемые *гармонические* или *верхние* тоны (обертоны); при этом тон целой струны называется основным; присоединяющиеся колебания половины струны дают первый гармонический, колебания трети—второй гармонический, и т. д. Существует еще и другое обозначение этих тонов: все они называются *частными* тонами, при чем основной тон считается первым частным тоном, первый обертон будет вторым частным тоном, второй обертон—третьим частным тоном и т. д.; таким образом, число по порядку каждого частного тона показывает, во сколько раз число его колебаний больше, чем в основном тоне, между тем как номер обертона, на единицу меньше номера частного тона, так как основной тон не входит в счет. Верхние тоны, смешиваясь с основным тоном, и производят то, что называют тембром или звуковым оттенком, по которому мы отличаем один музыкальный инструмент от другого, один звук речи от другого. Если напр. одни и те же по высоте тоны, издаваемые кларнетом и скрипкою, различаются однако по качеству звука, то это потому,

[1]) В предлагаемой таблице мы опираемся на труд R. Koenig Tableau général des nombres de vibrations de la série des sons musicaux, Paris 1903. внеся при этом изменения соответственно тому, что принимаем счет не простыми, а двойными вибрациями (срв. выше стр. 5).

Физическая гамма ut_3=256 v. d.			Темперированные гаммы			
Тоны	Числа вибраций	Длина волн (v=340м. t=15° Ц.)	Тоны	ut_3=256 v. d.	La_3=435 v. d.	La_2=440 v. d.
Ut_2	*128*	2,656	Ut_2	*128*	*129,326*	*130,812*
Ut ♯	133,33	2,552	Ut ♯	135,611	137,016	138,591
Re ♭	138,24	2,459				
Re	*144*	2,361	Re	*143,675*	*145,163*	*146,832*
Re ♯	150	2,266	Re ♯	152,218	153,796	155,563
Mi ♭	153,60	2,213				
Mi	*160*	2,125	Mi	*161,269*	*162,940*	*164,813*
Mi ♯	166,66	2,040				
Fa ♭	163,84	2,075				
Fa	*170,66*	1,992	Fa	*170,859*	*172,629*	*174,614*
Fa ♯	177,77	1,912	Fa ♯	181,019	182,895	184,997
Sol ♭	184,32	1,844				
Sol	*192*	1,770	Sol	*191,783*	*193,770*	*195,997*
Sol ♯	200	1,700	Sol ♯	203,187	205,292	207,652
La ♭	204 80	1,660				
La	*213,33*	1,593	La	*215,269*	*217,500*	*220.*
La ♯	222,22	1,530	La ♯	228,070	230,433	233,131
Si ♭	230,40	1,475				
Si	*240*	1,416	Si	*241,631*	*244,135*	*246,941*
Si ♯	250	1,360				
Ut ♭	245,76	1,383				

Физическая гамма ut^3= 256 v. d.			Темперированные гаммы			
Тоны	Числа вибраций	Длина волн (v=340м., t=15° Ц.)	Тоны	ut_3=256 v. d.	La_3=435 v. d.	La_3=440 v. d.
Ut_3	*256*	1,328	Ut_3	*256*	*258,652*	*261,625*
Ut ♯	266,66	1,276	Ut ♯	271,222	274,033	277,182
Re ♭	276,48	1,229				
Re	*288*	1,180	Re	*287,350*	*290,327*	*293,664*
Re ♯	300	1,133	Re ♯	304,437	307,592	311,127
Mi ♭	307,20	1,106				
Mi	*320*	1,062	Mi	*322,539*	*325,881*	*329,627*
Mi ♯	333,33	1,020				
Fa ♭	327,68	1,037				
Fa	*341,33*	0,996	Fa	*341,719*	*345,229*	*349,228*
Fa ♯	355,55	0,956	Fa ♯	362,038	365,790	369,224
Sol ♭	368,64	0,922				
Sol	*384*	0,885	Sol	*383,566*	*387,541*	*391,995*
Sol ♯	400	0,850	Sol ♯	406,374	410,585	415,304
La ♭	409,60	0,830				
La	*426,66*	0,796	La	*430,539*	*435*	*440*
La ♯	444,44	0,765	La ♯	456,140	460,866	466,263
Si ♭	460,80	0,737				
Si	*480*	0,708	Si	*483,263*	*488,271*	*493,883*
Si ♯	500	0,680				
Ut ♭	491,52	0,691				
Ut_4	*512*	0,664	Ut_4	*512*	*517,305*	*523,251*

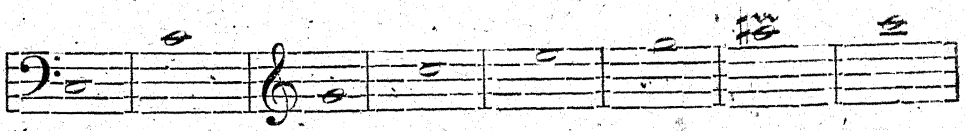
Примечание. В предшествующем выпуске нашего Курса мы уже разъяснили, почему при экспериментально-фонетических исследованиях мы предпочитаем определять высоту и интервалы согласно темперированной гамме (см. вып. II, стр. 31—32).

что придаточные тоны скрипки отличны от придаточных тонов кларнета;[1]) это есть случай прибавления к равным величинам неравных,—суммы также получаются неравные.

Вообще, колебания или вибрации верхних тонов получаются умножением числа колебаний основного тона на 2, 3, 4 и т. д. Так, для основного тона в 128 v. d. (т. е. для тона *c* или ut_2 научно-физической гаммы) мы имеем следующий ряд частных тонов и обертонов:[2])

1) 128 v. d.—*основной тон* или первый частный тон;
2) 128×2=256 v. d.: это—*первый верхний тон* или второй частный тон (ut_3), приходящийся на октаву выше основного,
3) 128×3=384 v. d.: *второй верхний тон* или третий частный (sol_3), квинтой выше октавы;
4) 128×4=512 v. d.: *третий верхний тон* или четвертый частный (ut_4), на кварту выше предшествующего верхнего тона или вторая октава основного тона;
5) 128×5=640 v. d.: *четвертый верхний тон* или пятый частный (mi_4)—на терцию выше предшествующего верхнего тона: и т. д.

Как видим, по мере последовательного перехода к высшим верхним тонам интервалы между ними все более сужаются, как это наглядно иллюстрирует для взятого нами примера следующее нотное представление:



Основ. т.	1-й в. т.	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
Ut_2	Ut_3	Sol_3	Ut_4	Mi_4	Sol_4	$La_4\sharp$	Ut_5
128 v. d.	256	384	512	640	768	896	1024

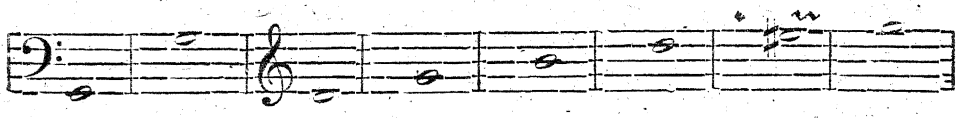
В качестве основного тона можно взять любой другой, и соответственно указанным отношениям (т. е. 1 : 2 : 3 : 4 и т. д.) мы получим тогда для него и соответственные верхние тоны. Пусть

---

[1]) Одни музыкальные инструменты более богаты обертонами по сравнению с другими; верхних тонов у скрипки, напр., найдено до 15. При этом обертоны, уступая по силе основному тону, вместе с тем слабеют в той или другой постепенности в порядке своих номеров. Как увидим впоследствии, в гласных звуках усиливаемые характерные обертоны—в отличии от музыкальных инструментов—имеют в каждом гласном свою определенную высоту независимо от номера по порядку.

[2]) Для определения соответствия чисел колебаний тонов физической гаммы и темперированной см. таблицы на стр. 21—22.

основным тоном будет Sol_1; в таком случае мы имеем следующий нотный ряд верхних тонов с их основным:

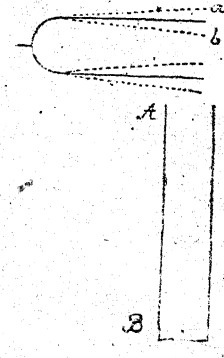


Основ. т.	1-й в. т.	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
Sol_1	Sol_2	Re_3	Sol_3	Si_3	Re_4	$Mi_4\sharp$	Sol_4
96 v. d.	192	288	384	480	576	672	768

Резонанс звуков состоит в том, что они могут быть усилены посредством резонирующих поверхностей, ящиков и разного рода полостей. Если мы поставим звучащий камертон на такую поверхность или ящик, то ясно заметим усиление звука; это происходит оттого, что сотрясения камертона сообщаются поверхности или же ящику и воздуху находящемуся внутри ящика, которые таким образом становятся тоже звучащими телами. Вполне понятно, что такое усиление звука происходит на счет энергии звучащего камертона; в самом деле, сам камертон издает очень слабый тон, но зато звучит продолжительное время; если же его поставить на резонансовый ящик, то хотя тон будет звучать сильно, но продолжаться будет лишь короткое время. При нашем произношении вибрации голосовых связок сообщаются не только воздушной массе артикуляционных полостей, но также и другим частям говорильного аппарата—хрящевому остову гортани, грудной клетке, костям головы, соколебание которых, передаваясь окружающей воздушной среде, служит таким образом к увеличению звукового эффекта голоса.

Следующий опыт наглядно показывает роль резонансовых полостей при усилении звуков. Я держу звучащий камертон, делающий 256 колебаний в секунду, над отверстием стеклянного сосуда, глубина которого равняется 16 дюймам или 40 сант. [1]) Звук камертона едва слышится. Затем я осторожно подливаю воду в сосуд, вследствие чего столб воздуха, находящийся под вибрирующим камертоном, укорачивается. Звук теперь усиливается и достигает значительной силы по мере возвышения водяного столба, но далее ослабевает и наконец пропадает. Однако, отливая воду из сосуда, я заставляю звук снова появляться и усиливаться. Это усиление звука и будет резонансом. Тот же опыт с раз-

Рис. 67.



[1]) Один дюйм=2½ сантиметрам.

ными камертонами показывает, что каждому соответствует своя особая высота воздушного столба, при которой звук камертона слышен всего сильнее. Спрашивается, какая же это высота? Для нашего камертона, делающего в секунду 256 колебаний, эта высота = 13 дюймам или $32\frac{1}{2}$ сант. Так как длина звуковой волны такого камертона равняется, как мы видели (стр. 13), 4 ф. 4 д. = 52 дюймам или 130 сант., то, следов., 13-дюймов составляют четверть длины звуковой волны, посылаемой нашим камертоном, или—прибегая к формуле, можем сказать, звук наиболее усиливается или имеет наибольшую полноту резонанса при высоте или длине резонансового столба воздуха, равной $\frac{\lambda}{4}$.[1]) Посмотрим теперь, как об'ясняется это соотношение. Вообразим ножку камертона, колеблющуюся между пунктами a и b, и под нею сосуд AB. В то время, как ножка проходит расстояние от a до b, совершается первая половина волны, именно—сгущение. Если длина целой волны = 52 дюймам, то длина половины = 26 дюймам, а потому уплотнение или сгущение воздуха, прошедши первые 13 дюймов и достигнув дна сосуда, отражается от него и проходит 13 дюймов назад, всего 26 дюймов. Отраженная волна встречает ножку камертона в тот момент, когда последняя готова двинуться от b к a. Вместе с этим движением ножки начинается вторая половина волны, соответствующая разрежению воздуха. Это разрежение точно также доходит до дна сосуда, возвращается чрез отражение назад и встречает ножку камертона в тот момент, когда она достигает точки a. Таким образом, движение камертона у нас вполне совпадает с движением воздушного столба AB, откуда и происходит наибольшая сила для звука данного тона. Если мы попробуем вызвать собственное звучание полости, а для этого будем дуть над нашим сосудом, то звук, получающийся при этом будет иметь как раз данную высоту тона: сосуд (или трубка) в этом случае избирает из воздушных сотрясений струи те, которые соответствуют его длине, и таким образом в трубке возникают стоячие периодические волны, производящие музыкальный звук.[2]) Таким образом наибольшее усиление тона камертона получается в том случае, когда собственный тон резонансовой полости одинаков по высоте с тоном звучащего камертона. Подобным образом если пропускать струю воздуха с помощью резинового балона, отверстие которого снабжено трубочкой с достаточно малым выходным отверстием, мимо раскрытого для того или другого гласного отверстия рта, то

---

[1]) Это положение удобно проверяется на опыте при помощи коллекции Edelmann'a с серией непрерывно изменяющихся по высоте камертонов и непрерывно изменяющихся по длине резонаторов (адрес фирмы: Physikalisch-mechanisches Institut von Prof. Dr. M. Th. Edelmann u. Sohn, München, Nymphenburgerstrasse 82; название коллекции: „Bezold's kontinuierliche Tonreihe").

[2]) Та же трубка, но с обоих концов открытая, издает тон октавою выше.

этим вызовется собственный тон ртовой полости, неодинаковый при разных гласных и имеющий как раз оттенок данного гласного.

Выяснение качественного различия гласных звуков и сводится к выяснению соотношения между звучанием голосовых связок и их обертонов и резонансовым тоном полости рта. Вопросу этому посвящена следующая глава.

II. Учение об акустической природе гласных звуков с историческим очерком вопроса. Разные методы исследования тембра гласных звуков. Тембровая высота гласных в общерусском произношении.

Как мы говорили, к различию тембра сводится и качественное различие гласных звуков, при чем, не смотря на перемены в высоте голосового тона (выступающего в роли основного при их произношении), однакож усиливаемые характерные обертоны гласных удерживают — в отличие от музыкальных инструментов — одну и ту же особую для каждого гласного постоянную высоту, не зависящую от высоты голосового тона и от номера его обертонов. При об'яснении этой особенности одни ученые, вслед за Гельмгольцем, полагают, что из обертонов голосовых связок усиливаются ртовым резонансом те, которые соответствуют настройке полости рта при данном гласном (независимо от номера обертона по порядку); другие, согласно с кенигсбергским физиологом Германом, причину явления усматривают в собственных тонах и шумах, возникающих в ртовой полости при поступательном движении через нее звучащего выдыхательного тока воздуха, и притом совершенно независимо от высоты тона голосовых связок с его обертонами; считая же тон ртового резонанса виновником тембрового качества гласного и независимым от обертонов голосового тона гортани, Герман соответственно с этим принял для обозначения ртового собственного тона гласных особый термин — „формант“ (т. е. образователь) гласного. Мы склоняемся более к последнему воззрению, так как оно об'ясняет то обстоятельство, что характерные оттенки звучно произнесенных гласных одинаковы с оттенками тех же гласных при шепотном произношении и даже — глухом (т. е. производимом простым выдыханием), где уже нет голосового тона с его обертонами;[1]) в пользу принимаемого нами воззрения на гласные говорит и упомянутый (на стр. 25—26) опыт с воздушной струей, пропускаемой мимо ртового отверстия при артикуляционном укладе разных гласных, так как

[1]) Срв. Рус. Фил. Вестн. 1882 г., № 1 (т. VII), стр. 97.

вызываемый при этом собственный тон ртовой полости оказывается окрашенным как раз в оттенок соответствующего гласного. Указанные две теории гласных звуков началом своим восходят к более раннему времени, и мы считаем не лишним дать краткий исторический очерк постепенного развития физико-акустического учения о гласных звуках.[1])

Разработка вопроса о природе и образовании гласных, т. е. звуков с наибольшею сонорностью, открывается наблюдениями кильского профессора Reyher'a (1619 г.), указавшего в нотах на определенное различие характерной высоты тона отдельных гласных; позже Hellwag в своем труде Dissertatio physiologo-medica de formatione loquelae (Tübingen 1780) расположил гласные по относительной их высоте в следующем порядке: *u*, *o*, *ä*, *a*, *ë*, *e*, *i*, при чем *u* соответствует самому низкому тону, *a* среднему, а *i* самому высокому. Приблизительно тогда же Kempelen, стремясь построить говорящую машину, исследует звуки речи со стороны их образования, отчасти и в отношении акустической природы. Относительно этой последней он высказывается следующим образом: „Мне кажется, когда я произношу различные гласные даже в одном и том же тоне, они все же имеют в себе нечто такое, что обманывает мой слух и заставляет меня думать, как будто в них заключается мелодия. ...и мне невольно кажется, что буквы с большим отверстием ртового канала издают более низкий тон, а с меньшим— более высокий". Как известно, в своих поисках Кемпелен достиг способа искусственно воспроизводить гласные звуки, при чем он для произведения голосового тона воспользовался „ударяющим" язычком с подложенною под него кожею для смягчения звука, а в качестве ртовой полости присоединял овальной формы наставную деревянную трубку с разрезом по длине и соединенную посредством шарнира с язычковым аппаратом, так что нижняя ее половина могла опускаться, подобно челюсти, соответственно различию ширины раствора рта при разных гласных. Таким путем ему удалось получить довольно хорошо гласные *a*, *o*, *u*, *e*, но *i* только приблизительно. Позже он применял еще воронку из каучука, которой он рукою придавал желаемую форму или в которую вводил руку. Различие между тем или другим гласным по Кемпелену производится именно ничем иным, как широким или же более узким проходом, который противопоставляют голосу язык или губы, или тот и другие вместе. В большей мере теоретическую разработку вопроса о гласных представил Kratzenstein, профессор копенгагенского университета, в своем мемуаре (1781 г.) на тему Петербургской Академии Наук о

[1]) См. Grützner, стр. 170 сл., Gutzmann стр. 113 сл., Rayleigh, II, стр. 470 сл.

природе и искусственном воспроизведении гласных, представивший способ и более или менее удачного воспроизведения гласных посредством комбинации трубок различной формы, при чем для произведения голосового тона он впервые воспользовался „проходящим" язычком[1]) (хотя в то же время странным образом приписывал произведение голоса не голосовым связкам, а надгортаннику). Некоторые детали в работе Кратценштейна сохраняют свой интерес и для настоящего времени, как напр. попытки точного определения расстояний языка от неба и от передних зубов, расстояний между обоими рядами зубов и между губами, и т. п.[2])

Хотя Кемпелену и Кратценштейну и удалось искусственное воспроизведение гласных звуков более или менее удовлетворительным образом, однако они еще не могли составить себе отчетливого понятия о физико-акустической природе этих звуков. К решению этой последней задачи впервые подошел в замечательном мемуаре[3]) английский ученый Robert Willis в 1829 г. Повторив сначала с успехом опыт Кемпелена над производством гласных, при чем был применен „проходящий" язычек, изобретенный Кратценштейном, Виллис перешел затем к исследованию звукового эффекта надставных цилиндрических труб изменяющейся длины, соединенных с язычковым инструментом; посредством их он получал различные гласные звуки путем изменения длины надставной трубы. Самые короткие трубы давали ему *i*, затем более длинные *e*, *a*, *o* и, наконец, *u* (при дальнейшем удлинении гласные являлись снова в обратном порядке, а потом появляются еще, но не так отчетливо, уже в первом порядке); при этом полости тожественной длины и следов. настройки „будут придавать одно и то же качество гласного звуку данного язычка или всякого другого при условии, если тон язычка ниже, чем тон полости". „Основная высота произведенного звука есть всегда высота язычка или первичных колебаний, но произведенный гласный звук всегда останется тожественным при одном и том же значении *s* (т. е. при одном и том же периоде вторичных колебаний). Так, напр., высота g_2 надставной трубы принадлежит специально гласному *a* (напр. в английском слове Paw); если при этом язычек делает 512 v. s. в секунду, то основной тон будет c_1, а гласный *a*; если к той же самой надставной трубе приложить другой язычек, делающий 340 v. s. в секунду, то основной тон будет *f*, но гласный тем не менее останется *a*. Отсюда явствует, что слух при утрате сознания высоты *s* специо-

[1]) В настоящее время принимается, что *грудной* голос производится голосовыми связками по типу „ударяющих" язычков, а *головной*—по типу „проходящих".

[2]) Срв. Булич С. К. Очерк истории языкознания в России, т. I (XIII в.—1825 г.), 1904 г., стр. 260—261.

[3]) On the Vowel Sounds, and on Reed Organ-pipes. Camb. Phil. Trans. vol. III. (1829), стр. 231 сл.

бен однако, установить тожество ее с помощью качества данного гласного". Willis применил еще другой способ для искусственного воспроизведения гласных, говоря об этом следующим образом. „Из предположения, что данный гласный есть результат его характерной ноты, должно следовать то, что если мы сможем произвести эти тоны некоторым другим способом, то мы можем ожидать услышать гласные звуки. Robison и другие показали, что ствол гусиного пера, удерживаемый против вращающегося зубчатого колеса, будет производить музыкальный тон при быстром повторении ударов пера по зубцам. Вместо пера я воспользовался часовой пружиной, слегка надавливая ее на зубцы колеса, так чтобы каждый удар переходил в музыкальный тон пружины. В то же время пружина была захвачена в пару щипчиков, так чтобы возможно было допустить некоторое изменение в длине вибрирующей порции. Эта система очевидно производит сложный звук, подобно звуку трубы и язычка, и изменение в длине пружины должно поэтому произвести тот же самый эффект, как и изменение в длине трубы. В результате произведенный звук, сохраняя ту же самую основную высоту, пока колесо вращается однообразно, принимает однако все гласные оттенки, если наличная длина пружины меняется, и притом с значительною явностью, если принять надлежащие меры против грубого и неприятного качества самого звука". Из представленного видно, что Willis по справедливости может считаться родоначальником научной теории гласных.

Другой выдающийся английский ученый Wheatstone (1837 г.), рассматривая опыты, которые производили Kratzenstein, Kempelen и Willis, приходит к другой теории: он старается доказать, что звук гласного является результатом „кратного резонанса", под которым он разумеет резонанс воздушной полости, собственной тон которой соответствует не основному тону колеблющегося тела, но тону массы, которая колеблется в 2, 3, 4 и т. д. быстрее, чем это тело; при этом звук гласного ясно выступает только тогда, когда имеется на лицо относительное преобладание обертона над основным тоном, но окраска гласного исчезает, когда, как напр. в большинстве духовых инструментов, основной тон значительно превосходит обертон. Хотя не всякий кратный резонанс ведет к звуку гласного, но несомненно, кратный резонанс и качество гласного суть различные формы одного и того же явления.

Таким образом были выдвинуты две теории гласных: Виллис полагал, что ртовый тон гласного независим от голосового и может не быть гармоничным по отношению к нему, между тем как Уитстон принимал гармоническое соотношение между кратным ртовым резонансом и голосовым тоном (по Виллису же необходимо лишь, чтобы голосовой тон был ниже тона полости). Не трудно видеть,

что воззрение Уитстона ближе подходит к учению Гельмгольца, Виллис же является предшественником учения Германа. В новейшее время отдельные ученые частью примыкают к точке зрения Гельмгольца (напр. Hensen и Pipping), другие же—к точке зрения Германа (напр. Boeke, Самойлов, Томсон), становящейся господствующею.

Из сказанного выясняется, что как при той, так и при другой точке зрения существенно важным является *изучение собственных тонов полости рта при разных гласных*. Исследование это производится весьма разнообразными способами, которые разбиваются на субъективные и объективные: в первом случае слухом определяется резонансовая высота полости рта при соответствующих укладах, а во втором производится математический анализ тембровых кривых, получаемых при помощи разных записывающих приборов. Имея в виду объективным приемам (куда относятся исследования Hermann'a и Самойлова) посвятить следующую главу, мы остановимся здесь только на способах субъективной оценки. В этом случае для определения собственного тона полости рта при отдельных гласных пользуются, во первых, собранием *камертонов* разной высоты тона следующим образом: придав полости рта артикуляционный уклад того или другого гласного, ударяют попеременно камертоны, поднося их к отверстию рта; при этом тон того камертона, который соответствует собственному тону воздушной полости, вызовет наибольший резонанс (этим приемом пользовался уже Уитстон). Кроме того, обладая тонким музыкальным слухом, можно и непосредственно изучать настройку полости рта при разных гласных; для этого нужно произносить гласные легким *шепотом* (или даже простым выдыханием воздуха) при соответствующем артикуляционном укладе ротовой полости, и тогда можно заметить, что каждый гласный характеризуется особой специальной для него высотою (этот прием впервые был применен голландским физиологом Дондерсом, 1853 г.). Гельмгольц для той же цели пользовался специальными *резонаторами*; это—металлические пустые цилиндры разного размера с двумя противоположно расположенными отверстиями, широким и узким, из которых узкое отверстие резонатора приставляют к уху; ухо слышит тон, попадающий в резонатор, сильнее в том случае, если он соответствует основному тону резонатора, прочие же тоны тем слабее, чем более их высота отклоняется от собственного тона резонатора,—таким путем и определяется сильнейший резонансовый тон гласных.[1] Наконец, весьма доступным и вместе

[1] Упомянем еще об опытах Ауэрбаха, которые он производил с помощью резонаторов в лаборатории Гельмгольца над относительною силою обертонов при гласных, петых в разных тонах, при чем он имел в виду как характерные обертоны

с тем вполне точным мы считаем способ *воздушной струи*, применённый г-жою Берг и состоящий в том, что мимо отверстия рта при том или другом артикуляционном укладе посылается специальным аппаратом[1]) или даже просто резиновым баллоном с трубочкою воздушная струя, вызывающая в полости рта тембровое звучание определенной высоты, которая и должна считаться тембровым тоном данного гласного (срв. выше стр. 25—26).

Считаем уместным с большею подробностью остановиться на наблюдениях Гельмгольца, которые он производил с помощью камертонов и резонаторов.[2])

При губных гласных звуках *o* и *u* полость рта суживается посредством губ. Высота такой вместимости будет тем ниже, чем отверстие ее уже. При гласном *u* ртовое отверстие наиболее сужено, а чрез оттяжку языка кзади полость рта по середине возможно расширена, принимая вид бутылки без горлышка. Высота тона таких бутылковидных вместимостей тем ниже, чем больше полость и чем отверстие ее уже. При таких условиях резонанс при *u* самый низкий, а именно соответствует, по Гельмгольцу, безчертному *f*. Если постепенно перейти от *u* к *o*, то резонанс постепенно повышается, так что при полнозвучном гласном *o* настройка полости рта, по Гельмгольцу, равна $\dot{b}$.[3]) Уклад рта при *o* особенно благоприятен для резонанса: отверстие рта не слишком велико и не слишком мало, а полость рта достаточно обширна. Поэтому, если, ударив камертон, настроенный в $\dot{b}'$, поднести к ртовому отверстию в то время, когда говорят тихо *o*, или же только придавая рту такой уклад, как будто бы хотят сказать *o*, то слышат тон камертона отзывающимся весьма полнозвучно и громко, так что его может слышать целая аудитория.

Переводя постепенно полость рта из уложения *o* (через o^a и $\ddot{a}$) в уложение *a*, мы сообразно этому повысим постепенно на одну октаву до $\dot{b}''$ и резонанс. Этот тон отвечает северно-немецкому *a*; несколько более резкое *a* англичан и итальянцев повышается до высоты тона $\dot{d}''$, следовательно еще терцией выше. В виду такого явления, что с изменением в оттенке гласного изменяется и настройка полости рта, Гельмгольц советует лингвистам для характеристики гласных различных языков определять высоту тона сильнейшего резонанса для уложений полости рта.

При гласных *ä*, *e* и *i* губы уже не образуют сужения, а оттягиваются кзади; сужение образуется между передней спинкою

гласных с постоянною высотою, так и остальные, уже слабеющие постепенно в порядке номеров; сила верхних тонов оценивалась на слух по отношению к силе всего звука, принимавшейся за 100 (см. Grützner стр. 178 сл.).

[1]) Описание прибора и пользования им см. в РФВ 1914, № 1.

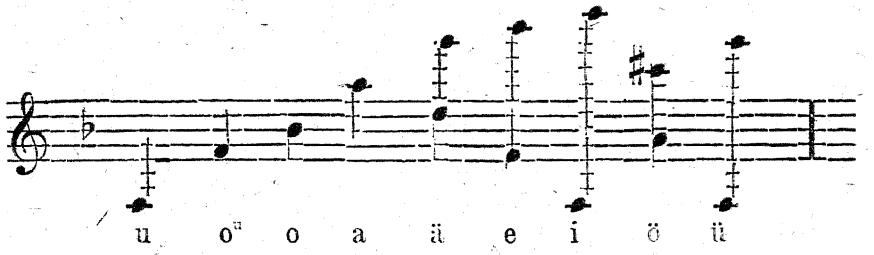
[2]) См. Гельмгольц стр. 145 сл., особенно стр. 149—151.

[3]) Это вариант обозначения нот: $\dot{b}' = b_1$, $\dot{b}'' = b_2$, $\dot{d}''' = d_3$ и т. п.

языка и небом, а сзади по направлению к гортани полость расширяется благодаря тому, что корень языка втягивается при одновременном приподнятии гортани. При этом форма полости рта приближается к форме бутылки с узким горлышком. Тело бутылки лежит в этом случае позади в глотке, а горлышком служит узкий канал между верхнею поверхностью языка и твердым небом. В данной последовательности ряда гласных *ä*, *e*, *i*, эти изменения усиливаются, так что при *i* полость бутылки наибольшая, а шейка или горлышко самое узкое. Если применять бутылку с узким горлышком в качестве усиливающей полости, то легко находят два тона, из которых один может быть рассматриваем как собственный тон тела бутылки, а другой как таковой же горлышка бутылки. Конечно, воздух тела бутылки не может колебаться совершенно независимо от воздуха в горлышке и поэтому соответствующие собственные тоны обеих частей должны выйти несколько иначе, а именно ниже, чем если бы тело бутылки и горлышко были отделены друг от друга и были бы испытываемы в отдельности по их резонансу. Горлышко составляет приблизительно короткую с обоих концов открытую трубку. Правда, что его внутренний конец не сообщается непосредственно с внешнею средою воздуха, а только с внутреннею полостью бутылки; но если только горлышко довольно узко, а тело бутылки довольно обширно, то последнее в отношении колебаний воздуха горлышка может быть рассматриваемо как свободная воздушная среда. Это условие встречается более всего при *i*; длина канала между языком и небом, считая от верхних зубов до заднего края костяного неба, заключает приблизительно 6 сантиметров. Открытая трубка такой же длины, будучи придуваема, дала бы тон e'''', тогда как наблюдения для усиленного тона при *i* дают приблизительно d'''', что согласуется постольку, поскольку это возможно при вычислении высоты тона столь неправильно составленной трубки, каковая имеется между языком и небом. Сообразно этому *ä*, *e* и *i* имеют более высокий и более низкий резонансовый тон. Более высокие тоны составляют продолжение восходящего ряда собственных тонов гласных *u*, *o*, *a*. Так при *ä* собственный тон передней полости, по Гельмгольцу, выше, нежели при *a*, при *e* еще выше, а выше всего при *i*. Нижайшие собственные тоны, которые принадлежат задней полости, при постепенном переходе от *ä* к *i* постепенно понижаются (нисходят), так что для *i*, по Гельмгольцу, такой тон приблизительно так же низок как и для *u*, т. е. *f*, при *e* выше и еще выше при *ä*. [1]) Гельмгольц определил резонанс и характерных для немецкого языка глас-

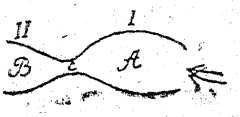
[1]) Возникает вопрос, каким же способом определяется настройка удаленной полости, лежащей позади более или менее узкого канала? Нижайшие собственные тоны, которые принадлежат задней части полости рта, определяются с большим трудом. Для этого — говорит Гельмгольц — можно пользоваться камертонами, хотя резонанс

ных *ö* и *ü*. Собственные тоны полости рта, по наблюдению Гельмгольца, почти независимы от пола и возраста: он находил те же резонансы у мущин, женщин и детей. В виде итога, резонанс полостей, лежащих над гортанью, для различных гласных немецкого языка Гельмгольц выразил следующим образом в нотной передаче:



Из позднейших работ, стремящихся с возможною подробностью исследовать по субъективному методу вопрос об общих условиях резонанса артикуляционных полостей при произношении, мы остановимся на сочинении O. Bremer'a „Deutsche Phonetik" (1893), стр. 112—174. Представлю вкратце сущность его взглядов с некоторыми моими критическими замечаниями. Резонансовые тоны гласных Bremer обосновывает на некоторых общих акустических положениях, высказываемых им однако без доказательств и тем не менее возводимых на степень „законов". Наиболее общим из этим положений является следующее: собственной тон надставной трубы, длина которой не менее чем в шесть раз превосходит ширину, повышается при условии укорочения длины или расширения трубы в сторону выходного отверстия (стр. 114). Стремясь стать ближе к говорильному аппарату, Bremer переходит к случаю двух соединенных между собою суженным проходом полостей разной формы (позволим себе изобразить рисунком). Если проход *c*, соединяющий полости A и B, не широк, то главным определителем звука является тон второй полости B; что касается полости A, то собственный тон принадлежит скорее не ей, а всей двойной полости (A+B). [1]) Хотя последнее положение о собственном тоне

Рис. 68.



при этом относительно слаб, так как он должен быть произведен чрез длинное узкое горло полости, и притом появляется только тогда, когда издают соответствующий гласный тихим шепотом; и исчезает когда замолчат, потому что в последнем случае тотчас же изменяется вид полости, от которой этот резонанс зависит; нужно также ударенный камертон подносить как можно ближе к отверстию воздушной полости, лежащей позади верхних зубов. Таким образом Гельмгольц определил резонанс для *a*—*d'''* и для *e*—*f'*, но для *i* он не мог получить резонанса камертоном и вывел заключение из обертонов, что резонанс при этом гласном приблизительно так же низок, как и для *u*, т. е. *f*. Таким образом, если переходят от *a* к *i* то нижние собственные тоны полости рта нисходят, тогда как верхние восходят.

[1]) О собственном тоне всей надставной трубы Bremer замечает, что таковой может восприниматься слухом лишь при условии, если соединительный проход широк, как напр. при губном или язычно-небном взрыве сонорных *m* и *n* или сильно редуцированных шумных звуках губных, напр. *w*, *f* и др. (стр. 129—130).

полости А он высказывает не вполне уверенно, однако в дальнейшем изложении принимает его уже за категорическое. Признавая за собственным тоном второй полости (В) доминирующее значение, он считает этот тон зависящим от тех же условий, как и собственный тон простой надставной трубы, т. е. от длины полости и от ширины выходного отверстия, а кроме того еще и от ширины прохода, связующего ту и другую полость (другими словами—от степени заднего сужения передней полости), при чем сужение прохода повышает тон, а расширение понижает (стр. 115, 127). Вооружившись этими положениями, Bremer и выстраивает теорию собственных тонов гласных. При этом выходным устьем ртовой полости (В) он считает губы, так что размер их отверстия (площадь его) определяет собою и раскрытость этой полости; форма же отверстия—округленная или же щелевидная—по Bremer'у не оказывает влияния на высоту собственного тона (стр. 121); поэтому при стиснутых зубах, но широко раскрытых губах, полость должна считаться широко открытою; не влияет заметно по Bremer'у на изменение длины полости выпячивание и втягивание губ, при чем это положение он догматически мотивирует тем, что при невыпяченных губах ртовая полость заканчивается на средней линии губ, тогда как при выпяченных губах их внутреннею поверхностью, вследствие чего место передней границы полости почти не меняется (стр. 118—119); [1]) расширение челюстного угла, по скольку увеличивается расширенность переднего отверстия, несколько (так сказать—дополнительно) повышает собственный тон передней полости. Главным фактором, изменяющим переднюю полость и вместе с тем ее настройку, служит язык, который, передвигаясь своим бугром от задних частей неба к передним частям, постепенно сокращает переднюю полость и тем повышает ее тон; [2]) вертикальное же приближение языкового бугра в той или другой степени к небу делает соединительный проход более суженным, или же более расширенным, что́ тоже известным образом влияет на высоту резонансового тона. Пользуясь всеми этими, большею

---

[1]) Впрочем—замечает автор—далеко вперед выпяченные губы при равной величине выходного отверстия дают несколько более низкий тон полости рта, чем не выпяченные вперед губы (стр. 119); при губных гласных на долю выпячивания губ, слегка удлиняющего надставную трубу, приходится понижение на один тон.

[2]) Так, при *k* и *ch*, при нейтральной постановке губ, только через перемещение языкового бугра от наиболее заднего места приближения (у мягкого неба) к наиболее переднему месту приближения (у твердого неба) получается последовательный ряд тонов в об'еме более $2^1/_2$ октав, у самого Bremer'а от fis^1 до dis^4 (стр. 120) а при максимально открытых губах и увеличении челюстного угла тон может повыситься еще на квинту, у Bremer'а—до h^4 (стр. 122); эти пределы можно еще более расширить, если брать другие артикулирующее части языка (стр. 124, § 120). Если же произносить мягконебное *k* или *ch*, но с широко открытым ртом, а затем твердонебное *k* или *ch* при сравнительно малом раскрытии губ, то в таком случае вследствие компенсации факторов эффект будет сходный, и наш слух не может или едва может различить эти звуки.

частью догматически высказанными положениями, Bremer поясняет причины более высокого или же более низкого собственного тона отдельных гласных, при чем он везде довольно гладко справляется со встречающимися ему на пути трудностями. Так, напр., он утверждает (вопреки большинству), что место артикуляции гласного *о* лежит более кзади, чем при *и*. Чтобы доказать, что при этих условиях *о* все-таки имеет более высокий собственный тон, нежели *и*, Bremer говорит, что с одной стороны удлинение надставной трубы и вместе с тем расширение заднего отверстия (соединительного прохода) должно бы дать при *о* более низкий собственный тон, чем при *и*, но более широкий челюстный угол, а главное — более широкое раскрытие губ повышает резонансовый тон, и таким образом собственный тон гласного *о* выше, чем гласного *и* (что и требовалось доказать!).[1]) Конечно, пользуясь таким легким и удобным приемом мотивировки, всегда можно доказать любое желаемое положение.[2]) Из изложенного мною очевидно, что трактуемые Bremer'ом акустические вопросы требуют новой, тщательной и чисто опытной разработки, при чем, между прочим, нужно остановиться на вопросах: 1) что считать границею переднего ртового отверстия—зубы или губы, или в одних случаях зубы и в других губы;[3]) 2) действительно-ли при прочих равных условиях (напр. при индифферентном укладе) расширение челюстного угла повышает собственный тон, а уменьшение — понижает; 3) действительно-ли выпячивание или же втягивание губ так незначительно изменяет длину ртовой надставной трубы; 4) действительно-ли форма губного отверстия не играет никакой роли в характере собственного тона гласных и вообще звуков.[4])

Заметим еще, что пластографический метод Е. А. Meyer'а для изучения артикуляций языка, особенно с тем дополнением к

---

[1]) Крайние гласные *i* и *u* по Bremer'у в своих язычных артикуляциях взаимно удалены на $2^1/_2$—$3^1/_2$ сант., а в связи с этим *i* имеет на две октавы более высокий собственный тон, нежели *u*, при чем более октавы приходится на счет различной длины резонансовых полостей, а остальное на долю остальных факторов, т. е. разницы челюстного угла, втягивания и выпячивания губ и площади отверстия (стр. 158). По мере того, как задняя часть языка приближается к своему месту покоя, гласные звучат все более похоже друг на друга, в роде *a*, а при малом расширении челюстей—как индифферентный гласный (стр. 159).

[2]) Аналогичный прием встречаем при обсуждении резонансового тона *ch* в *ich* ‖ *ich* (стр. 127).

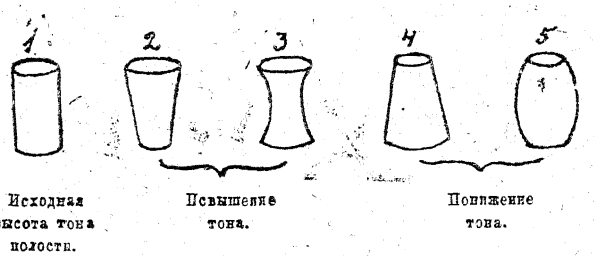
[3]) Срв. по этому поводу различие взглядов профф. Томсона и Щербы. Гельмгольц считает для гласного *i* переднюю границу полости от зубов, для *u* от губ, также для *ü* от переднего края губ.

[4]) По математическим вычислениям для *эллиптического* отверстия тон будет несколько выше, чем при *круглом* отверстии такой же площади (Auerbach стр. 453). Еще Sondhauss в статье о колебаниях воздуха в кубических трубах (Pogg. Ann., т. 81, 1850 г., стр. 351) указал, что и вид отверстия не остается без влияния на высоту тона, при чем тон при равных других условиях и при равной площади отверстия тем выше, чем больше контур отверстия. Поэтому круглые отверстия дают тон ниже по сравнению с квадратными, а последние более низкий сравнительно с прямоугольными или же имеющими вид правильного треугольника. Но, прибавляет он, это влияние столь незначительно, что может быть пренебрежено.

этому методу, какое сделано г-жою Берг,[1]) позволит воспроизводить артикуляционные полости звуков в более полном соответствии натуре и может повести далее к опытам над ними при тех или иных произведенных в них переменах с помощью протез; это конечно не исключает опытов и над произвольными *искусственными* полостями разной формы и различным образом изменяемыми, так сказать—теоретическими, что еще более углубит изучение ртового резонанса при произношении звуков и также послужит для более полного освещения вопросов фонетики.[2])

Примечание. В университетском кабинете экспериментальной фонетики производились пробные опыты над небольшими полостями разной формы, которые лепились из „пластелина", и при посредстве воздушной струи определялась высота их тона, при чем за основание сравнения принималась форма открытой цилиндрической трубки с дном:

Рис. 69.



Форма 2-ая может слегка напомнить уклад гласного *а*, 3-ья—*э*, *и*, 4-ая и 5-ая —*о*, *у*. Методическая постановка подобных опытов с точным измерением размеров полостей и нотными указаниями соответствующей резонансовой высоты несомненно будет содействовать дальнейшему прогрессу теории резонансовых тонов для ртовых артикуляционных полостей.[3])

В заключение представим в таблице сравнительные данные высот тембрового тона гласных в общерусском произношении по определению 4-х исследователей, производивших свои опыты разными приемами:

---

[1]) E. A. Meyer (см. Festschrift Wilhelm Vietor, 1910, стр. 166 сл.) приклеивал к искусственному небу сагиттально по средней линии бахромку из свинцово-оловянной полоски (станиоля), которая, когда небо вложено и произнесен определенный звук, артикулирующим языком пригибается; затем, с помощью остроумного прибора, изобретенного тоже E. A. Meyer'ом, не трудно нанести на шаблоны среднюю сагиттальную линию неба, а затем на них же и тем же прибором получать линии видоизмененной бахромы, и таким образом будем иметь сагиттальный разрез по средней линии ртового канала при артикуляции соответствующего звука. Г-жа Берг приготовляет искусственное небо, охватывающее еще и верхние зубы; к нижней поверхности зубов искусственного неба подклеивается род свешивающегося полога из оловянной бумаги, предварительно тщательно помятой пальцами, чтобы она приняв матовый характер, утратила первоначальную упругость; артикулирующий язык производит действительно пластическое вдавление в этом пологе, после чего с помощью измерительного прибора Meyer'а можно получить изображение не только сагитального серединного разреза канала, но и параллельных боковых разрезов, а сверх того и фронтальных, что приводит к более полному представлению о соответствующей артикуляции.

[2]) Срв. Rousselot стр. 839.

[3]) Если мы возьмем фляжку, несколько наполним водою и будем изучать ее резонансовый тон при разном наклоне, то, не смотря на изменения при этом конфигурации полости, резонансовой тон сохраняется один и тот же, однако повышаясь

	Самойлов c^1=256 v. d.	Щерба a^1=440 v. d.	Томсон a^1=435 v. d.	Берг a^1=435 v. d.
А	g^2—a^2 (768—853)	h^2 (980)	e^3—g^3 (1303—1550)	cis^3– d^3 (1096—1161)
Э	h^3—des^4 (1920—2208)	a^3—ais^3 (1816)	gis^3—ais^3 (1642—1843)	f^3—ais^3 (1381—1843)
I	d^4—e^4 (2304–2560)	fis^4—g^4 (3044)	cis^4—dis^4 (2192—2461)	d^4—dis^4 (2322—2461)
О	h^1—des^2 (480—552)	fis^2—g^2 (756)	gis^2—h^2 (821—976)	g^2—a^2 (775—870)
У	c^1—g^1 (256–384) и c^2—e^2 (512—641)	gis^1—a^1 (432)	f^2—g^2 (690—775)	e^2—fis^2 (652—731)
Ы	— —	h^2 (990)	$gis^3 < h^3$ (1642 < 1953)	e^3—f^3 (1303—1381)

или понижаясь, если мы прибавим или же убавим воды и тем соответственно изменим об'ем полости. Отсюда как будто напрашивается вывод, что резонансовый тон любой полости зависит (кроме свойств горлышка) лишь от ее об'ема. Некоторые фонетики (Scripture стр. 281 сл.) приводят по этому поводу математические формулы, напр. Soudhauss'a (см. Pogg. Ann. т. 79 и 81), который эмпирическим путем на основании своих многочисленных наблюдений над резонансом шаровидных полостей с выходной трубкой пришел к установлению следующей формулы для их резонанса:

$$n = C\sqrt{\frac{S}{VL}},$$

где n — искомое число колебаний, V — об'ем шара и L — длина трубки, S — площадь ее поперечного сечения, а C — выведенный из опытов коэффициент для перехода от подкоренной величины к искомому числу колебаний или — иначе — к резонансовому тону полости указанного типа. Формула показывает, что число колебаний такой полости прямо пропорционально квадратному корню из сечения трубки и обратно пропорционально об'ему шара и длине трубки и получается чрез умножение подкоренной величины на некоторый постоянный множитель C=93410. Однако эта формула и ей подобные недостаточны для определения тембровой высоты ртовой полости при гласных. Даже если мы дополним такие формулы случаями, где полость разделена на две соединительным каналом, и т. п., то все-таки остается не учтенным еще один существенный фактор—неодинаковое качество по твердости и мягкости стенок ртовой полости (срв. зубы, твердое небо, мягкое небо и пр.). А что этот момент не безразличен, доказывают опыты с органной трубой. Образователями тонов здесь являются воздушные столбы, и пока стенки сделаны из совершенно твердого материала, последние не оказывают влияния, высота тона в главных чертах одна и та же в металических, стеклянных или деревянных трубах. Но если стенки сделаны не из твердого материала, то высота тона изменяется, а именно тон при мягких стенках ниже. Савар показал, что трубки с пергаментными стенками звучат ниже, чем со стенками из твердого материала, и что тон становится тем ниже, чем более стенки ослабляются от смачивания, а Лисковиусу удалось понизить тон трубы на целую октаву, когда две стенки трубы были сделаны из пергамента, путем их ослабления и смачивания (вообще понижение тона возрастает, чем большая часть стенки будет заменена пергаментною); См. Жамен-Вюльнер IV (1868) стр. 182—183.

Относительно приведенной таблицы заметим следующее:

Самойлов исследовал отдельные гласные, которые он пел на разные тоны, получая при этом световые записи на фотографической пластинке посредством особого фонаутографа; эти последние он исследовал по способу пропорционального измерения Германа и отчасти разлагая кривые по строчке Фурье.[1])

Щерба определял настройку полости рта при укладах отдельных гласных, воспользовавшись знаменитой коллекцией камертонов Кёнига в Париже.[2])

Томсон определял высоту тембрового шума гласных по шепотному произношению разными лицами ряда слов; в нашей таблице указываются полученные им высоты с более обычными пределами колебания.[3])

Берг, занимаясь в кабинете экспериментальной фонетики Казанского университета, исследовала настройку ртовой полости при гласных как в отдельном произношении, так и в звукосочетаниях, вызывая резонансовый тон полости посредством достаточно сильной воздушной струи, посылаемой особым прибором (т. наз. „fön“, применяемым между прочим в медицине для местных воздушных душей) или даже просто воздушным балоном с узкой выходной трубочкой мимо отверстия рта при беззвучном или слабо-шепотном произношении.[4]) Полученные ею данные для гласных в отдельности, представленные в вышеприведенной таблице, более всего сходятся с данными Томсона, более же низкая тесситура их для гласных не-палятальных может об'ясняться именно изолированным произношением, и в этом случае данные эти занимают переходное положение между показаниями Щербы и Томсона; значительное отличие результатов, добытых всеми этими исследователями от результатов Самойлова мо-

---

[1]) Исследование проф. Самойлова, под заглавием „К вопросу об акустических особенностях гласных“, помещено в Трудах физиол. института Моск. ун-та, т. V, вып. 5 (1901 г.), стр. 18—38, а еще раньше того под заглавием „Zur Vocalfrage“ в Pflüger's Arch. 78, 1—37 (1899).

[2]) См. его исследование „Русские гласные в качественном и количественном отношении“. Спб. 1912.

[3]) См. статью проф. Томсона „Фонетические этюды“ в Р. Ф. В. 1905 г., № 2, стр. 199—244, и „Die Eigentöne der Sprachlaute und ihre praktische Verwendung“ (I. F., B. 24, 1909, стр. 1—9). С своей стороны замечу, что при моих наблюдениях над тембром гласных в шепотном произношении я получил два ряда нот, существенно различающихся между собою по высоте, при чем один ряд нот, более низкий, соответствовал высоте собственного шепотного шума, а другой, более высокий, согласующийся с исследованиями других, выражал собственно тембровую высоту гласного. Что касается заслушивания этих двух рядов высоты, то первый ряд получается при более сильном шепоте, происходит в гортани и почти заглушает тембровый шум гласного; второй же ряд заслушивается при минимальной силе шепотного голоса, позволяющей с большей отчетливостью выступать тембровому звуку, образующемуся уже в полости рта. Прибавлю, что при аттакированном шепотном произношении гласных присоединяется еще звук аттакированья, высота которого мною не исследовалась.

[4]) См. Р. Ф. В. 1914, № 1, стр. 171—173; 1915, № 1, стр. 76—81; Изв. отд. р. яз. и слов. Ак. Наук, т. XXII (1917), кн. 1-я; Изв. Р. А. Н. 1919, стр. 343—344.

жет зависеть помимо индивидуальности произношения также и оттого, что последний исследовал гласные в пении, всегда так или иначе видоизменяющем ртовый уклад.

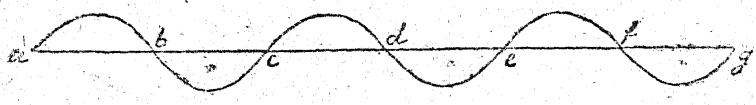
Примечание. По отношению к резонансу речевых звуков, в виду уже упоминавшегося разного качества ртовых стенок, а также и других факторов, о которых скажу далее, я полагаю, что речевой тембр образуется при поступательном токе воздуха (с голосовым тоном или без него) не из одного только наиболее сильного собственного тона ртовой полости, но в соединении его с другими слабейшими, т. е. обусловливается *комплексом резонансовых тонов*. Срв. изменение речевого тембра при разрыхленной от катарального состояния слизистой оболочке рта и глотки (а также носа), или же—обратно—при болезненной сухости их. Далее, в заслушиваемый речевой тембр привходит также резонанс грудной и головной, и напр. при воспаленном катарральном состоянии легких, с уменьшением резонирующей их полости, существенно видоизменяется и тембр. Именно, благодаря совокупности целого ряда факторов резонанса, нюансирующих оттенок воспринимаемых звуков речи, мы так легко и отличаем и узнаем речевой тембр разных индивидуумов, помимо различия или же сходства в высоте их голоса, темпа речи и т. п.

III. Об'ективные методы изучения тембра. К учению о фонографе.

Переходим к об'ективным методам изучения тембра. Как мы знаем, тембровые кривые могут быть получены с помощью „записывающего уха“ аббата Rousselot, а также амбушюра при достаточно быстром вращении цилиндра; главным же образом они получаются различными другими способами, напр. отражением луча света от вибрирующей мембраны на подвижную фотографическую пластинку или ленту, путем записи фонографом или же граммофоном, а также посредством одновременного сочетания записи фонографа с световою, и нек. др.[1]) Эти кривые для получения выводов должны подвергнуться математическому изучению, о чем мы теперь и будем говорить.

Прежде всего заметим, что вибрирующий камертон, снабженный легким пишущим перышком, чертит на равномерно вращающемся цилиндре наиболее простую волнообразную кривую, т. наз. *синусоиду*, которая служит вместе с тем символическим представлением для вызванных камертоном невидимых колебаний воздушных частиц, а также и соответствующих звуковых волн:

Рис. 70.



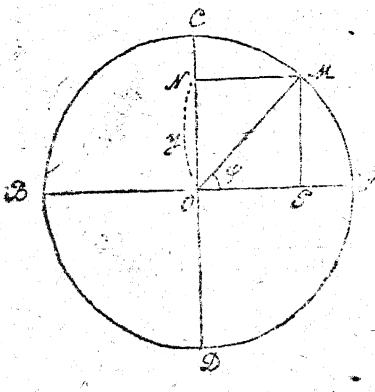
Части синусоиды, лежащие выше средней линии или абсциссы, напр. *ab*, *cd* и т. д., могут представлять собою сгущения волн, а лежащие ниже, напр. *bc*, *de* и т. д.,—соответственные разрежения; как

[1]) Описание соответствующих приборов читатель найдет в курсах Rousselot, Poirot, Gutzmann'a и Scripture'a, где трактуется также и вопрос об анализе суб'ективном и об'ективном тембра гласных и вообще звонких звуков (см. еще Nagel W. в Hdbh. der Physiologie des Menschen in vier Bänden, bearbeitet von..., hrsg. von W. Nagel. B. IV. 1909 г., стр. 772—792).

видим из рисунка, нарастание и убывание как сгущения, так и разрежения совершается при этом с плавною правильностью. Займемся теперь математическим изучением синусоид, получающихся от простых периодических колебаний, каковыми являются колебания камертона, а затем обратимся к более сложным кривым, с каковыми обычно и приходится иметь дело в экспериментальной фонетике.

Когда ножка звучащего камертона колеблется в ту и другую сторону, то ее размах характеризует амплитуду данного колебания, но при этом самое движение, очевидно, будет *неравномерным*, так как в конечных пунктах затихает и останавливается, а возвращаясь к центральному положению ускоряется и достигает в центре maximum'а скорости. В виду сложности явления, каковым оказывается колебание ножки камертона, посмотрим, не связано-ли это явление посредством какого-либо закона с другим простейшим явлением, изучение которого облегчило-бы понимание данного более сложного явления. В самом деле, мы можем напр. принять путь неравномерного качания DC с центром O за диаметр окружности, по которой двигается с *равномерной* скоростью некоторая вспомогательная точка, предположим — в направлении против движения часовой стрелки, начиная от точки A (изучение же равномерного движения конечно гораздо проще неравномерного, а окружность — простейшая из кривых), и пусть одновременно с этим равномерным с определенной скоростью движением вспомогательной точки соответственно двигается ее проекция по диаметру, начиная от точки O. Допустим, что вспомогательная точка заняла какое-нибудь положение M; тогда точка проекции, т. е. наша колеблющаяся точка, займет положение N на диаметре CD. Очевидно, что отношение расстояния y, которое равно PM, к радиусу есть синус угла φ и следов.

Рис. 71.



$$y = \mathrm{R}.\sin\varphi,$$

т. е. когда вспомогательная точка движется по окружности равномерно, то y возрастает или же убывает соответственно по *закону изменения синусов*. Придав радиусу окружности определенное значение A и вставляя в нашу формулу, получим

$$y = \mathrm{A}.\sin\varphi,$$

где расстояние A (радиус круга), равное наибольшему удалению колеблющейся точки от центра, служит выражением maximum'а амплитуды. Вместо центрального угла φ, измеряющегося стягиваю-

щею его дугою x (в данном случае$=AM$), мы можем сделать соответствующую подстановку, т. е.

$$y=\text{A.sin } x,$$

при чем величина x, благодаря равномерности в движении вспомогательной точки, может получать и значение времени. В самом деле, если время или период полного оборота вспомогательной точки равен T, а дуга x от начала движения пройдена в течение времени t, то

$$x=2\pi\frac{t}{T},$$

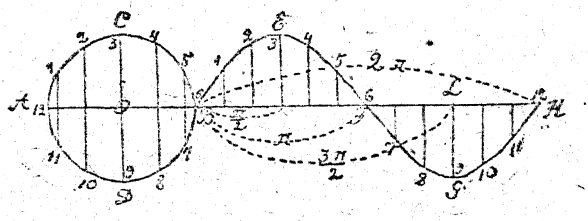
т. е. x равняется окружности (2π) взятой в отношении t:T. Вставив это значение в прежнюю нашу формулу, имеем

$$y=\text{A.sin}\frac{2\pi t}{T}.$$

Полученная формула, служащая для определения отстояния колеблющейся точки от центрального положения в любой момент времени t от начала движения,[1]) является основною для простого гармонического колебательного движения вообще и в области звука в частности. Графическим представлением такого движения служит именно синусоида. Покажем теперь построение ее, отражающее равномерное движение вспомогательной точки по окружности и вместе с тем указывающее положение колеблющейся точки для каждого момента времени.

Пусть имеем окружность, описанную из центра O, по которой вращается вспомогательная точка с постоянной скоростью, при чем по диаметру CD соответственно происходит гармоническое колеба-

Рис. 72.



тельное движение проекции. Проведем теперь прямую BH, которую предполагаем равною по длине данной окружности и потому выражающею 2π или период колебания. Если мы теперь разделим ее на столько равных частей, на сколько разделили окружность, то полу-

[1]) Если счет движения начинается не от центрального положения колеблющейся точки, то приходится ввести в формулу еще выражение для дополнительной *фазы*, т. е.

$$y=\text{A.sin }(\varphi\pm\alpha)=\text{A. sin}\left(\frac{2\pi t}{T}\pm\alpha\right).$$

Подробности о гармоническом колебательном движении см. в первом томе курса физики проф. Хвольсона.

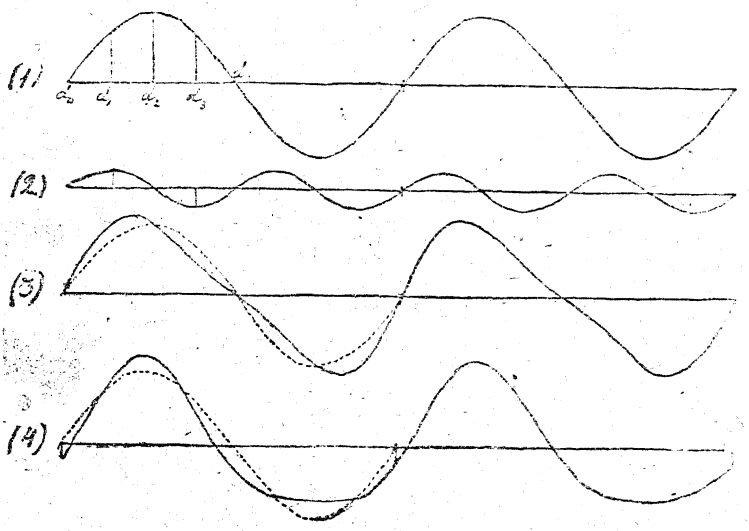
чим на ней соответствующие части периода (при этом $BK=\frac{\pi}{2}$ или 90°—четверть периода; $BF=\pi$ или 180°—половина периода; $BL=\frac{3\pi}{2}$ или 270°—три четверти периода; $BH=2\pi$ или 360°—полный период; подобным образом мы можем взять и более мелкие части периода, выражаемые посредством π или же в градусах). Если, далее, из точек деления абсциссы BH восставим перпендикуляры, обозначенные цыфрами 1, 2, 3 и т. д. и соответственно равные тем, которые на окружности отмечены деленнями 1, 2, 3 и т. д., и проведем по полученным концевым точкам кривую $BEFGH$, то последняя и будет синусоидою, наглядно представляющею изменение расстояний колеблющейся точки от ее положения равновесия в любой момент периода.

Примечание. Вычерчивание синусоид от руки производится и без проведения окружности. В только что рассмотренном случае мы делили окружность на 12 равных частей, а соответственно этому и абсциссу синусоиды, представляющую развернутую окружность; так как каждая часть окружности при таком делении содержит 30°, то дуги будут представлять восходящий ряд: 0°, 30°, 60°, 90° и т. д., а соответствующие синусы будут выражены в первой четверти (квадранте) числами 0; 0,5; 0,87; 1. Ординаты, проводимые из точек абсциссы, должны быть приблизительно пропорциональны именно этим числам или—еще проще—числам 0, 5, $8\frac{1}{2}$, 10 (полученным чрез увеличение предшествующего ряда чисел в 10 раз); для второй четверти числа будут следовать в уменьшающемся порядке, т. е. $8\frac{1}{2}$, 5, 0; для третьей и четвертой четверти те же числа будут отрицательными и следов. ординаты будут лежать по другую сторону абсциссы.—Если же окружность будет разделена напр. на 16 равных частей, то каждая из частей будет содержать $22\frac{1}{2}°$ (т. е. $\frac{360°}{16}=22\frac{1}{2}°$), так что дуги будут представлять возрастающий ряд: 0°, $22\frac{1}{2}°$, 45°, $67\frac{1}{2}°$, 90° и т. д., соответствующие же синусы выразятся числами 0; 0,4; 0,7; 0,9; 1 (в первой четверти) и потому ординаты будут пропорциональны числам: 0, 4, 7, 9, 10. При делении окружности на 40 равных частей, последние будут содержать каждая по 9°; и т. под. Так как окружность принимается нами за период или время полного колебания, то деления абсциссы будут соответствующими частями периода, ординаты же будут выражать амплитуду в соответствующие моменты.

Через сложение простых звуковых синусоид получаются сложные тембровые кривые, вполне соответственно тому, что при тембре к основному колебанию присоединяются высшие; таким путем могут быть получены кривые безконечно разнообразной формы. Пусть имеем две синусоидные или простые волны, из которых одна имеет форму (1), а другая форму (2), т. е. вторая кривая представляет вдвое бо́льшую частоту колебаний по сравнению с первою (а это значит, что соответствующий ей тон представляет высшую октаву по отношению к тону первой кривой, являясь таким образом его первым гармоническим), при чем амплитуда ее вчетверо меньше

первой,[1]) и пусть вторая синусоида наслаивается на первую. Покажем это наложение волн на чертеже, который заимствуем у Гельмгольца:

Рис. 73.



Каждая точка второй кривой, именно той ее части, которая лежит над абсциссою, должна накладываться выше соответственной точки первой кривой, а все точки второй кривой, лежащие ниже средней ее линии, при наложении на первую кривую должны приходиться на столько же ниже соответствующих точек первой синусоиды; результатом наложения является новая, *составная*, волна (3). Но если первая и вторая волна по своему начальному пункту или фазе не

---

[1]) Таким образом, если первая синусоида выражается формулой

$$y = A \sin x,$$

то вторая выразится через

$$y = \frac{A}{4} \sin 2x,$$

т. е. амплитуда ее вчетверо меньше $\left(\frac{A}{4}\right)$ сравнительно с основною, что же касается периода, то коэффициент 2 при x показывает, что в основном периоде умещается уже два периода ($2T$ или 4π), т. е. что колебания вдвое чаще; если бы вторая синусоида при амплитуде $\frac{A}{4}$ представляла три периода в течение одного основного, то формула ее получила бы вид

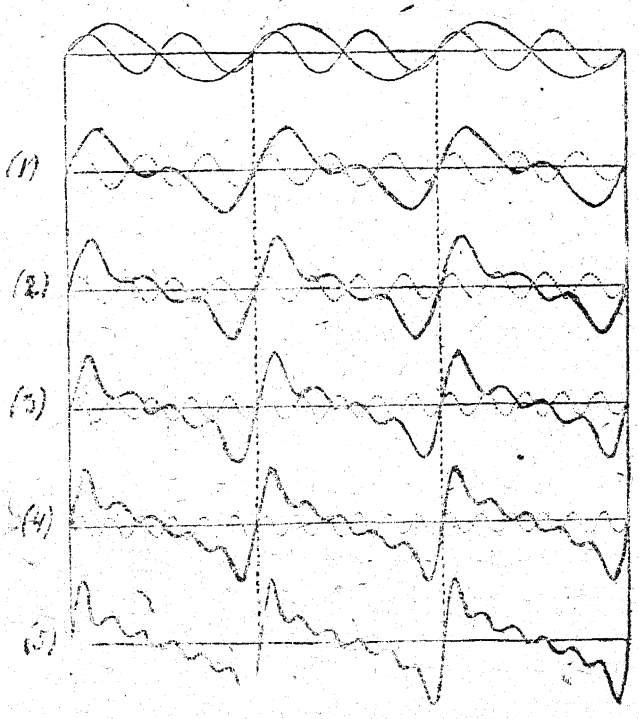
$$y = \frac{A}{4} \sin 3x,$$

и т. д. Формула $y = 2A \sin \frac{1}{2}x$ показывает, что новая синусоида имеет двойную амплитуду по сравнению с первым уравнением, но вместе с тем в одном периоде первого уравнения помещается теперь лишь половина периода новой синусоиды, т. е. колебание вдвое медленнее первого.

совпадают, а напр. вторая волна начинается несколько позже, положим—в момент d_1 первой волны, то это отразится на форме составной волны, и на место третьей фигуры мы получим ее видоизменение—фигуру (4), где часть под абсциссою уже потеряла подобие к части над абсциссою (заметим попутно, что формы вибраций, аналогичные третьей и четвертой кривой, являются довольно обычными на гортанных графиках при записи гласных звуков гортанною капсулою).

Описанным образом могут наслояться или налагаться зараз не только две, но и сколько угодно волн разной частоты, фазы и амплитуды, при чем отдельные под'емы *алгебраически складываются*, т. е. действительные под'емы прибавляются, а части спускающиеся под абсциссу вычитаются. Следующее изображение, принадлежащее Кёнигу, показывает, как последовательное присоединение высших частных тонов вызывает, в сложной тембровой кривой соответственно большеее число неровностей:[1])

Рис. 74.



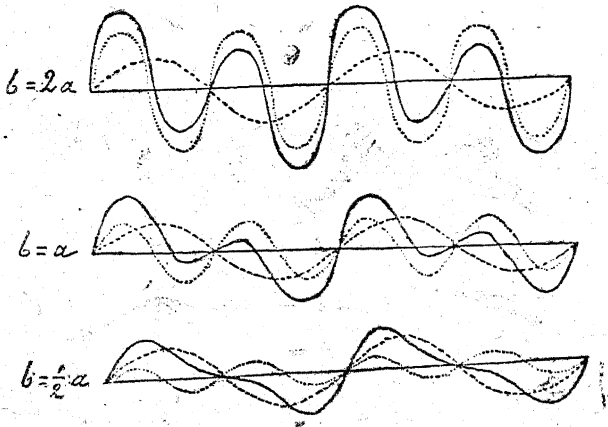
На рисунке слагающиеся синусоиды обведены пунктирною чертою, а толстою чертою — получающиеся от наложения сложные кривые, при чем кривая (1) получена от сложения первого частного тона со

[1]) См. Strouhal стр. 23.

вторым (1+2) или примы с октавою; кривая (2) получилась от присоединения к предшествующей еще третьего частного тона (1+2+3) или дуодецимы; кривая (3)—от дальнейшего прибавления четвертого частного тона (1+2+3+4) или второй октавы; кривая (4)—от присоединения к предшествующему пятого частного тона (1+2+3+4+5) или терции второй октавы; наконец, кривая (5) получена от дальнейшего присоединения шестого частного тона (1+2+3+4+5+6) или квинты второй октавы.

Видоизменение амплитуды налагаемых частных тонов отражается на сложной тембровой кривой глубиною вторичных неровностей: чем больше амплитуда высших частных тонов, тем глубже неровности, и наоборот—с уменьшением амплитуды неровности более и более сглаживаются, как это явствует из прилагаемого рисунка, заимствуемого у Хвольсона (посредством a обозначена амплитуда первого частного тона, а через b—второго):[1])

Рис. 75.

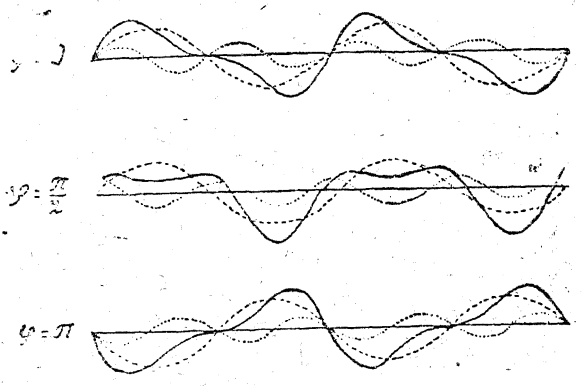


Наконец, изменение фаз слагаемых синусоид выражается на сложной тембровой кривой переменою наклона кривой и перемещением углов, как это хорошо видно на следующем примере (см. рис. 76 на стр. 46) изменений сложной кривой, последней на рисунке 75-м. Случаи с изменением фаз или интермиттенцией весьма обычны на графиках, получаемых от гортанной капсулы и амбушюра, где встречается также перемещение углов снизу на-верх или обратно, что служит не малым затруднением для отделения одной вибрации от другой при микроскопических измерениях. Интересно, что экскурсионная часть тембровой кривой гласного отличается постепенно меняющеюся фазою от рекурсионной (положением углов), т. е. подобно случаям $\varphi=0$ и $\varphi=\pi$ на рисунке, тогда как средняя часть имеет

[1]) Срв. выше кривую (3) на стр. 43, где перегиб на середине периода совсем сгладился.

выдержанный тип вибраций. Это различие повидимому находится в связи с тем, что изменение высоты голосового тона в экскурсионной части происходит при раскрывании ртовой полости, тогда как в рекурсионной части, наоборот, при закрывающемся ртовом укла-

Рис. 76.



де. Вообще, знакомство с сложением синусоид в связи с получающимися в результате сложными кривыми важно для первого приблизительного суждения по виду о составе фонационных тембровых кривых.

От сложения синусоид переходим к обратной задаче—к способам определения состава получаемых при опытах тембровых кривых. Здесь для нас особенно важно ознакомиться с приемами проф. Германа (L. Hermann), особенно много сделавшего по вопросу о тембре.[1]) Для анализа тембровых кривых он пользуется тремя способами: а) разложением по строчке Фурье (Fourier) с упрощением посредством шаблонов, б) определением центра тяжести тембра и в) способом пропорционального измерения.

Знаменитый французский математик Фурье открыл математический закон, который в применении к нашему вопросу формулируется так: каждая сколько-угодно сложная правильно-периодическая форма колебания и выражающая его кривая может быть составлена из простых колебаний, числа которых в один, два, три, четыре и т. д. раза больше числа колебаний основного периода, и составлена только одним, а не каким-либо другим способом, при чем гармонические синусоиды должны быть подобраны с определенными ширинами размаха (амплитудами) и налагаться с определенною разностью фаз. Самая формула для вычисления тембровой кривой принимает следующий вид:

---

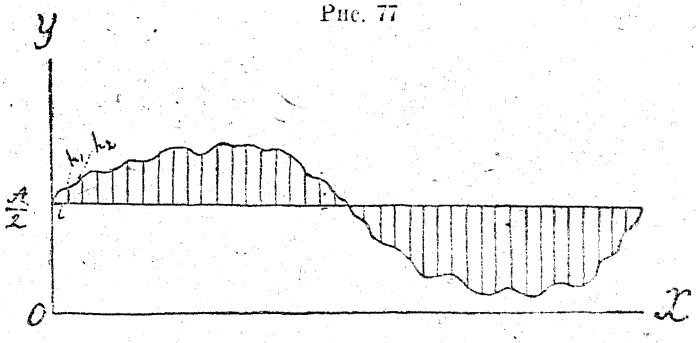
[1]) Из ряда его статей здесь мы пользуемся его статьями под заглавием „Phonophotographische Untersuchungen“ I—III в Pflüg. Arch. B. 45 и 47.

Первый частный тон | Второй частный тон | Третий частный тон

$$y = \frac{1}{2}A_0 + A_1\cos x + A_2\cos 2x + A_3\cos 3x + \ldots$$
$$+ B_1\sin x + B_2\sin 2x + B_3\sin 3x + \ldots$$

Так как *высота* (частота колебаний) частных тонов сама собою определяется по первому частному тону, соответствующему голосовому тону гортани и уже известному, путем умножения числа его колебаний на 1, 2, 3 и т. д., то вся задача вычисления сводится к определению *амплитуды* частных тонов, именно—к нахождению сначала значения коэффициентов A_1, A_2... при косинусах и B_1, B_2... при синусах с последующим отсюда вычислением самой амплитуды соответствующего частного тона. Теория строк Фурье дает для этого следующий приближенный способ. Пусть имеем периодическую тембровую кривую, один период которой представляет в сильно увеличенном виде следующая графика:

Рис. 77



Прежде всего мы делим абсциссу кривой, соответствующую времени одного колебания (2π), на равные части достаточно мелкие,[1]) напр. на 40 частей; а так как длина абсциссы отвечает некоторой окружности, то, значит, каждая из этих частей (i) соответствует 9° (т. е. 360:40), так что ряд делений, от начала кривой, соответствует ряду в градусах: 0°, 9°, 18°..... 342°, 351°, 360°. Проводим теперь из точек деления абсциссы перпендикуляры до пересечения с кривой или так называемые ординаты (h_1, h_2, h_3....) и измеряем их, с помощью мерительного микроскопа, в соотношении с делениями абсциссы, и таким образом получаем числовое для них выражение в долях миллиметра, предположим —2 для 9°, 8 для 18°, 13 для 27° и т. д. Это будут наши исходные данные для последующих вычислений

[1]) Вообще, чем мельче деления абсциссы и, следов., чем больше число соответствующих им измеряемых ординат, тем больше точность; в общем необходимо, чтобы существенные зубчики кривой не приходились в промежутке между двумя ординатами.

по определению коэффициентов у каждого из членов ряда Фурье. Пусть напр. мы ищем числовое значение для коэффициентов A_1 и B_1, чтобы по ним определить амплитуду первого частного тона. Для этого прежде всего мы помножаем числовую величину каждой ординаты на косинус соответствующего угла (напр. $h_1 \times \cos 9^0$, $h_2 \times \cos 18^0$ и т. д.); такое же умножение требуется и для синусов, но так как значения синусов совпадают с значениями косинусов в обращенном порядке, то произведения от предшествующего перемножения могут служить и для синусов; при этом не следует забывать знаков + и — как для косинусов, так и для синусов, соответственно четвертям или квадрантам (понятно, что для перемножения придется величины косинусов выписать из тригонометрической таблицы только для первой четверти, так как величина их будет повторяться и в последующих четвертях с соответствующим знаком). После этого складываем почленно ряд произведений от умножения ординат на косинусы, а также и от умножения на синусы;[1]) полученные суммы возвышаются в квадраты, которые затем складываются, и из новой суммы извлекается квадратный корень; полученное от извлечения число и покажет искомую амплитуду синусоиды первого частного тона. Напр. пусть мы получили $A_1 = -7$ и $B_1 = 1$; тогда искомое число C_1 (амплитуда данного частного тона) получится так:

$$C_1 = \sqrt{49+1} = \sqrt{50} = 7{,}1.$$

Аналогичным путем добывается числовое значение коэффициентов A_2 и B_2 для второго частного тона. Нужно только помнить, что хотя теперь произведения и будут составляться аналогично с случаем первого частного тона, однакож с пропуском одного промежуточного числа, т. е. напр. первая ордината будет множиться не на $\cos 9^0$, а на косинус следующего числа, т. е. 18^0 ($h_1 \times \cos 18^0$), так как в то время как при первом частном тоне вспомогательная точка проходит 9^0, при втором частном тоне она пройдет вдвое большую дугу; вторая ордината умножится на $\cos 36^0$ (т. е. $h_2 \times \cos 36^0$), третья на $\cos 54^0$ (т. е. $h_3 \times \cos 54^0$) и т. д., т. е. число градусов будет возрастать не на 9^0, как при первом частном тоне, а на 18^0. Такая же перемена будет и в отношении синусов. Окончательное получение амплитуды синусоиды второго частного тона происходит так же, как и в ранее рассмотренном случае.

Для отыскания амплитуды третьего парциального тона последо-

---

[1]) Каждое из этих произведений следовало бы еще помножить на $\frac{2}{n}$, где n число делений абсциссы, т. е. в нашем примере на $\frac{2}{40} = \frac{1}{20}$, но этого можно однако и не делать, так как для нас имеют значение не абсолютные числа амплитуд, а относительные.

вательный ряд ординат множится на косинусы и синусы уже с пропуском в 27^0 ($=9^0\times3$), т. е. в нашем примере ордината 2 умножится на косинус и синус 27^0, ордината 8 на косинус и синус 54^0, ордината 13 на косинус и синус 81^0, и т. д.

По величине чисел, полученных для амплитуды последовательного ряда частных тонов при произношении данного гласного звука, не трудно определить, который частный тон является тут доминирующим и следов. характеризующим звук, высота же этого характерного частного тона, как мы знаем, определяется в соответствии с числом колебаний основного или голосового тона.

Для облегчения утомительных вычислений амплитуд уже имеются готовые таблицы произведений от умножения любой длины ординат на последовательный ряд косинусов resp. синусов, соответственно делению абсциссы на то или другое число равных частей; так, у Poirot (стр. 245—267) даются таблицы произведений чисел от 1 до 1000 на синусы и косинусы для 40 (и 20) ординат, для 72 (и 36) ординат, для 48 (и 24) ординат (см. выше сноску на стр. 47).

Дальнейшим облегчением вычислений служит *способ шаблонов* Германа, состоящий в том, что составляются таблицы, на подобие пифагоровой таблицы умножения, из произведений чисел последовательного ряда измеренных ординат на синусы (resp. косинусы) соответствующих углов, в достаточно просторных квадратах, напр. в 1□ сант., а затем приготовляются клеточные шаблоны в том же масштабе особо для каждого исследуемого частного тона, при чем прорезываются те клетки, под которыми должны приходиться искомые цифры последовательного ряда произведений, а у прорезов стоят необходимые знаки. Так как косинусы представляют те же числа, что и синусы, только в обратном порядке, то шаблоны для синусов могут служить и для косинусов, но накладываясь обратной стороной, на которой должны быть поставлены знаки (плюс или же минус) уже для косинусов.

Надо прибавить, что Герман числовыми данными амплитуд ряда частных тонов, получаемыми описанным способом, пользуется для дальнейшего определения, так сказать, центра тяжести (P) тембра гласного. Он применил для этого тот прием, каким пользуется статистика для заключительного вывода из средних данных разной весомости; аналогично этому приему Герман амплитуды частных тонов множит на соответствующий номер каждого из них и сумму этих произведений делит затем на сумму самых амплитуд, надеясь в результате получить более точное выражение P для номера характерного частного тона, т. е. его положения относительно основного:

$$P = \frac{C_1 \times 1 + C_2 \times 2 + C_3 \times 3 + \cdots}{C_1 + C_2 + C_3 + \cdots}$$

Теперь для определения высоты этого характерного тона, соответствующего номеру P, остается помножить число колебаний основного тона на полученное от деления число P, которое уже само обнаруживает характером своей кратности, гармоничен или негармоничен этот характерный частный тон относительно голосового тона. По мнению Германа этот прием ведет к более точному определению высоты характерного тона, который по теории Германа не является необходимо гармоническим относительно голосового тона, между тем как анализ Fourier может показывать лишь гармонические обертоны. Быть может, однако, самая применимость данного приема к тембровому вопросу требовала бы особаго обоснования.

Наконец, наиболее простым способом для определения характерного верхнего тона по тембровым кривым Герман считает прием пропорционального измерения, состоящий в следующем. В тембровой кривой измеряется длина периода основного тона и период высокого тона; от деления одного числа на другое получается число, показывающее порядок высокого частного тона; если помножить число колебаний основного тона на число порядка, то получается высота (x) характерного тона и его нота, т. е. соответственно формуле

$$x = \frac{L}{l} n.$$

где n — число колебаний голосового тона, L — длина основного периода и l — длина малого колебания. По поводу этого приема можно заметить, что тембровая кривая может состоять кроме основного тона не только из малых колебаний данной именно частоты, но одновременно еще и из других частных тонов меньшей частоты, судя по кривым, приведенным выше на стр. 44, при чем остается открытым вопрос, который из всех высоких частных тонов признать доминирующим. Сделанное замечание применимо и к родственному приему определения характерного высокого тона простым счетом маленьких зубцов в большом периоде.

Примечание. Приемами вычисления Германа воспользовался проф. А. Ф. Самойлов, применивший их к исследованию тембра общерусских гласных и результаты изложил в статье „К вопросу об акустических особенностях гласных звуков" (см. выше стр. 38). Способ исследования по строчке Фурье с применением шаблонов тот же автор разъясняет в статье „Анализ периодических кривых по способу шаблонов Л. Германа" (в X т. Трудов отделения физических наук Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии, 1900 г.), где теория иллюстрируется анализом тембровой кривой русского гласного О. К этим статьям за дальнейшими подробностями я и отсылаю читателей.

Переходим к механическому приему анализа тембровых кривых. Из довольно значительного разнообразия приборов мы ос-

становимся на одном из них—*гармоническом анализаторе* Mader'a, как недорогом, точном и удобном. Главным удобством, дающим ему преимущество перед другими сродными приборами, является то, что длина исследуемой кривой периода может варьировать в пределах от 2 до 36 сантиметров, тогда как другие анализаторы требуют, чтобы кривая имела некоторую постоянную и притом довольно значительную длину по абсциссе. Анализатор Мадэра функционирует в комбинации с *планиметром* (Amsler'a), как измерителем площади фигуры. Начнем с пояснения планиметра.

Планиметр Амслера состоит из двух подвижно-сочленных рычагов, из которых один свободным концом или полюсом устанавливается на рисовальной доске в постоянном положении, а другой рычаг на свободном конце снабжен шпилем, служащим для обводки контура измеряемой площади; первый из рычагов можем назвать полярным по месту закрепления, служащему полюсом системы, а второй обводящим или регистрирующим, так как он имеет по близости к месту сочленения измерительное колесико, соединенное с небольшим счетчиком, регистрирующим движение колесика. Определение площади сводится прежде всего к определению посредством счетчика длины дуги в долях окружности мерительного колесика, на которую обернулось последнее за время перемещения обводного шпиля по контуру фигуры, а затем к переходу от этого линейного числа к квадратному числу площади в квадратных сантиметрах при помощи определенного коэффициента, в нашем приборе равного $\frac{1}{10}$.

Анализатор Мадэра[1]) также имеет ведущий рычаг, но коленчатый, с углом в 90°, при чем оба колена прочно скреплены, так что во все время операции угол сохраняется прямым. Угол рычага установлен посредством оси на тележке, которая (вместе с углом рычага) может передвигаться только в направлении перпендикулярном к базису или абсциссе кривой, а это обусловливается тем, что левая пара колесиков тележки двигается по соответствующему рельсовому углублению линейки, лежащей перпендикулярно к базису на рисовальной доске. Если будем водить шпиль рычага исключительно по перпендикуляру к базису туда и сюда, то мы тем самым будем двигать всю тележку в том же самом направлении, как единственно

---

1) Теория описываемого гармонического анализатора, опирающаяся на положения высшей математики, изложена изобретателем в статье „Ein einfacher harmonischer Analysator mit beliebiger Basis" Elektrotechn. Zeitschr., 1900, 9 Sept. стр. 847—851); в отдельном оттиске статья была получена нами вместе с прибором; на русском языке теория данного прибора передана проф. А. Н. Крыловым в его лекциях о приближенных вычислениях (СПб. 1911), стр. 208—210. Кроме того см. у Poirot стр. 180—186. Адрес фирмы, изготовляющей прибор: *München*. Kapuzinerstr. 18I Seitengeb.—Gebrüder Stärzl.

возможном для нее. Но при обводе контура данной кривой [1]) кроме движения по перпендикуляру привходит еще движение боковое: это последнее возможно благодаря тому, что угол коленчатого рычага может повертываться около своей оси, при чем другой конец рычага действует на ролик, катящийся в горизонтальной плоскости и параллельно к базису по желобку особой платформы, помещающейся на тележке и могущей двигаться по своему рельсу, подобно тележке, также только в перпендикулярном к базису направлении туда и сюда: когда коленчатый рычаг повертывается около своей оси, то этим он заставляет ролик передвигаться по горизонтальному желобку, а платформу перемещаться по перпендикулярному к базису желобку в сторону базиса или же от него (при соучастии пружины). Из сказанного видно, что движение платформы является функцией, во-первых, движения тележки (на которой она помещена), зависящего от движения стиля в перпендикулярном направлении при обводе кривой, и во-вторых—своего собственного, происходящего от бокового движения стиля, чем вызывается повертывание коленчатого рычага около оси в ту или другую сторону и упомянутое соответственное перемещение платформы на тележке. Платформа с левой стороны заканчивается кремальерой, участвующей в движении платформы и подобно последней в каждый момент представляющею равнодействующую обоих слагаемых движений обводного шпиля—перпендикулярного и бокового. Если теперь введем в систему зубчатое колесо с осью вне тележки, зубцы которого будут сцепляться с зубцами кремальеры, то движение последней будет повертывать в соответствующую сторону зубчатое колесо и заставлять проходить некоторый угол, дуга которого будет функцией от данного сложного движения, отражающего движение стиля по кривой, и будет стоять в соотношении с ее площадью (см. сноску на настоящей странице). Если же мы снабдим данное колесо двумя углублениями близь периферии, отстоящими одно от другого на 90^0, то вкладывая в них обводящий шпиль планиметра мы будет переводить данную функцию в синусы и косинусы и таким образом по указаниям счетчика планиметра с умножением на известный коэффициент получим искомые значения A_1 и B_1 для основного тона и по ним определим амплитуду C_1. Если теперь с кремальерой приведем в сцепление другое зубчатое колесо, имеющее вдвое меньший радиус, то получим данные для второго частного тона; пользуясь же зубчатым колесом с радиусом втрое меньшим получим коэффициенты для третьего част-

---

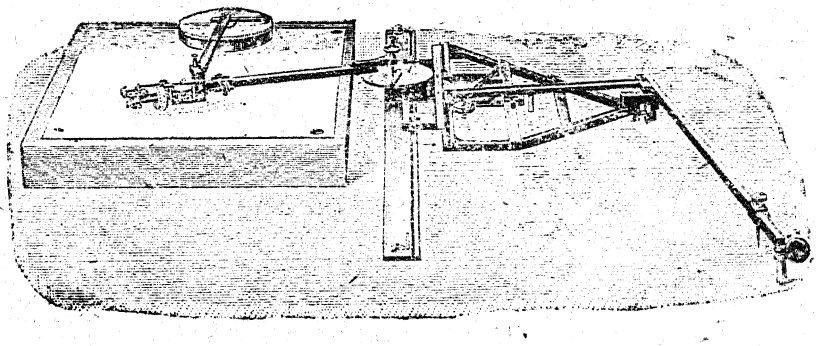
[1]) Самый обвод происходит так (см. кривую на стр. 47): от начального пункта кривой обводный шпиль двигают по кривой, проходя по всем ее извилинам до конца, а затем по абсциссе возвращаются назад к исходному пункту, и таким образом описывается некоторая площадь, ограниченная кривою и ее абсциссой.

ного тона, и т. д.[1]) По этим данным мы вышеуказанным способом добудем соотносительные числа амплитуд соответствующих частных тонов и таким образом разложим данную кривую в тригонометрический ряд Фурье.

Примечание. Прежде чем начать исследование тембровых кривых с помощью анализатора, нужно установить *степень точности прибора.* С этой целью мы исследовали нашим анализатором вычерченные через сложение синусоид кривые и результаты оказались достаточно точные. Так, были сложены две синусоиды с периодом 1:2, максимальная амплитуда которых равнялась 8 сант. и 4 сант.: эти же числа показал и анализатор; при анализе кривых, получившихся от сложения синусоид с периодом 1:3, т. е. без второго частного тона, этот последний выразился через нуль и на нашем анализаторе. Далее, мы вычертили в большом масштабе тембровую кривую гласного *О* по числовым данным сорока ординат, указанным в статье проф. Самойлова „Анализ периодических кривых по способу шаблонов Германа" и затем нашим анализатором определили амплитуды первых девяти тонов (из 18 у Самойлова): в результате получились числа достаточно соотносительные к числам проф. Самойлова и тоже, как у последнего, частными тонами с большей амплитудой оказались 2-й, 4-й, 6-й и доминирующим 5-й. Интересно, что когда по этим последним, т. е. наиболее характерным, данным была снова вычерчена кривая, то она в общем очень напоминала оригинал.

В заключение прилагаем рисунок анализатора Madera в перспективе (налево планиметр, направо анализатор, а между ними основное зубчатое колесо):

Рис. 78.



В дополнение ко всему вышеизложенному скажу вкратце о фонографе, способах изучения фонограмм и укажу некоторые образцы опытов.[2]) Фонационные графики, получаемые на кимографе, не могут служить для воспроизведения произношения, так как лежат на поверхности, а не углублены. Напротив, по записям фонографа может воспроизводиться произнесенное, так как они представляют борозды, следуя по которым сапфир соответственно колеблется и ко-

[1]) Предварительно же, еще до производства указанных операций по определению коэффициентов частных тонов, определяется планиметром площадь тембровой кривой в интервале ее периода, выражаемая начальным членом (т. е. коэффициентом $\frac{1}{2}A_0$) формулы, которому приближенно соответствует среднее арифметическое значение ординат данной кривой, проведенных из точек деления абциссы.

[2]) Более подробное изложение данного вопроса, равно как и о новейших экспериментальных успехах по изучению физико-акустической стороны речи, надеюсь сообщить в особой статье по ознакомлении с соответствующей зарубежной литературой.

леблет мембрану воспроизводящей диафрагмы, и этим путем воспроизводятся те звуки, под действием которых получились борозды. Это обстоятельство представляет особенную научную важность, так как по качеству воспроизведения можно судить, насколько удачна та или другая запись и, опираясь на этот критерий, производить отбор наиболее удачных фонограмм, которые уже и подвергать анализу.

Записи фонографа могут исследоваться трояким путем: 1) путем перевода углублений с валика на ленту, 2) на самых валиках с помощью микроскопа, 3) путем отражения светового луча от вибрирующей мембраны на фотографическую бумагу.

1) Для перевода фонограмм на ленту парижский прецизионный механик H. Lioret[1]) устроил особый прибор, главною частью которого является легкий из алюминия двухплечий рычаг, поворачивающийся около своей оси, одно плечо которого, очень короткое, снабжено на свободном конце воспроизводящим сапфиром, а другое, очень длинное,—чертящим перышком, соответственно увеличивающим размах колебаний сапфира. В нашем приборе короткое плечо рычага=1 сант., а длинное составлено из двух колен в 15 и 20 сант. таким образом, что амплитуда увеличивается в 1×15 и в 1×20 раз, в целом в 300 раз (т. е. 15×20); что касается длины вибраций, то для увеличения ее в приборе имеется особое приспособление, позволяющее ленте передвигаться с большею или же меньшею скоростью; следовательно, при передаче на ленту прибор дает возможность при одной и той же увеличенной амплитуде получать вибрации кривых более растянутыми или же более стесненными.. Для производства вычислений необходимо знать окружность валика и число сделанных при записи оборотов в минуту, при чем здесь, как и в кимографе, окончательные числовые результаты могут выражаться как диаграммами, так и в нотном обозначении.[2])

Примечание. Особую разновидность фонографа представляет фонограф, принадлежащий Венской Академии Наук: запись его делается на плоском восковом кружке, как для граммофона, но по способу фонографа, т. е. чрез углубление сапфира записывающей диафрагмы (в зависимости от этой особенности и перевод фонограмм на ленту производится уже чрез соответственно иное приспособление). К сожалению должен констатировать, что экземпляр фонографа, доставленный нашему Кабинету венским механиком, изготовляющим фонографы этого типа (Ludwig Castagna, Universitäts-Mechaniker, Wien IX/3), оказался грубо сработанным, сильно шумливым, с слабой репродукцией и, вдобавок, при этих несовершенствах, чрезвычайно дорогим—800 крон (!), так что получается впечатление как бы от спекуляции.[3]) Поэтому мы рекомендуем Эдисоновский фонограф и к нему для перевода фонограмм на ленту прибор Lioret.

---

[1]) Адрес его заведения: Henry *Lioret*, 270 Boulevard Raspail, Paris (XIV-e).

[2]) По методологии прибора срв. статью проф. Хлумского (Jos. Chlumsky) в Revue de Phonétique, т. II-2 (1912) стр. 147—158.

[3]) Описание этого прибора см. в моей статье „Фонограф и архив фонограмм Венской Академии Наук“ в Уч. Зап. Каз. Унив. 1905 г., янв., стр. 25—32, и в статье проф. Самойлова „Венская Фонограммная Архивная Комиссия“ в Казанском Музейном Вестнике 1920 г., № 5—6, стр. 3—10. О механизме для перевода на кимограф см. у Poirot стр. 134 сл. Перевод на кимограф может производиться и с кружков граммофона при помощи соответствующего механизма, см. Scripture, гл. IV.

2) Если прибор Lioret дает возможность следить за изменением глубины фонограммных борозд по переводу на ленту и по полученным на ленте тембровым кривым определять состав тембра, то существует еще косвенный способ изучения этой глубины на самом валике, именно: измерение глубины заменяется измерением ширины борозд, а затем уже числа от этого последнего измерения переводятся на глубину при помощи формулы:

$$x = r + \sqrt{r^2 - \frac{b^2}{4}},$$

где x — искомая глубина, r — радиус поперечного сечения сапфира, и, следовательно, величина постоянная, а b представляет меняющуюся ширину бороздки [1]) (конечно, здесь полезно предварительно составить на основании приведенной формулы числовую таблицу для перехода от ширины бороздки к ее глубине). Для измерений ширины фонограммных бороздок существует очень удобный микроскоп (изготовляемый тем же Lioret), при чем измерение вибраций по длине производится с помощью вращательного диска с делениями, передвигающего через посредство винта микроскоп, а ширина в каждом пункте при передвижении измеряется посредством микрометрических делений микроскопа; таким образом получаются числа, служащие для определения длины каждой вибрации, ее амплитуды и тембрового состава.

3) Профессор L. Hermann приспособил Эдисоновский фонограф к записи вибраций его мембраны чрез отражение светового луча от последней на фотографическую бумагу кимографа; Герман получил удачные тембровые графики как для гласных, так и для согласных. [2])

В заключение упомянем, что с помощью фонографа можно произвести ряд опытов, способствующих выяснению природы тембра и некоторых других вопросов. Так, напр., фонограмма, записанная на известной скорости, может быть воспроизводима на других ско-

---

[1]) Формула должна быть дополнена еще показателем углового наклона сапфира к поверхности валика, см. Poirot стр. 123–124. Там же на стр. 126 даются параллельно изображения борозд фонографа в их ширине и глубине. Заметим, что сапфир записывающей мембраны и во время пауз проводит борозду, дно которой соответствует той средней абсциссе, по отношению к которой при голосовых вибрациях сапфир, вибрируя, то поднимается, то опускается.

[2]) См. цитированные выше его статьи; образцы тембровых кривых, полученных Германом для звуков той и другой категории, см. между прочим у Gutzmann'a стр. 94. Срв. еще Rosset Recherches expérimentales poux l'inscription de la voix parlée, Paris 1911; Scripture Researches in experimental phonetics (the study of speech curves), Washington 1906.

ростях,[1]) при чем наблюдают, происходит-ли вследствие того изменение в качестве звука и каково оно. Наши наблюдения над гласными в отдельном произношении показали, что при воспроизведении с переходом к большим скоростям вращения валика проявляется тенденция к передвижению всех гласных в сторону индифферентного среднего гласного с слабым палятальным нюансом (напр. гласный *i* теряет часть своей полной мягкости и склоняется к типу ы°, понижая таким образом свою тембровость, а гласный *y* наоборот повышает свой тембр, видоизменяясь в сторону *o*° или *ä*°).[2]) Аналогичное явление мы наблюдали и в случае слогов типа CV, напр. *ра, ря, ро*. и т. д. Такое видоизменение или — точнее — искажение качества гласных вызывалось очевидно тем, что с увеличением скорости оборотов происходило, одновременно с повышением основного тона, еще и такое же повышение характерных тембровых обертонов или формантов, тогда как при действительном произношении гласных в разных тонах тембровая высота не меняется (в этом пункте согласны между собою теория Гельмгольца и теория Германа); таким образом, положение о постоянстве тембровой высоты подтверждается и фонографом, но только по методу от противного. Фонограф позволяет воспроизводить звуки и звукосочетания еще и при обратном движении валика,[3]) вследствие чего открытые слоги превращаются в тип закрытых;[4]) но так как при таком воспроизведении возникает и обратное движение тона (напр. вместо нисходяще-восходяще-нисходящего тона получится восходяще-нисходяще-восходящий) и амплитуды, не соответствующее однако нормальному произношению, то и получается впечатление искаженного произношения. Приемом обращенного воспроизведения

---

[1]) Для варирования скорости вращения валиков фонограф имеет на деке специальный винт, связанный с тормазом и производящий большее или меньшее нажатие последнего на диск, вращающийся на одной из осей механизма; таким образом — наибольшая скорость получается тогда, когда нажатия совсем нет, и она постепенно уменьшается по мере того, как чрез повертывание винта тормаз своим кожаным выступом приходит в соприкосновение с поверхностью диска и нажимает на нее („регулярование посредством трения"). Вокруг винта на деке обозначены цифры оборотов в минуту, которые однако должны быть проверены; проверка производится посредством особого счетчика („Palmers") и секундомера. Оказывается еще и соотношение между тоном регулятора и вообще хода фонографа при вращении валика и числом оборотов. Так, на нашем эдисоновском фонографе („Triumph") по мере ускорения вращения тон повышался весьма правильно (за исключением впрочем первых промежутков): по данным М. Н. Берг при 90 оборотах слышался тон *c*, 100—*d*, 110 = *dis*, 120 —*f*, 130—*fis*, 140—*g*, 150—*gis*, 160—*a*, 170—*ais*, 180—*h*, 190—*c'*, 200—*cis*. Срв. также Томсон А. Н. в Р. Ф. В. 1905, № 2, стр. 219.

[2]) Полученный нами результат согласуется с данными проф. Hermann'a (см. Pflüger's Arch. 47, стр. 376); срв. также Gutzmann стр. 116—117.

[3]) Для того чтобы получить вращение в противоположном направлении, нужно изменить *перекрещивающийся* вращающий ремень.

[4]) В опыте с слогами *ра, ря, ро*.. мы отметили при обращенном воспроизведении тенденцию к более протяжному или дифтонгообразному типу гласных за исключением слогов *ру* и *ры*; при этом характер дифтонизации различался в слогах с твердым и мягким согласным: в первых при обращении получался в качестве второго компонента более открытый гласный, а во вторых—оттенок *i*.

пользовался проф. А. И. Томсон для подтверждения дифтонгичности русского гласного *ы*,[1]) но в виду указанного обстоятельства я считаю этот прием не имеющим доказательной силы для определения нормального произношения, да и результаты наших опытов, правда — еще немногих, повидимому не согласуются с таковыми проф. Томсона. Наконец, упомяну еще, что при прямом воспроизведении фонографом звуки отдельные и в словах слышатся иногда с несколько иным оттенком по сравнению с произнесенными, напр. англ. *h*appy слегка смахивало на *š*appy, *y*oung — *dž*oung, или рус. *э* заслушано в виде *э*^{o}, и т. п.; такого рода наблюдения как бы подтверждают участие акустического фактора (ибо о физиологическом факторе звукоизменения по отношению к фонографу не может быть речи) в случаях перехода в истории языков *х* → *š*, *j* → *dž* и т. д.

Примечание. За настоящим заключительным выпуском должен был бы следовать, согласно первоначальному плану, прикладной отдел, представляющий экспериментально-фонетическую разработку главнейших вопросов русского литературного произношения (см. предисловие к первому выпуску), но в виду обширности материалов я предпочитаю теперь издать этот отдел в виде особого труда под заглавием „Фонетика русского литературного произношения в свете экспериментальных данных", здесь же ограничиваюсь присоединением, в виде дополнения, одной из глав названного труда.

---

[1]) См. Р. Ф. В. 1911, № 1, стр. 150, 152.

Прибавление.

Экспериментальное исследование общерусских гласных в отдельном произношении.

Я давно высказал то положение, что для наиболее успешного представления фонетики живого языка в свете экспериментальных данных необходимо начать изучение с простейших элементов и постепенно восходить к более сложным комбинациям, т. е. - начав с анализа звуков (гласных и согласных) в отдельном произношении, затем перейти к слогам и односложным словам, после чего приступить к словам двухсложным и, наконец, фразам. Настоящая статья должна показать, насколько сложен артикуляторный механизм звуков даже в отдельном произношении и как экспериментальная фонетика тем не менее позволяет проникать в этот механизм, открывая в нем взаимную связь и обусловленность между артикуляторными элементами, из которых слагается произношение отдельных звуков, а это в свою очередь подтверждает правильность моей методологической точки зрения, ибо именно при указываемом способе изучения удастся констатировать те изменения, какие артикуляторные элементы последовательно претерпевают с переходом от отдельных звуков к более сложным комбинациям— слогам, словам и фразам.

Изучение общерусских гласных в отдельном произношении мы начнем с записей одним губным прибором Rosapelly [1]) на *медленной* скорости вращения цилиндра, весьма удобной для общего ознакомления с типом кривых, получаемых от не слишком быстрых движений и, кроме того, позволяющей на одном и том же обороте записать достаточное число случаев (исследуемые записи относятся к 1907—1908 г.). Наши измерения касались длины губных график в переводе на время—в сотые доли секунды, [2]) а также (для суждения о сравнительной степени раскрытия губ при разных гласных) высот тех же график—в миллиметрах.

Исследование **длины** губных график и, следов., *продолжительности* соответствующих губных артикуляций дало неодинаковые резуль-

---

[1]) Об этом приборе см. мой Курс экспериментальной фонетики применительно к литературному русскому произношению, вып. I, Казань, 1917 г., стр. 67—70 (в этом выпуске читатель найдет описание и других упоминаемых в настоящей статье приборов, равно как и образцы график). Все указываемые в статье записи относятся к моему произношению—восточному общерусскому.

[2]) Измерения длины губных график, полученных при указанной (медленной) скорости, производились частью с помощью миллиметровой линейки, частью же микрометрически, после чего с помощью известных приемов переводились на время (см. в моем указ. соч. стр. 7 сл. и особенно 10—11); время дается нами в сотых долях секунды, при чем ^{s} (сотая доля секунды) служит единицею счета, напр. 42^{s}=0,42″.

таты в зависимости от двоякого типа в постановке опытов: 1) в первом типе гласные произносились друг за другом в определенной последовательности (*А—Э—І—О—У—Ы*) по разу в такой серии, повторенной несколько раз (8 раз); 2) во втором типе каждый гласный повторялся самостоятельно, особо от других, определенное число (13) раз.

Опыты *первого типа* обнаружили тот любопытный факт, что указанный ряд, состоящий из шести гласных, непроизвольно разбивался в произношении на две группы, по три элемента в каждой, причем получался некоторый ритм с главным ритмическим ударением на гласном *О*, начинавшим собою вторую половину ряда; этим обстоятельством и определилась в средних выводах относительная длительность губной артикуляции гласных первой группы ряда, в которой большая длительность приходится в общем на последнем элементе (в меньшем числе случаев на внутреннем), так что длительность возрастает от начала ряда до первого элемента второй группы, т. е. от *А* до *О* включительно (*А*<*Э*<*І*<*О*), а далее к концу уменьшается (*О*>*У*>*Ы*). Значит, в этом случае различие губной длительности гласных обусловливалось не столько артикуляционною их природою, сколько местом в ритмическом ряде.[1])

Опыты *второго типа*, где каждый гласный повторялся особо от других и притом довольно значительное число раз и занимал отдельный оборот цилиндра (при чем и самый порядок гласных был иной: (*А—Э—О—Ы—І—У*), обнаружили в своих результатах, что средняя длительность губной артикуляции гласных слегка и постепенно уменьшается по направлению к концу сеанса, что указывает на ускорение произношения по пути к концу опытов (вполне понятное при большом числе случаев произношения), за исключением впрочем предпоследнего случая, который оказался слегка длительнее предшествующего (*І*>*У*). Таким образом и здесь относительная длительность гласных в их губной артикуляции определялась не столько природою этой последней, сколько условием постановки опытов, именно—обилием записей за один сеанс.[2])

Между тем **высоты** губных кривых в опытах того и другого типа представляют одинаковое соотношение, свидетельствуя тем, что в губных графиках соотношение высот (т. е. степеней раскрытия губ) проявляет большее постоянство отношений, чем длины (время артикуляций).[3]) Все сказанное подтверждается нижеследующими средними числовыми выводами из график (в первом типе из 8 случаев, а во втором из 13, при чем гласные указываются в порядке произношения для того и другого

---

[1]) Влияние ритмического момента при опытах замечалось и другими исследователями, напр. Rousselot Les Modifications phonétiques etc., стр. 136 (пагинация журнала Revue des Patois gallo-romans 1891—93). Непроизвольность появления ритма даже там, где нетолько не было никакой к нему тенденции, а напротив предполагалось возможно однородное произношение каждого из элементов ряда, свидетельствует, насколько ритм присущ нашей природе.

[2]) Срв. и по этому поводу Rousselot, l. c., стр. 135.

[3]) Заметим, что гласный *Ы*, как показывают данные высот в губных графиках, оказывается в двух разновидностях—более закрытой в первом типе, где несколько уступает по губной открытости узкому гласному *І*, и более открытой во втором типе, где слегка превосходит губную открытость гласного *О* (вообще небольшую, так как губы при произношении этого лабиализованного гласного касаются между собою в угловых частях, вследствие чего отверстие является укороченным в длину, а с этим связано уменьшение и вертикального расстояния между губами).

типа) параллельно для высот и длин, а затем и соответствующими диаграммами. [1])

Первый тип.

Перечень гласных.	Длины в переводе на время.	Высоты график в миллим.
А	43^{3}	6,4мм
Э	50	4,8
І	51	3,3
О	52	3,7
У	46	1,9
Ы	42	3,0

Второй тип.

Перечень гласных.	Длины в переводе на время.	Высоты график в миллим.
А	52^{3}	6,7мм
Э	49	4,2
О	48	3,0
Ы	47	3,5
І	51	2,5
У	36	1,2

Числовые данные таблиц представим теперь в диаграммах, причем для большей ясности линиями соединяем точки длин, а пунктиром точки высот:

Рис. 79.

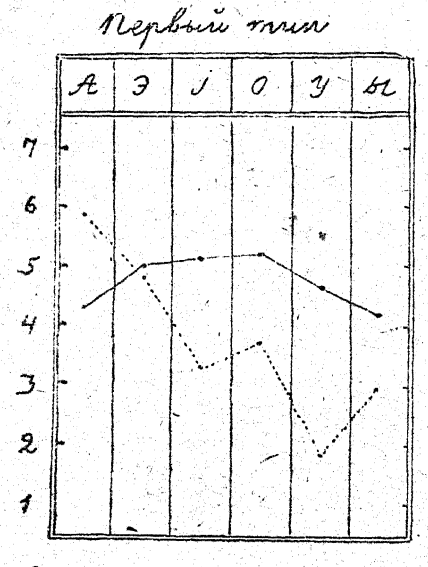
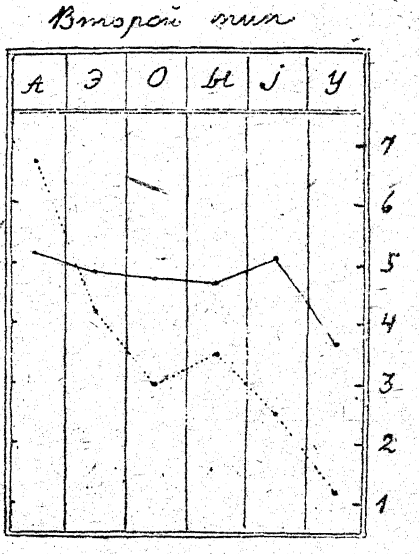


Рис. 80.



Обращаемся к записям на *средней* скорости (янв.-февр. 1908 г.), причем мы пользовались приемом второго типа (т. е. каждый гласный пов-

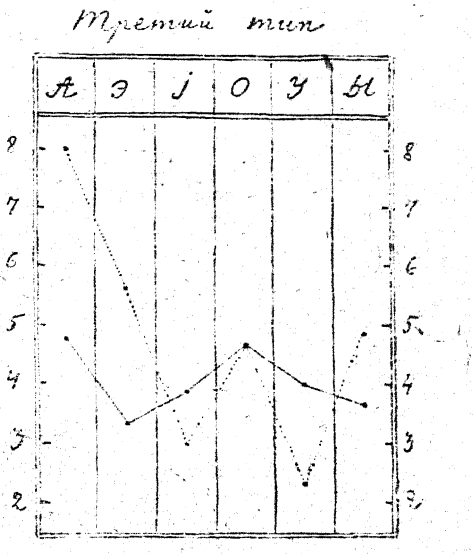
[1]) В диаграммах, в видах большего удобства, числа временной *длительности* мы наносим везде уменьшенными в 10 раз, т. е. если напр. губная длительность *А* выражается числом 48^{3}, то мы принимаем для диаграммы 4,8 и т. д., отмечая точками соответствующие на ней места, и таким образом более высоко стоящие точки обозначают бо́льшую длительность; *высоты* же губных кривых наносятся соответственно миллиметровым числам.

торялся особо от других и записывался на отдельном обороте цилиндра), но в небольшом числе повторений, что благоприятствует устранению ускорения в произношении к концу сеанса; записи в данном случае были произведены комбинацией двух приборов — губного прибора Rosapelly—гортанная капсула Rousselot. Результаты измерения губных кривых, и средним числам, иллюстрируют следующая числовая таблица и соответствующая ей диаграмма: [1])

Третий тип.

Перечень гласных.	Длины в переводе на время.	Высоты график в миллим.
А[3]	48[3]	8мм
Э[10]	34	5,6
І[6]	39	3
О[3]	46	4,6
У[5]	40	2,3
Ы[5]	36	4,9

Рис. 81.



И здесь соотношение **высот** губных график гласных следует общему правилу, выведенному в предшествующем, а именно: ширина губного раскрытия, по показанию график, уменьшается в направлениях *А* — *Э* — *І* и, с другой стороны, *О* — *У* (при чем уровень *О*, начинающего второй ряд, не является постоянным относительно другого среднего гласного, т. е. *Э*); что касается *Ы*, то этот гласный занимает колеблющееся промежуточное положение, подходя по губной раскрытости то к средне-широким, то к узким. В рассматриваемом типе опытов *О* уступает по губной открытости гласному *Э*, а *Ы* занимает промежуточное положение, но более близкое к *О* (т. е. подобно второму типу). [2])

---

[1]) Оговоримся, что опыты разбились на два сеанса, правда — близкие между собою по времени (*Э* и *І* были записаны в первом сеансе, прочие гласные *Ы*, *У*, *А*, *О* — во втором); так как гласные были произнесены не по одному и тому же числу раз (как видно из цифр, поставленных в квадратных скобках), то средние числовые выводы отдельных гласных имеют не одинаковую мощность.

[2]) Возможно производить и *непосредственные артикуляционные измерения* в отношении ртового отверстия при произнесении гласных, см. наш Опыт физиологии общерус. произнош. (1909), стр. 19—24, где можно видеть, что данные непосредственных измерений и графического исследования в общем гармонируют между собою; там же приведены также данные для межзубной открытости. Иногда может понадобиться определение площади губного отверстия при гласных (напр. при анализе факторов тембра); принимая губное отверстие за эллипс, не трудно вычислить его площадь по известной формуле $\pi a b$, где a и b выражают полуоси; в указываемом сочинении даны в натуральную величину изображения таких эллипсов для моего произношения, равно как и размеры осей, соответствующих длине и ширине губного отверстия при гласных, в миллиметрах; нужно взять половинные величины этих осей, перемножить

Что касается **длительности** губной артикуляции в третьем типе, то наибольшая принадлежит гласным *А* и *О* (средне-широким непалатальным), гласные *Э* и *Ы* являются наиболее краткими, тогда как пара узких гласных *І*, *У* занимает промежуточное положение между первою и второю группою. Такое, несколько своеобразное распределение гласных по длительности губной артикуляции находится, как увидим далее, в некотором соотношении с сонорным моментом соответствующих график.

Переходя к рассмотрению **сонорного** участия *гортани* при гласных в отдельном произношении, мы остановимся прежде всего на *длительности звучания*. Относящиеся сюда числовые данные в средних выводах (от записей на средней скорости вращения цилиндра комбинациею приборов „Губы+Гортань", а также одного гортанною капсулою) мы представим предварительно в таблице с указанием приборов, времени записи[1]) и числа случаев произношения (это число отмечаем цифрою в квадратных скобках); единицею меры для длительности и здесь служит сотая секунды (условно обозначаемая через σ), соответственно чему проставляемые нами целые цифры обозначают число сотых секунды; рядом (в круглых скобках) мы указываем число вибраций (v).

	I. Губы+Гортань	II. Только гортань	III. Губы+Гортань
	янв.-февр. 1908.	12 XI 1913.	1 III 1913.
А	[3] 19σ (24v)	[5] 21σ (26v)	[1] 23σ (33v)
Э	[10] 21 (27)	[6] 21 (28)	[1] 29 (48)
І	[6] 24 (31)	[6] 22 (31)	[1] 33 (57)
О	[3] 19 (24)	[5] 20 (27)	[1] 27 (39)
У	[5] 22 (29)	[4] 22 (33)	[1] 32 (49)
Ы	[5] 23 (30)	[9] 20 (30)	—
Средний вывод	21σ (27v)	21σ (29v)	29σ (45v)

Примечание 1. В столбцах I-ом и II-ом каждый гласный в опытах занимал особый оборот цилиндра (впрочем *Э* в первом столбце и *Ы* во втором заняли каждый по два оборота), при чем в столбце I-ом произношение разбилось, как было упомянуто раньше, на два сеанса, отделенные только недельным промежутком, при тех же самых приборах (*Э* и *І* в одном сеансе; а прочие гласные в другом); в столбце III-ем гласные были произнесены по разу, при чем *А* — в ряде *А, АП...*, а прочие гласные (*О, Э, І, У*) на новом обороте. Не смотря на все эти частности отдельных столбцов, числовые данные последних взаимно гармонируют.

их и полученное произведение увеличить в π раз, т. е. умножить еще на $3^1/_7$, и мы получим приблизительную величину площади губного отверстия для соответствующих гласных в кв. милл.: *А*=246 кв. мм., *Э*=131, *Ы*=79, *І*=59, *О*=50, *У*=8.

[1]) Мы проставляем и время записи, так как наши материалы находятся в архиве график университетского кабинета экспериментальной фонетики и датированные записи облегчает отыскание график для проверки желающим.

Примечание 2. Из таблицы видно, что произношение гласных является по длительности звучания частию нормальным (столбцы I-ый и II-ой), а частию замедленным (столбец III-ий), что однако не вносит противоречий в сравнительное соотношение сонорной длительности отдельных гласных. [1]) При этом заметим, что проставленные нами для каждого гласного цифры сонорной длительности в столбцах первом и втором являются *средними* из того числа случаев которое показано в квадратных скобках, колеблясь в действительности по отдельным случаям. Чтобы дать понятие о *пределах колебаний*, укажем минимальные и максимальные числа каждого гласного напр. для второго столбца: *А*=18—23[3]. *Э*=19—24. *І*=19—23, *О*=17—21. *У*=21—23. *Ы*=17—21; [2]) из этих числовых данных видим, что разность по длительности вариантов отдельных гласных простирается от 2 до 5 сотых секунды, при чем в вышеуказанных пределах длительности у всех гласных содержится общая цифра 21[3], т. е. именно та, которая получена для них в качестве среднего вывода. К сказанному прибавим, что наши средние данные и выводы из них носят характер известной приблизительности, степень которой зависит от того, на-сколько велика и однородна „мощность" средних цифр, т. е. по-скольку они исходят от одинакового числа частных случаев и как много этих последних.

Числовые данные вышеприведенной таблицы согласно свидетельствуют о том, что **сонорная длительность гласных средне-широких короче по сравнению с чисто-узкими**, при чем обыкновенно *О* и *Э* занимают среднее положение между нейтральным гласным *А*, наиболее коротким по звучанию, и соответствующими узкими *У* и *І*: в то же время задний лабиализованный ряд *О*, *У* обыкновенно короче по сравнению с гласными переднего ряда *Э*, *І*, так что более широкий гласный *О* иногда равняется по длительности с *А*; гласный *Ы* сближается то с средне-широкими, то с узкими. [3])

Чтобы придать большую сравнимость числам длительности голосового звучания отдельных гласных, указанным в нашей таблице, мы представим последнюю еще в другом виде именно—уже не в прямых данных (не в сотых долях секунды), а в относительных, через принятие длительности одного из элементов за 100 и чрез выражение прочих элементов применительно к этому числу, т. е. в процентах; само собою понятно, что за 100 мы примем длительность гласного *А*, как нейтрального, и по отношению к этому основанию определим время звучания других гласных для каждого из трех столбцов таблицы с присоединением средних выводов.

	I	II	III	Средние выводы.
А	100	100	100	100
Э	111	105	126	114
І	126	110	143	126
О	100	100	117	106
У	116	110	139	122
Ы	121	100	—	110

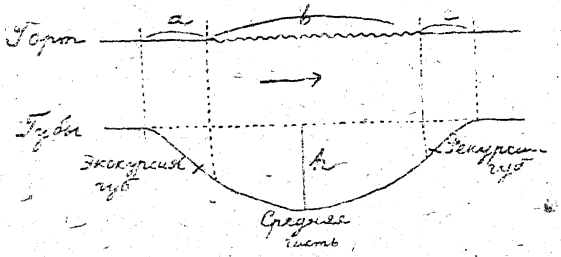
[1]) Так как вибрационная кривая гласных заканчивается очень пологими, едва уловимыми вибрациями, то нужно еще считаться с возможностью, что несколько вибраций могли остаться там и сям не подсчитанными, а это хотя и видоизменяет слегка цифры абсолютной длительности, но если подсчет производился одним и тем же лицом—не влияет существенно на соотношения.

[2]) Интересно отметить, что *максимальные* цифры чаще всего приходятся на первое произношение ряда, а также могут обусловливаться ритмом, придающим большую степень ударенности тому или другому месту в ряде, а *минимальные* цифры нередко приходятся на заключительное произношение в ряде.

[3]) В виду значительно расходящихся вариантов этого гласного (*Ы*) мы имеем основание думать, что он и в действительном произношении представляет две равновидности (вероятно—широкую и узкую), как это подтверждается и некоторыми другими экспериментальными данными (срв. напр. сказанное выше о высотах губных график этого гласного; можно указать также на двоякую тембровую его высоту).

Посмотрим теперь, каково *соотношение по времени сонорного момента и губной артикуляции* при отдельном произношении гласных. Уже непосредственное наблюдение зрением и мышечным чувством в связи с слуховым восприятием над произношением отдельных гласных показывает, что звучание при них начинается не одновременно с началом раскрывания губ, а несколько позже, заканчивается же ранее заключительного сомкнутия губ. Графики, подтверждая это непосредственное наблюдение, позволяют сверх того возможно точно установить временное соотношение между этими моментами.[1]) Общий вид этих график („Губы+Гортань") может быть представлен по средним данным следующим схематическим чертежом:

Рис. 82.



Вполне понятно, что главную часть гортанной линии составляет часть с о н о р н а я, отмеченная на чертеже буквою *b*, ей предшествует часть *a* или п р е д с о н о р н а я, а следует часть *c* или з а с о н о р н а я (на губной кривой высота *h* соответствует моменту наибольшего раскрытия губ и неодинакова при разных гласных). Часть сонорная наиболее значительна по времени, короче—часть предсонорная и еще короче—засонорная. Следующая таблица представляет средние числовые результаты от измерения этих частей (по гортанным графикам янв. — февр. 1908 г.), при чем повторены и данные (указывавшиеся выше) от анализа соответствующих губных кривых:

		А[3]	Э[10]	І[6]	О[3]	У[5]	Ы[5]	Средние выводы.
Губы	Длительность губной артикул.	48$^{\sigma}$	34	39	46	40	36	40,5$^{\sigma}$
	Высоты губных график	8^{мм}	5,6	3	4,6	2,3	4,9	—
Гортань	Сонорная часть	19$^{\sigma}$	21	24	19	22	23	21$^{\sigma}$
	Предсонорная часть	11$^{\sigma}$	8	9	14	13	9	11$^{\sigma}$
	Засонорная часть	18$^{\sigma}$	5	6	13	5	4	8,5$^{\sigma}$

[1]) Мы говорим здесь о движении *губ* в соотношении с деятельностью гортани, хотя и движения *языка* также поддаются изучению в соотношении с сонорным моментом с помощью а м и у л (см. мой Курс эксперим. фонетики I, стр. 60 — 61, II, 48 сл.); но соответствующие опыты нами лишь начаты и потому мы не имеем пока возможности высказаться по этому вопросу.

Числовые данные таблицы, относящиеся к гортани, приводят к следующим выводам:

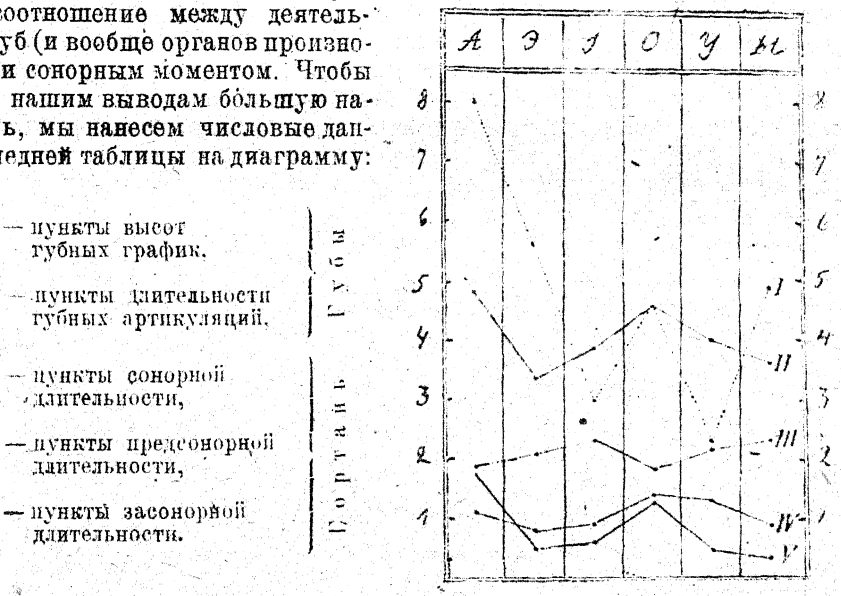
а) относительно *сонорной* части мы уже знаем из предшествующего, что *А* и *О* имеют по сравнению с остальными гласными наиболее кратковременное звучание гортани (*А* и *О*=19$^{\sigma}$, а между тем длительность звучания у прочих гласных заключается между 21—24), узкие же гласные, и особенно палятальный, имеют наиболее длительное звучание;

б) что касается *предсонорной* части, то звучание гортани долее всего не наступает, после начавшегося раскрытия губ, у лабиализованных гласных (предсонорная часть гласного *О*=14$^{\sigma}$, *У*=13, у прочих же гласных заключается между 8—11), замедляясь вероятно сложностью артикуляции, именно—комбинированностью губной и дальнеязычной работы, требующею более значительного времени; [1])

в) гласные с наиболее коротким звучанием имеют по сравнению с другими гласными наиболее длительную *засонорную* часть (так, эта часть у гласного *А*=18$^{\sigma}$, *О*=13, тогда как у прочих гласных оказывается весьма кратковременною, заключаясь между 4—6). [2])

Сказанного достаточно, чтобы убедиться что действительно существует тесное соотношение между деятельностью губ (и вообще органов произношения) и сонорным моментом. Чтобы придать нашим выводам бо́льшую наглядность, мы нанесем числовые данные последней таблицы на диаграмму:

Рис. 83.



I — пункты высот губных график. } Губы

II — пункты длительности губных артикуляций. } Губы

III — пункты сонорной длительности, } Гортань

IV — пункты предсонорной длительности, } Гортань

V — пункты засонорной длительности. } Гортань

[1]) Произношение гласных в опытах всегда исходило от сомкнутых, а не полураскрытых губ, а в этом случае губы начинают свое экскурсионное движение не сразу, а через посредство предварительного полураскрытия, требующего сравнительно малого времени и выраженного на графиках подъемом меньшей крутизны по сравнению с самым экскурсионным движением. Эти величины, относящиеся к подготовительному разнятию губ, были нами исключены из времени до-сонорной части (у гласного *А* такого переходного момента на графиках не заметно); таким образом отброшено: *О*—3$^{\sigma}$, *У* и *Ы*—1, *Э*—2, *І*—3. Прибавка этих величин к времени до-сонорной части не изменяет того нашего вывода, что у губных гласных часть эта имеет наибольшую длительность и что вся артикуляционная работа губ в целом занимает наибольшее время у гласных *А* и *О*, а наименьшее у гласных *Э* и *Ы*.

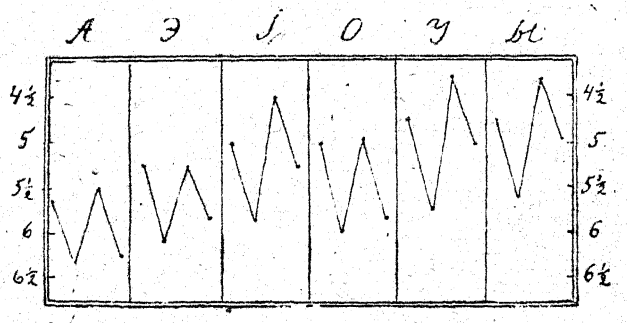
[2]) Заметим, что засонорная часть может иметь преувеличенно затянутую рекурсию вследствие замедления в окончательном сомкнутии губ; однако такого вялого произношения мы избегали.

Из диаграммы ясно видно, что 1) *сонорная* длительность участия гортани (линия III-ья) при произношении отдельных гласных, возрастающая от *А* к *І* и от *О* к *У*, находится в обратном отношении к их *губной открытости* (высоты губных график, как показывает линия I-ая, убывают по направлению от *А* к *І* и тоже от *О* к *У*),[1]) и что 2) длительность частей *предсонорной* (линия IV-ая) и *засонорной* (линия V-ая) находится в прямом соотношении с *целою губною длительностью*, при чем конечно речь идет не о точной пропорциональности, а лишь о согласованности направлений возрастающего и убывающего (с длительностью этих именно несонорных частей гортанных кривых и связано ближайшим образом вышеупомянутое своеобразное видоизменение длительности целой губной артикуляции гласных при отдельном их произношении).

Теперь обратимся к *анализу самой сонорной деятельности*, которая не является вполне однородной на своем протяжении, изменяясь по *высоте*, *амплитуде* и *тембру*.

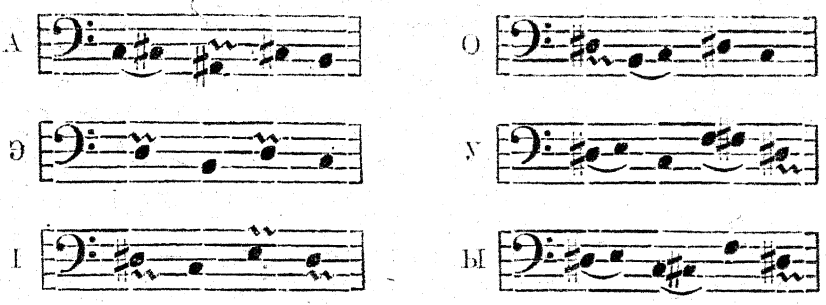
Относительно движения или изменения голосового тона по высоте при произношении отдельных гласных мы из ряда опытов приходим к выводу, что движение это при всех гласных обычно представляет ту общую черту, что слагается из трех частей—нисходящей, восходящей и заключительной нисходящей, при чем наибольшая длительность обычно принадлежит средней части, т. е. восходящей. Следующая диаграмма, составленная по средним данным (из опытов 12/XI 1913 г.), а также соответствующая нотная транскрипция выражают тесситуру и предельные высоты этих частей (без принятия во внимание продолжительности каждой части): [2])

Рис. 84.



[1]) Такому соотношению можно дать следующее физиологическое истолкование: вообразим себе, что дыхательный аппарат получает из нервного центра одинаковый экспираторный импульс для отдельных гласных при однородности их произношения, но так как израсходование соответствующего количества сонорного выдоха, проходящего через голосовую щель, при узких гласных замедляется некоторыми преградами, то в результате и получается непроизвольная компенсация в виде увеличения сонорной длительности этих последних гласных.

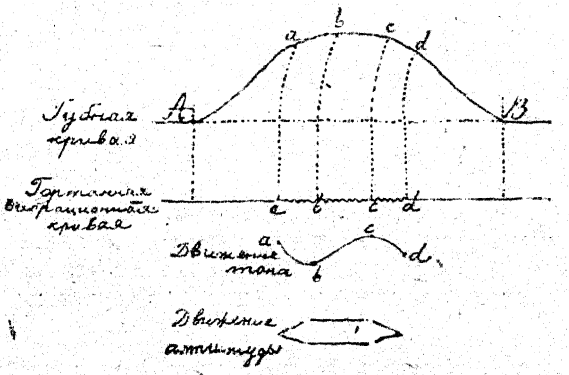
[2]) Цифры, проставленные сбоку таблицы, показывают числа делений микрометра, применительно к которым нанесены на диаграмму предельные высоты тона групп, а далее мы представляем диаграмму в переводе на нотное обозначение; при этом нельзя забывать, что при средних выводах из групп (в 4 вибрации каждая) интервалы между высшими и низшими предельными нотами естественно несколько сближены сравнительно со счетом по отдельным вибрациям. В нотной транскрипции знак ⌢ помещенный над или под нотою показывает, что тон несколько выше или ниже; знак соединения ⁀ служит для обозначения промежуточного тона между двумя нотами.



Из диаграммы и нотной транскрипции не трудно видеть, что, не смотря на общее сходство в движении тона, гласные представляют *необинаковости в размере интервала средней или восходящей части*, который с переходом от (*А; Э, О*) к узким (*І, У, Ы*) расширяется и притом в сторону повышения, [1]) так что в этом отношении гласные распределяются в два знакомые нам ряда: *А—Э—І* и *О—У—(Ы)*, и таким образом наше обобщение о роли момента ртовой открытости в механизме гласных пополняется еще одним новым обстоятельством, так что можем теперь сказать, что с переходом от среднешироких гласных к соответствующим узким уменьшается открытость губ, возрастает сонорная длительность и расширяется интервал средней части звучания гортани. [2])

Для полноты мы должны еще сопоставить указанные три части в движении голосового тона гласных звуков с ходом губной кривой. В общем это соотношение можно выразить в следующей схеме (присоединяем и ход изменения амплитуды голосового тона):

Рис. 85.



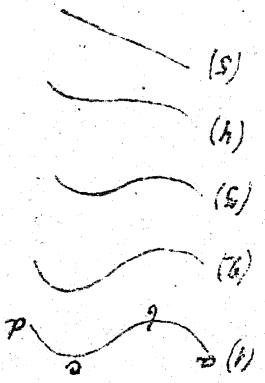
Из представленного схематического изображения видим, что голосовой тон, вибрационная кривая которого заключается между пунктами *a* и *d*, сначала понижается до некоторого нисшего пункта *b*, затем снова повышается до пункта *c*, после чего происходит заключительное падение тона. Впрочем, кроме этого более типичного движения тона, при гласных

[1]) Впрочем при оценке тесситуры нужно считаться с тем, что она легко повышается по направлению к концу опытов.

[2]) Это расширение интервала естественно поставить в тесную связь с удлинением всего звучания, дающим более свободы для такового расширения.

наблюдаются также *вариации*, сводящиеся к следующим главным случаям (которые мы иллюстрируем в виде прилагаемых кривых): пункт *c* приходится на одном уровне с *a* (1), может быть выше его (2), но также и ниже (3), движение тона может даже не иметь особого под'ема (4) [1]) и, наконец, в случае аттакированного произношения, представляет ровное падение (5), как бы в положении после глухого взрывного. [2]) В то же время интервал между предельными наивысшим и наинизшим пунктами может колебаться в пределах от одного тона до трех тонов, т. е. от секунды до увеличенной кварты — по скале темперированной гаммы и при условии измерения вибрационной кривой по отдельным вибрациям (при групповом счете пределы эти сближаются). Что касается соотношения с губной кривой, то в общем срединный участок *bc* гортанной вибрационной линии соответствует моментам наибольшего раскрытия губ; в каком соотношении к вариациям губной кривой могут стоять приведенные вариации в движении голосового тона, мы пока ответить на этот вопрос не можем. [3])

Рис. 86.



Переходим к рассмотрению *амплитуды голосового тона*. Сила или амплитуда голосового тона гласных звуков, по-скольку она выражается *амплитудою вибрационной кривой гортани* (как измеренною, так и вычисленною), [4]) изменяется в определенном соотношении с движением тона, а именно: начальному понижению голосового тона соответствует возрастание амплитуды, при чем максимум ее приходится около центра понижения *b*, с которым однако может и не совпадать вполне, иногда слегка предшествуя ему, иногда же слегка находясь за ним; далее амплитуда вибраций обычно слегка уменьшается, что при восходящем движении тона — смотря по быстроте или же медленности такого — может и не обозначать ослабления энергии колебания, а устойчивость ее; наконец, в соотношении с областью пункта *c* начинается заключительное падение амплитуды в связи с таким же падением тона (нередко после короткого предзаключительного усиления).

Как и при интонации, также и в области амплитуды мы встречаем *вариации*, а именно: иногда первая силовая вершина (у пункта *b*) является главною, а иногда максимум силы является в области пункта *c*, иногда второй силовой вершины не бывает. Отсутствие заметного увели-

---

[1]) Применяясь к терминам фразовой интонации, можно условно обозначить первый и третий типы повествовательными, второй вопросным, а четвертый ответным (здесь мы усматриваем связь и соотношение между простейшими элементами и сложным речевым целым).

[2]) С этими вариациями нужно считаться при получении средних выводов, группируя последние по типам интонации.

[3]) Замечу, что для выполнения этой задачи я проектирую *новое устройство цилиндра*, именно — предлагаю снабдить его основания выступающими и достаточно частыми, с равными промежутками зубцами, служащими для принятия защелки удерживающей цилиндр в принятом положении: таким образом, по окончании записей легко проводить как вертикали, так и проекционные дуги на достаточно близких и равных расстояниях, передвигая рукою цилиндр от зубца к зубцу. Такой цилиндр я уже заказал университетскому механику.

[4]) Об амплитуде измеренной и вычисленной, в общем впрочем дающих согласные показания, см. в моем Курсе эксп. фонет. II, стр. 36—38.

чения амплитуды в силовой долине может зависеть—помимо сказанного выше—еще и от того, что на эту область приходится максимальное раскрытие рта, всегда редуцирующее амплитуду гортани. Указанные вариации амплитуды могут подлежать еще более детальному изучению в связи с движением тона и с особенностями губной артикуляционной кривой.

Наконец мы должны еще указать что *максимум амплитуды* гортанных график у разных гласных при одинаковой силе произношения оказывается неодинаковым, а именно—с переходом от широкого гласного к узким (особенно губным) он увеличивается; так, он возрастает по направлению от *А* к *І* и от *О* к *У* (что касается *Ы*, то этот гласный и здесь является в двух разновидностях), при чем амплитуда лабиализованного гласного *О*, принадлежащего по язычной артикуляции к заднему ряду, одинакова с амплитудою гласного *І*, т. е. предельного по узкости гласного в переднем ряду. Вот относящиеся сюда средние цифры максимума амплитуды, в делениях микрометра, при гласных (по графикам от 12/XI 1913 г.): *А*=3,65; *Э*=4,28; *І*=4,47; *О*=4,47; *У*=4,56; *Ы*=4,37 и 4,62. Таким образом наше приведенное выше обобщение о связи артикуляционной открытости с сонорной деятельностью гортани при отдельном произношении гласных мы можем еще более расширить и формулировать следующим образом: с уменьшением артикуляционной открытости 1) возрастает *длительность звучания*, 2) расширяется *интервал* средней части звучания, 3) увеличивается в своем максимуме *амплитуда* гортанных вибраций.

Примечание. Произношение гласных предполагает очень сложный механизм, который наша статья вскрывает лишь отчасти. Нужно иметь в виду, что *изменения голосового тона по высоте* и *силе* обусловливаются действием различных факторов: изменение по высоте зависит от изменения в натяжении голосовых связок и, следовательно, является функцией гортанной мускулатуры, тогда как изменение по силе происходит от изменения в степени выдыхательного напора на голосовую щель, так что является функцией фонационно-выдыхательной деятельности грудной клетки, что конечно не устраняет известной координированности той и другой работы. Что касается выдыхательного напора на голосовую щель, то он поддается непосредственному изучению на трахеотомированных с помощью манометра; такое исследование, с достаточною полнотою произведенное Грюцнером, показало, что трахеальный напор воздуха на голосовую щель при произношении гласных при равных условиях возрастает с последовательным переходом от широкого гласного к узким, а также при усилении и повышении голосового тона.[1]) Эти положения допускают следующее истолкование: усиление выдыхательного напора при узких гласных может зависеть от артикуляционных сужений в ртовой надставной трубе, сдерживающих выхождение звучащего тока; усиление трахеального давления при повышении тона вызывается тем, что голосовые связки натягиваются туже и потому голосовая щель представляет большее сопротивление току; увеличенное давление при усилении гласного одной и той же высоты само собою понятно. Но если мы будем исследовать давление воздуха не в области трахеи, а дальше—при выходе изо рта, с помощью амбушюра и спирометра, то картина получится иная; так, количество выдыхаемого воздуха с повышением тона при одной и той же силе не увеличивается, а убывает, так как голосовая щель при туже натянутых голосовых связках меньше пропускает воздуха; также при средне-широких и узких гласных количество выдоха по-видимому следует иному пути сравнительно с трахеальным давлением, и только усиление тона одной и той же высоты происходит при увеличении как трахеального давления, так и количества выдыхаемого воздуха, ибо под влиянием более сильного трахеального давления голосовые связки, совершая колебания

[1]) См. Grützner P. Physiologie der Stimme und Sprache (Hermann's Hdb. d. Phys. I-2, 1879), стр. 64—65. Срв. также Roudet Recherches sur le rôle de la pression sous-glottique dans la parole (La Parole 1900, стр. 599—612).

с большею амплитудой, в моменты своих периодических расхождений пропускают большие количества воздуха, подобно издающей тон сирене с отверстиями большего диаметра. Результаты моих наблюдений над гласными в отдельном произношении с помощью спирометра и по графикам амбушюра я надеюсь представить в другом месте.

Наши графики содержат данные и для заключений о т е м б р е гласных, отражающемся в графиках вторичными зубчиками на вибрациях. Эта тембровость, свидетельствующая, что звук достиг своей определенности, в общем приходится на среднюю часть гласного, вибрации же начальные и конечные имеют простой синусоидный тип.

Считаю не лишним в заключение, для большей отчетливости, резюмировать основное содержание моей статьи в ряде нижеследующих отдельных положений:

1) Для *более успешного представления фонетики живого языка в свете экспериментальных данных*, при современном состоянии этой дисциплины, необходимо восходить от простых элементов к более сложным их комбинациям.

2) При *постановке экспериментально-фонетических опытов* нужно иметь в виду, что слишком большое количество записей за один сеанс может вызывать ускорение произношения и повышение тесситуры к концу опытов; повторное произношение ряда звуков или слов в определенной последовательности может вызывать непроизвольное подчинение ряда ритмическому фактору, оказывающему влияние на высоту и силу тона в элементах ряда; лучше всего записывать каждый звук или слово отдельно на особом обороте цилиндра, а ряды звуков и слов с изменением порядка.

3) При отдельном произношении гласных *длительность губной артикуляции* по моим записям в среднем выводе=40,5$^{\sigma}$, а для отдельных гласных заключается в пределах 34—48$^{\sigma}$, причем наибольшая длительность принадлежит гласным *А* и *О*, наименьшая гласных *Э* и *Ы*, гласные же узкие *И* и *У* занимают промежуточное положение.

4) *Ширина губного раскрытия* уменьшается в направлении *А—Э—И* и *А—О—У* и притом в большей мере в лабиализованном ряду в связи с известною особенностью губного с'ужения.

5) *Сонорная длительность* гласных, занимающая срединное положение по отношению к губной артикуляции, в среднем выводе=21$^{\sigma}$, т.е. приблизительно вполовину короче времени губной артикуляции, а по отдельным гласным она варьирует в пределах от 19—24$^{\sigma}$, при чем наиболее широкий гласный *А* имеет наиболее короткое звучание, которое возрастает по мере перехода к гласным узким, в особенности переднего ряда (гласный О в лабиализованном ряду может достигать краткости гласного *А*). Таким образом изменение сонорной длительности в общем происходит в обратном отношении к артикуляционной открытости гласных.

6) *Число вибраций* идет в согласии с сонорной длительностью, хотя и не с полной пропорциональностью: в среднем оно=27 v., а по отдельным гласным колеблется в пределах 24—31v.

7) Гласный *Ы* как в отношении губной артикуляции, так и гортанного звучания оказывается в двух разновидностях, по-видимому—более открытой и более закрытой.

8) *Предсонорная часть* гласных наиболее значительна у лабиализованных гласных, вероятно в связи с большею сложностью комбинированной работы (губной и глубокой задне-язычной); *засонорная* часть за

метно удлинена у гласных с наиболее коротким звучанием. Длительность этих беззвучных частей, той и другой вместе, почти равняется в среднем выводе длительности звучания, а распределение ея по отдельным гласным идет в согласии с распределением длительности целой губной артикуляции.

9) *Движение голосового тона* при отдельном произношении гласных слагается обычно из трех частей — нисходящей, восходящей и заключительной нисходящей (впрочем в отдельных случаях наблюдаются определенные вариации). При этом наибольшая длительность принадлежит восходящей части, являющейся главною и соответствующей моментам наибольшего раскрытия губ. В самом движении тона оказывается неодинаковость в размере *интервала средней части*, который возрастает с переходом от средне-широких гласных к узким (и притом в сторону повышения) т. е. в обратном отношении сравнительно с изменением артикуляционной открытости гласных.

10) *Аттакированное произношение* характеризуется простым нисходящим движением голосового тона.

11) *Движение амплитуды* голосовых вибраций находится в следующем соотношении с движением тона: при начальном понижении голосового тона амплитуда возрастает, далее — на восходящей части, т. е. в моменты наибольшего раскрытия губ, обычно слегка уменьшается (что однако может не выражать ослабления звуковой энергии) и, наконец, уменьшается вместе с заключительным паденнем тона (иногда после короткого предзаключительного усиления, представляющего как бы вторую силовую вершину); в отдельных случаях и в ходе амплитуды, как и при изменении голосового тона по высоте, наблюдаются известные вариации.

12) Разные гласные, при одинаковых условиях произношения, характеризуются различием в *максимуме амплитуды*, который возрастает по направлению от *А* к *І* и от *О* к *У*, т. е. изменение стоит в обратном отношении к изменению артикуляционной открытости.

13) *Тембровый характер вибраций* на гортанных графиках, свидетельствующий о достижении гласным своей определенности, в общем приходится на среднюю часть звучания.

14) Из нашего исследования вытекает, что *с различиями артикуляционной открытости* гласных (являющимися на губных графиках наиболее выдержанным моментом) *тесно связаны различные стороны сонорного участия гортани* — длительность звучания, изменение интервала у средней части звучания, изменение в максимуме амплитуды гортанных вибраций.

15) Самое изменение голосового тона по *высоте* и по *силе* производится действием не одного и того же фактора, при чем первое является функцией действия гортанных мышц, а второе — экспираторного аппарата. Относительно силы произношения следует отличать изменение в давлении тока в трахеальном отделе речевого аппарата и при выходе из ртового отверстия: гортанные графики имеют ближайшее отношение к изменению в первом отделе, тогда как изменение в воздушном давлении ртового отдела должно изучаться с помощью амбушюра и спирометра (таким образом, комбинация гортанной капсулы и амбушюра при записях не только не излишня, но имеет существенно важное значение).

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
Общества
Академии Наук СССР

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ.

Стр 18_{13}. В сноске в формуле

$$\underbrace{c \ldots c_1}_{m=11}$$

первое c при печатаньи опустилось книзу.

Стр. 19[15]: в правом столбце для 1a (a) должно стоять число 1,68179.

Стр. 46. На рисунке сбоку первой кривой не вполне вышло $\varphi=0$.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
Общественных Наук
Академии Наук СССР

ТОГО ЖЕ АВТОРА:

Общий курс русской грамматики. (Из университетских чтений). Издание 4-ое, дополненное. Казань, 1913.

Русская грамматика. Пособие для педагогических классов и при самообразовании. Казань, 1918.

Лекции по общему языковедению. Издание 2-ое, значительно дополненное. Казань, 1915.

Курс экспериментальной фонетики применительно к литературному русскому произношению. (С рисунками в тексте). Вып. 1-й и 2-ой. Казань, 1917—1922.

Краткий очерк сравнительной грамматики арио-европейских языков. Издание 2-ое, исправленное и значительно дополненное. Казань, 1917.

Сравнительная грамматика арио-европейских языков. Вып. 1-ый. Казань, 1914.

Сравнительно-грамматический комментарий к текстам арио-европейских языков. Вып. 1-ый: санскрит. Казань, 1909.

Очерки по языковедению и русскому языку. Пособие при изучении науки о языке. Изд. 3-ье, 1910. Распродано.

Статьи по начальному преподаванию русской грамматики и изучению художественно-литературных произведений. Казань, 1919.

ГОТОВЯТСЯ К ИЗДАНИЮ НОВЫЕ ТРУДЫ АВТОРА:

1) Фонетика литературного русского языка в свете экспериментальных данных.

2) Сравнительная грамматика арио-европейских языков, вып. II-ой (окончание фонетики);

3) Хрестоматия для арио-европейских языков с сравнительно-грамматическим комментарием:

4) Введение в турецко-татарское языкознание (в двух частях).

Р. Ц. Печат. разреш. Тираж 2000 экз. Первая Государственная тип.
КАЗАНЬ
1922 г.