

4330

ФУНД. БИБЛ. В. Т. А.

69. IX 31.

73. VII. 24

О ЗАВИСИМОСТИ

МЕЖДУ УПРУГОСТЬЮ И ПЛОТНОСТЬЮ ВОЗДУХА

ВЪ РАЗРЪЖЕННОМЪ СОСТОЯНІИ.

К. Краевичъ.

Военно-инженерной Академии

X/10



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.  
Тип. В. Демакова, Новый пер., д. № 7.  
1885.



5598273

№  
15416

73. VII. 24

ПРОВЕРЕНО

О ЗАВИСИМОСТИ

МЕЖДУ УПРУГОСТЬЮ И ПЛОТНОСТЬЮ ВОЗДУХА

~~ЧИТАЛЬНЫЙ~~  
~~Библиотека~~  
~~Военно-Инженерной Академии~~  
~~К. К. С. А.~~  
0-1330

ВЪ РАЗРЪЖЕННОМЪ СОСТОЯНІИ.

HP

Н. Краевичъ.



КНИГЪ РОССІИ

005

ЭКЗЕМПЛЯР

ЧИТАЛЬНОГО ЗАЛА

17-490

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.



Тип. В. Демакова, Новый пер., д. № 7.

1885.



Печатано по распоряженію Физико-Химическаго общества при Императорскомъ  
С.-Петербургскомъ университетѣ.

## О ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ УПРУГОСТЬЮ И ПЛОТНОСТЬЮ ВОЗДУХА ВЪ РАЗРЪЖЕННОМЪ СОСТОЯНІИ.

1. Существуетъ весьма ограниченное число методовъ изслѣдованія зависимости между упругостью и плотностью газовъ, но и эти методы представляютъ большія трудности, когда испытуемые газы находятся въ состояніи сильнаго разрѣженія. Обыкновенно газъ заключаютъ въ калиброванную стеклянную оболочку; въ нее вводятъ или выпускаютъ нѣкоторое количество ртути, отчего объемъ и упругость газа измѣняются. Объ объемѣ судятъ по пространству оболочки, занимаемому теперь газомъ; упругость измѣряется помощію манометра. Подобнымъ образомъ поступалъ, напр., Амага<sup>1)</sup>. Зельештремъ<sup>2)</sup>, наполнивъ газомъ нѣкоторой упругости металлическій цилиндрической сосудъ, соединялъ его съ другимъ, такимъ же сосудомъ, въ которомъ было сдѣлано возможно большее разрѣженіе. Упругость газа уменьшалась, и величина ея опредѣлялась изъ опыта; объемъ вычислялся по объемамъ обоихъ сосудовъ и соединенныхъ съ ними полостей. Оба наблюдателя пришли къ заключенію, что газы въ разрѣженномъ состояніи почти вполнѣ повинуются закону Бойль-Маріотта или, что все равно, произведеніе  $pv$ , гдѣ  $p$  означаетъ упругость, а  $v$  — удѣльный объемъ, есть величина постоянная; отступленія весьма мало превышаютъ погрѣшности наблюденій и показываютъ, что  $pv$ , съ увеличеніемъ

<sup>1)</sup> Annales de chimie et de physique, 5—me serie, t. VIII, p. 270 et t. XXVIII, p. 480.

<sup>2)</sup> Pogg. Annalen der Physik und Chemie, Band CLI, S. 451 und 573.

давления, уменьшается. Къ тому же заключенію пришелъ Реньо <sup>1)</sup>, впрочемъ, на основаніи теоретическихъ соображеній. Проф. Менделѣвъ доказалъ, что наблюденія Амага и Зельштрема не точны, преимущественно по причинѣ значительныхъ погрѣшностей въ измѣреніи объемовъ, и еще ранѣе этихъ наблюдателей началъ свои изысканія по новой методѣ <sup>2)</sup>. Лйцевидный сосудъ наполняютъ ртутью и вводятъ сверху небольшое количество совершенно высушеннаго газа; уменьшеніе упругости и увеличиваніе объема газа производятъ чрезъ выпусканіе ртути изъ нижней части сосуда. Упругость газа измѣрялась бароманометромъ, а объемъ вычисляли по вѣсу выпущенной ртути. Не говоря уже о крайне внимательномъ отношеніи къ дѣлу, должно прежде всего замѣтить, что вѣсовые измѣренія несравненно точнѣе объемныхъ, и потому наблюденія проф. Менделѣва стоятъ выше всѣхъ предшествовавшихъ наблюденій, и выводы его заслуживаютъ полнаго довѣрія. Какъ общеизвѣстно, онъ нашелъ, что произведеніе  $pV$ , для нѣкотораго давленія, свойственнаго каждому газу, постоянно при небольшомъ измѣненіи  $p$ —увеличеніи или уменьшеніи; при большомъ измѣненіи  $p$ , въ ту или другую сторону,  $pV$  уменьшается.

Никто изъ ученыхъ, занимавшихся повѣрккой закона Бойль-Мариотта, не принималъ во вниманіе того обстоятельства, что твердыя тѣла, въ данномъ случаѣ стѣнки оболочекъ, сгущаютъ на своей поверхности газы. Значить, наблюдатель испытывалъ только тотъ газъ, который находился въ свободномъ состояніи; газъ же, прилипшій къ стѣнкамъ сосуда, ускользалъ отъ наблюденія. Многіе ученые старались опредѣлить количество газа, поглощаемаго стѣнками стеклянныхъ оболочекъ, и законы поглощенія. Наиболѣе замѣчательны работы Кайзера <sup>3)</sup> и Бунзена <sup>4)</sup>. Оба наблюдателя, подобно ихъ предшественникамъ, чтобы сдѣлать поглощеніе болѣе замѣтнымъ, старались увеличить поверхность оболочекъ въ отношеніи ихъ объемовъ. Съ этою цѣлью, приготовлялись весьма тонкія стеклянныя нити, которыми наполняли стеклянную трубку. Въ опытахъ Бунзена толщина нитей была менѣе 0,02 мм, такъ что 150 gr. такой нити имѣли 62 географическихъ мили длины и представляли 23 квадр. метра поверхности. Испытуемый газъ (именно  $CO_2$ ) заключался въ пространствѣ между

<sup>1)</sup> Relation, t. I.

<sup>2)</sup> Объ упругости газовъ.

<sup>3)</sup> Wiedem. Annalen, Band. XIV, S. 450.

<sup>4)</sup> Wiedem. Annalen, Band XX, S. 545 und B. XXIV, S. 321.

нитями и занималъ, слѣдовательно, весьма малый объемъ въ сравненіи съ поглощающей поверхностью. Одинъ изъ выводовъ Бунзена имѣетъ важное значеніе: чистая и совершенно сухая стеклянная поверхность не поглощаетъ углекислаго газа; но если она влажна, то обладаетъ значительною поглощательною способностью. Отдѣлить всю воду отъ поверхности стекла можно только при весьма высокой температурѣ; при обыкновенныхъ же условіяхъ стекло всегда болѣе или менѣе влажно и потому можетъ сгущать на своей поверхности углекислый и другіе газы. Хотя Кайзеръ <sup>1)</sup> опровергаетъ нѣкоторые выводы Бунзена, тѣмъ не менѣе не остается ни малѣйшаго сомнѣнія въ поглощательной способности стѣнокъ стеклянныхъ оболочекъ. По опытамъ Боттомлея <sup>2)</sup>, произведеннымъ въ этомъ году, 1448 кв. сантим. поглощаютъ 0,45 куб. сантиметра изъ газовой смѣси кислорода, азота и угольнаго ангидрида при 760 мм. давленія и 15° (С).

Къ сожалѣнію, эти изслѣдованія не даютъ возможности исправить величину  $p_v$  для слабыхъ давленій, потому что неизвѣстно, какъ зависитъ количество поглощеннаго газа отъ его упругости. Принимая во вниманіе то обстоятельство, что газы отдѣляются отъ поверхности твердыхъ тѣлъ весьма трудно, даже при очень слабыхъ давленіяхъ, слѣдуетъ допустить, что поглощательная способность не пропорціональна давленію и съ уменьшеніемъ послѣдняго, уменьшается не столь быстро. Иначе сказать, отношеніе количества газа, удерживаемаго стѣнками оболочки, къ количеству всего газа въ оболочкѣ, съ уменьшеніемъ давленія, возрастаетъ. Такимъ образомъ, чѣмъ меньше  $p$ , тѣмъ болѣе погрѣшность въ опредѣленіи  $p_v$ . Пропстекающая отсюда неточность усложняется еще тѣмъ обстоятельствомъ, что, при существующихъ пріемахъ изслѣдованія, измѣняя объемъ газа, мы должны измѣнять величину поглощающей поверхности.

Въ моей работѣ, опубликованной въ журналѣ Р. Ф. Х. Общ. <sup>3)</sup>, я пытался опредѣлить измѣненіе  $p_v$  съ уменьшеніемъ давленія въ случаѣ крайне разрѣженнаго воздуха, независимо отъ способности стѣнокъ оболочки поглощать газы. Оказалось, что, съ уменьшеніемъ давленія,  $p_v$  быстро убываетъ, гораздо быстрее, чѣмъ это выходитъ изъ изслѣдованій пр. Менделѣева <sup>4)</sup>. Хотя я не считаю

<sup>1)</sup> Wid. Ann., В. XXI, S. 495.

<sup>2)</sup> Bottomley, Beiblätter, В. IX, S. 378.

<sup>3)</sup> Томъ XIV, стр. 395.

<sup>4)</sup> Объ упругости газовъ, стр. 234.

полученныя мною числа достаточно точными, однако же нахожу не безынтереснымъ ихъ здѣсь сопоставить, относя къ одинаковымъ давленіямъ.

Давленія въ миллиметрахъ . . . . .	10	5	2	1
Давныя пр. Менделѣева . . . . .	96	90	85	82
Мои числа. . . . .	96	77	46	21

Я не выдаю мои числа за истинныя, но тѣмъ не менѣе не сомнѣваюсь, что если бы можно было поправить числа пр. Менделѣева, принимая во вниманіе количество воздуха, выдѣляемое стѣнками ийцевиднаго сосуда, при опусканіи въ немъ ртути, то они убывали бы быстрѣе и приближались бы къ моимъ числамъ.

Причина недостаточной точности моей работы заключалась въ томъ, что разность высотъ двухъ станцій была весьма мала, именно 27 мм.; надлежало бы имѣть высоту не менѣе 300 мм. Повтореніе опытовъ при такихъ условіяхъ потребуетъ большихъ расходовъ, но разъ это будетъ сдѣлано, вопросъ о зависимости между упругостью и плотностью газовъ будетъ вполне рѣшенъ; вмѣстѣ съ тѣмъ, опредѣлятся коэффициенты расширенія, независимо отъ поглощенія газовъ стѣнками оболочекъ, какъ это мною объяснено въ упомянутой выше статьѣ. Не имѣя средствъ повторить эти опыты, я рѣшился сдѣлать новую попытку для рѣшенія того же вопроса, основываясь на другомъ началѣ.

2. Лапласъ далъ слѣдующую зависимость скорости *u* звука отъ упругости *p* газа, плотности его *d* и отношенія *k* двухъ теплоемкостей при постоянномъ давленіи и постоянномъ объемѣ:

$$u = \sqrt{k \frac{pg}{d}}, \dots \dots \dots (1)$$

гдѣ *g* представляетъ ускореніе тяжести.

Опыты и теоретическія соображенія приводятъ къ заключенію, что если газъ повинуется закону Бойль-Мариотта, то *k* есть величина постоянная; количество *pv*, а значить и  $\frac{p}{d}$ , не измѣняются съ давленіемъ. Слѣдовательно, скорость звука для такого газа, если формула Лапласа вѣрно представляетъ явленіе, не должна зависѣть, при одной и той же температурѣ, отъ упругости газа. Поэтому, обратно, если бы изъ опытовъ оказалось, что скорость звука, въ нѣкоторомъ газѣ, съ измѣненіемъ давленія, измѣняется, то необходимо было бы допустить, что либо *k*, либо *pv*, либо *k* и *pv* не постоянны; каждое изъ этихъ предположеній приводитъ

къ заключенію, что такой газъ закону Бойль-Мариотта не слѣдуетъ. Такимъ образомъ, для рѣшенія вопроса, примѣняется ли упомянутый законъ къ воздуху, достаточно опредѣлить скорость звука въ воздухѣ при разныхъ давленіяхъ. Это и составило предметъ моей настоящей работы. Въ засѣданіи Физ. Общества 16 мая 1884 г. я сдѣлалъ предварительное сообщеніе <sup>1)</sup> объ опытахъ надъ трубкою 16 мм. въ діаметрѣ; теперь работу мою считаю оконченною и могу дать подробный отчетъ. Но нахожу необходимымъ предпослать краткій историческій очеркъ изслѣдованій, теоретическихъ и экспериментальныхъ, предпринятыхъ для измѣренія скорости звука въ воздухѣ и другихъ газахъ.

3. Первые теоретическія изысканія принадлежатъ Ньютону; онъ далъ формулу

$$u = \sqrt{\frac{pg}{d}}, \dots \dots \dots (2)$$

отличающуюся отъ формулы (1) множителемъ  $k$ . Для сухого воздуха, при температурѣ таянія льда, эта формула даетъ 280,0 метр. Въ дѣйствительности, скорость звука болѣе. Несогласіе съ опытомъ Ньютонъ объяснялъ тѣмъ, что скорость 280,0 относится къ пространству, раздѣляющему частицы воздуха, чрезъ которыя звукъ передается мгновенно; это дало ему возможность вычислить отношеніе діаметровъ частицъ къ разстоянію между ними. Предположеніе Ньютона принять нельзя, потому что тогда, при сжатіи воздуха, скорость звука должна была бы увеличиваться, что, однакоже, противорѣчитъ его собственной формулѣ; опытъ также показываетъ, что, при измѣненіи упругости воздуха отъ  $0^m,247$  до  $1^m,267$ , скорость звука не измѣняется <sup>2)</sup>. Истинная причина несогласія происходитъ оттого, что при выводѣ формулы (2) не принято во вниманіе измѣненіе температуры. Въ сгущенной части волны должна выдѣляться теплота, которая, не успѣвая передаваться сосѣднимъ частицамъ, возвышаетъ температуру сгущенной массы воздуха и, такимъ образомъ, увеличиваетъ ея упругость, не измѣняя плотности. Совершенно обратное явленіе происходитъ въ разрѣженной части волны: здѣсь теплота исчезаетъ и употребляется на работу. Отъ этого, температура понижается, и упругость уменьшается, безъ измѣненія плотности. Общій очевидный результатъ—увеличеніе скорости звука.

<sup>1)</sup> Ж. Р. Ф. Общ., т. XVI, стр. 307.

<sup>2)</sup> Regnault, Relation, t. III, p. 173.



Наиболѣе близкою къ истинѣ, при условіяхъ, которыя ниже будутъ изложены, слѣдуетъ считать формулу (1) Лапласа. Весьма простой выводъ ея, основанный на механической теоріи тепла, предложенъ Шредеромъ-ванъ-деръ-Колькъ <sup>1)</sup>. Выводъ Реньо <sup>2)</sup>, основанный на формулѣ Пуассона, мало отличается отъ предыдущаго. Многочисленные споры, подымавшіеся по поводу скорости звука, преимущественно касались формулы Лапласа. Одни ее находили неточною, другіе вовсе отвергали; кромѣ того, были предложены и новыя формулы.

Тиндаль полагалъ <sup>3)</sup>, что формула Лапласа годится только для воздуха и простыхъ газовъ; для газовъ обладающихъ большимъ лучеиспусканіемъ, она—велика. Но Стоксъ <sup>4)</sup> доказалъ, что вліяніе лучеиспусканія столь ничтожно, что его не нужно принимать во вниманіе. Поттеръ <sup>5)</sup> утверждалъ, что вліянія тепла, въ сгущенной и разрѣженной частяхъ волны, на скорость звука должны быть, будто бы, противоположны, и, поэтому, поправка Лапласа не имѣетъ смысла; исходя изъ теоретическихъ началъ, тотъ же ученый вывелъ новую формулу для скорости звука; Стоксъ, Реньинъ, Шаллисъ <sup>6)</sup>, Браве <sup>7)</sup> и другіе доказали неосновательность воззрѣній Поттера и несогласіе его формулы съ опытомъ. Такъ, по Браве, скорость при 0° была бы 342,88 метр., что весьма далеко отъ дѣйствительности. Earnshaw <sup>8)</sup> полагаетъ, что уравненіе

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \mu \frac{d^2y}{dx^2},$$

коимъ выражаютъ періодическія колебанія частицъ газа, и совмѣстная съ нимъ формула Лапласа не точны; вмѣсто его, слѣдуетъ брать уравненіе

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \frac{d^2y}{dt^2} = \mu \frac{d^2y}{dx^2},$$

котораго интегралъ неизвѣстенъ.

<sup>1)</sup> Pogg. Ann., B. CXXIV, s. 45 .

<sup>2)</sup> Relation, p. 10.

<sup>3)</sup> Fortschr. der Phys., B. XIX.

<sup>4)</sup> Тамъ же, B. VI и VII.

<sup>5)</sup> Тамъ же.

<sup>6)</sup> Тамъ же.

<sup>7)</sup> Pogg. Ann., B. LXXXIX, s. 95.

<sup>8)</sup> Fortschr., B. XIV, s. 163.

Позднѣе <sup>1)</sup>, тотъ же ученый вывелъ новую формулу, весьма простую

$$u = \frac{\sqrt{15}}{\pi} \sqrt{\frac{pg}{d}},$$

по несогласную съ опытомъ.

Дюгамель <sup>2)</sup> предложилъ новыя теоретическія соображенія относительно скорости звука, но невѣрность ихъ была доказана Клаузіусомъ и Сенъ-Венаномъ <sup>3)</sup>.

Въ послѣднее время, Вейраухъ <sup>4)</sup> далъ формулу, пригодную для всякаго вещества:

$$u = \sqrt{-gv^2 \cdot \frac{\delta p}{\delta v}},$$

гдѣ  $v$ —удѣльный объемъ,  $\delta p$  и  $\delta v$ —соотвѣтственные приращенія давленія и объема. Въ случаѣ совершеннаго газа, при адиабатическомъ его измѣненіи,  $p$  и  $v$  должны удовлетворять формулѣ Пуассона:

$$p v^{\frac{c}{\gamma}} = \text{постоянной величины},$$

гдѣ  $c$  есть теплоемкость при постоянномъ объемѣ, а  $C$ —теплоемкость при постоянномъ давленіи. Дифференцированіе предыдущаго уравненія доставляетъ

$$\frac{\delta p}{\delta v} = -\frac{C}{c} \cdot \frac{p}{v};$$

тогда формула Вейрауха обращается въ Лапласову.

Наконецъ, Себертъ и Гюгоніотъ <sup>5)</sup> вывели формулу

$$u = \frac{p}{\delta v} \left[ \left( 1 - \frac{v}{u} \right)^{-k} - 1 \right],$$

гдѣ  $v$  есть скорость дрожанія частицъ воздуха, а  $d$ —плотность воздуха. Если пренебречь квадратомъ количества  $\frac{v}{u}$ , то придемъ къ формулѣ Лапласа. Авторы полагаютъ, что ихъ формула пригодна какъ для слабыхъ, такъ и для сильныхъ звуковъ.

Множество теоретическихъ работъ, о которыхъ невозможно дать отчетъ въ этомъ враткомъ очеркѣ, и особенно труды Стокса,

<sup>1)</sup> Тамъ же, В. XVII.

<sup>2)</sup> Comptes rendus, t. 55.

<sup>3)</sup> Тамъ-же.

<sup>4)</sup> Wiedem. Ann., В. XXIII, S 148.

<sup>5)</sup> Comp. rendus, t. XCVIII, p. 507.

Гельмгольца <sup>1)</sup>, Римана <sup>2)</sup>, Тумлирца <sup>3)</sup> и другихъ, въ значительной мѣрѣ разъяснили дѣло и, по крайней мѣрѣ, указали слабыя стороны математической теоріи. Вообще, скорость звука зависитъ отъ весьма многихъ причинъ и, между прочимъ, отъ силы его, но такую зависимость должно считать неизвѣстной. Несомнѣнно, однако-же, что сильныя звуки должны распространяться скорѣе слабыхъ, что сгущенныя части волнъ идутъ скорѣе разрѣженныхъ, такъ что первыя нагоняютъ вторыя, и явленіе становится весьма сложнымъ. Поэтому, одна взрывная (одиночная) волна должна распространяться иначе, чѣмъ рядъ слѣдующихъ одна за другою волнъ. Чѣмъ меньше амплитуда колебанія частицъ газа, тѣмъ менѣе разность въ скоростяхъ распространенія сгущенной и разрѣженной частей волны. При весьма малой амплитудѣ, эта разность обращается въ нуль. Иначе сказать: по мѣрѣ ослабленія силы звука, скорость его уменьшается и стремится къ нѣкоторому предѣльному значенію, выражаемому формулою Лапласа. Такимъ образомъ, непримѣнимая вообще, формула Лапласа выражаетъ весьма близко скорость звука въ свободномъ воздухѣ или достаточно широкой трубѣ, если газъ вполне повинуется закону Бойль-Мариотта, и если размахи колеблющихся частицъ газа весьма малы, и значитъ, звуки весьма слабы. Она однаково пригодна, какъ для пѣлаго ряда волнъ, такъ и для одиночной (взрывной) волны слабого напряженія, потому что сужденія, употребляемыя для ея вывода, примѣнимы въ равной степени въ обоихъ случаяхъ.

При всѣхъ прямыхъ опредѣленіяхъ скорости звука, возбуждалась одиночная волна, которая дѣйствовала на ухо или другіе чувствительныя къ звуку снаряды только своею сгущенною частію; слѣдующія затѣмъ волны меньшаго напряженія не могли оказывать вліяніе на распространеніе головной волны.

4. Опредѣленіе скорости звука въ газахъ было предметомъ многихъ и обширныхъ работъ. Не вдаваясь въ подробности, я опишу здѣсь кратко употреблявшіяся методы и наиболѣе благонадежныя наблюденія. Самая простая по идеѣ и естественная метода заключается въ опредѣленіи скорости звука въ неопредѣленной (свободной) массѣ воздуха. На открытой мѣстности избираются два возвышенные пункта, разстояніе между которыми извѣстно. На одномъ изъ нихъ, или на обоихъ, стрѣляютъ изъ пушекъ и замѣ-

<sup>1)</sup> Wiissenschaftliche Abhandlungen, B. I.

<sup>2)</sup> Fortschr. der Phys., B. XV, стр. 124.

<sup>3)</sup> Sitz. ber. der Wien. Ak., B. LXXXII, H. III.

чаютъ время, протекающее между появленіемъ свѣта и тѣмъ моментомъ, когда наблюдатель слышитъ звукъ. Этому способу, къ сожалѣнію, свойственны многочисленныя погрѣшности; рассмотримъ вліяніе ихъ на выводы.

Назовемъ разстояніе между пунктами наблюденія чрезъ  $s$ , скорость звука— $u$  и время, употребленное звукомъ, чтобы пробѣжать пространство  $s$ , чрезъ  $t$ .

Будемъ имѣть

$$u = \frac{s}{t}$$

Пусть въ измѣреніи разстоянія сдѣлана погрѣшность  $\Delta s$ , а въ измѣреніи времени— $\Delta t$ ; онѣ дадутъ въ скорости погрѣшность  $\Delta u$ .

Очевидно

$$\Delta u = \frac{s + \Delta s}{t + \Delta t} - \frac{s}{t};$$

отсюда, откидывая малыя величины второго порядка, получимъ:

$$\frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta s}{s} - \frac{\Delta t}{t}, \dots \dots \dots (3)$$

т. е. относительная погрѣшность въ скорости, или отношеніе абсолютной погрѣшности въ скорости къ скорости, равна суммѣ или разности подобныхъ величинъ для пространства и времени. Если допустить, что относительная погрѣшность въ скорости  $\frac{\Delta u}{u} < 0,001$  удовлетворяетъ научнымъ требованіямъ, то относительныя погрѣшности въ пространствѣ и времени, т. е.  $\frac{\Delta s}{s}$  и  $\frac{\Delta t}{t}$ , должны быть еще менѣе. Но такъ какъ въ измѣреніи разстоянія нельзя допустить ошибки болѣе 1 метра, то даже при 1000 метр. относительная погрѣшность  $\frac{\Delta s}{s}$  будетъ менѣе 0,001; обыкновенно же пользовались разстояніями около 20 километровъ, нѣсколько болѣе или менѣе. Поэтому, величину  $\frac{\Delta s}{s}$  можно пренебречь и принять равенство

$$\frac{\Delta u}{u} = - \frac{\Delta t}{t}$$

Такимъ образомъ, если  $\frac{\Delta u}{u}$  должно быть менѣе 0,001, то и  $\frac{\Delta t}{t} < 0,001$ .

Въ измѣреніи времени, при употребленіи хорошаго хронометра, руководясь только зрѣніемъ и слухомъ, безъ всякаго иного вспомогательнаго средства, нельзя наблюдать точнѣе полусекунды. Правда, искусныя астрономы отсчитываютъ время, безъ всякихъ

вспомогательныхъ средствъ, до 0,1 секунды, наприм., при прохожденіи звѣзды чрезъ нить трубы, но астрономъ все время видитъ звѣзду и ея постепенное приближеніе къ нити, между тѣмъ какъ звуковой и свѣтовой сигналы застаютъ наблюдателя врасплохъ. Итакъ, считая погрѣшность въ опредѣленіи каждаго момента въ  $\frac{1}{2}$  сек., будемъ имѣть вообще возможную погрѣшность 1 сек. Чтобы относительная погрѣшность была менѣе 0,001,—все измѣряемое время должно быть не менѣе 1000 секундъ. Принимая скорость звука равною 330 метрамъ, найдемъ для разстоянія между пунктами наблюденія *330 километровъ!* Пользуясь секундомѣрами, въ которыхъ стрѣлку можно остановить или пустить въ ходъ давленіемъ на пружину, или такими, въ которыхъ стрѣлка ставитъ знакъ краской на циферблатѣ (*à pointage*), въ моментъ давленія на пружину,—все-таки нельзя идти далѣе 0,1 сек. въ опредѣленіи каждаго сигнала, а для обоихъ—свѣтового и звуковаго—далѣе 0,2 сек. Принявъ это число, найдемъ все еще огромное, невозможное для опыта разстояніе: 66 километровъ.

Обыкновенно разстояніе не достигало 23 километровъ, а время—70 секундъ. Руководясь формулой (3) и отбрасывая членъ  $\frac{\Delta s}{s}$ , получимъ:

$$\frac{\Delta u}{u} = \frac{0,2}{70} = 0,003,$$

такъ что нельзя поручиться за 1 метръ въ опредѣленіи скорости изъ одного наблюденія. При погрѣшности въ 1 секунду, найдемъ

$$\frac{\Delta u}{u} = \frac{1}{70},$$

т. е. можно ожидать погрѣшность въ 5 метровъ.

Эти погрѣшности должны возрасти еще вслѣдствіе того, что въ моментъ возникновенія звука бывають два свѣтовые сигнала: зажиганіе пороха и выстрѣлъ.

Погрѣшности уменьшаются, если моменты возникновенія звука и прибытіе его на другую станцію записываются автоматически приспособленными для этого хронографами.

Таковы погрѣшности отдѣльныхъ наблюденій; средняя арифметическая величина изъ многихъ наблюденій будетъ въ извѣстной степени отъ нихъ избавлена.

5. По причинѣ большихъ разстояній, приходится пользоваться весьма сильными звуками; сильные же звуки распространяются скорѣе слабыхъ. Я не разумю здѣсь преувеличеннаго значенія

скорости, какъ думалъ, напр.. Монтиньи <sup>1)</sup>, который приписывалъ грому скорость 2600 м. въ секунду; выстрѣлы артиллерійскихъ орудій сильнѣе громовыхъ ударовъ, но никто и никогда не находилъ для первыхъ такой чрезмѣрной скорости. Разность между скоростями слабыхъ и сильныхъ звуковъ, вѣроятно, не превосходитъ 30%.

Весьма важно также вліяніе пороховыхъ газовъ, которые, въ моментъ выстрѣла, вылетаютъ въ огромномъ количествѣ, изъ орудія и на значительномъ разстояніи увеличиваютъ скорость звука, дѣйствуя на подобіе попутнаго вѣтра.

Многіе наблюдатели сознавали эти ошибки, но никто не принималъ мѣръ къ ихъ устраненію. Между тѣмъ сдѣлать это легко. Надо избрать три станціи *A*, *B* и *C*, расположенныя на одной прямой линіи. Выстрѣлы слѣдуетъ производить на одной изъ крайнихъ станцій, напр. *A*. Времена прибытія звука на ближайшую станцію *B* и отдаленную *C* замѣчаются наблюдателями или, еще лучше, записываются автоматическими снарядами. Если станція *B* находится въ достаточномъ удаленіи отъ *A*, то звукъ ослабѣетъ и вліяніе пороховыхъ газовъ уничтожится.

6. Такой способъ опредѣленія скорости звука требуетъ совершенно спокойнаго состоянія атмосферы и однообразія температуры и влажности на всемъ протяженіи между станціями *B* и *C*, чего, однакоже, никогда не бываетъ, чуть только разстояніе значительно, а станціи лежатъ высоко надъ мѣстностью, и особенно, если одна выше другой.

Если вѣтеръ дуетъ равномерно по направленію распространенія звука, то скорость послѣдняго увеличивается на скорость вѣтра; при обратномъ направленіи, скорость уменьшается на ту же величину. Чтобы избѣжать этой погрѣшности, надо взять четвертую станцію *D*, еще болѣе удаленную, чѣмъ *C*, такъ чтобы всѣ 4 станціи лежали все-таки на одной прямой линіи. Выстрѣлы слѣдуетъ производить съ двухъ крайнихъ станцій *A* и *D*, а прибытіе звуковъ—наблюдать на станціяхъ *B* и *C*. Средняя арифметическая величина изъ двухъ найденныхъ такимъ образомъ скоростей выразитъ скорость звука при спокойномъ состояніи атмосферы. Если вѣтеръ дуетъ не равномерно, а порывами, какъ это обыкновенно бываетъ, то вліяніе его въ средней арифметической не будетъ уничтожено. Полагаютъ, что тогда слѣдуетъ стрѣлать съ двухъ

---

<sup>1)</sup> Cosmos XVI.

станцій въ одиѣ моментъ, а не поочередно, какъ поступали нѣкоторые наблюдатели. Такая предосторожность была бы полезна, если бы вѣтеръ прогрессивно усиливался или ослабѣвалъ, но при порывистомъ его движеніи погрѣшность, очевидно, не устраняется. Если направленіе вѣтра не совпадаетъ съ направленіемъ звука и притомъ измѣняется, то поправка становится еще болѣе затруднительною; тогда звукъ доходитъ отъ одной станціи до другой по кривой линіи, и въ средней арифметической вліяніе вѣтра не уничтожается. Реньо <sup>1)</sup> и Шредеръ-ванъ-деръ-Колькъ <sup>2)</sup> дали поправки, зависящія отъ направленія и силы вѣтра, но онѣ, очевидно, недостаточны, потому-что предполагаютъ силу и направленіе вѣтра постоянными, чего никогда не бываетъ не только на двухъ, но даже на одной станціи.

7. Такъ или иначе, найденную скорость относятъ къ сухому воздуху при 0°. Поэтому, надо знать температуру. Она бываетъ, обыкновенно, разная на обѣихъ станціяхъ; берутъ среднюю арифметическую и предполагаютъ, что такая температура воздуха на всемъ протяженіи между станціями.

Найденную при температурѣ  $t$  скорость дѣлятъ на  $\sqrt{1 + \alpha t}$ , гдѣ  $\alpha$  — коэффициентъ расширенія воздуха. Прежніе наблюдатели принимали  $\alpha$ , по Ге-Люссаку, равнымъ 0,00375; послѣдующіе воспользовались, коэффициентомъ Реньо 0,00366 и сдѣлали это, на мой взглядъ, неудачно, потому что они измѣряли скорость не въ сухомъ, а влажномъ воздухѣ, котораго коэффициентъ расширенія болѣе и достигается, по Рудбергу, 0,00390; значить, вычисленная такимъ образомъ скорость звука при 0° выходила болѣе надлежащей. Если температура наблюденія 20°, то погрѣшность могла достигать 0,8 метра.

Чтобы перейти отъ влажнаго воздуха къ сухому, надо умножить скорость, отнесенную къ 0°, на  $1 - \frac{3}{16} \cdot \frac{f}{H}$ . гдѣ  $f$  — упругость водяного пара и  $H$  — высота барометра во время наблюденія <sup>3)</sup>.

Обѣ поправки—на температуру и влажность—нельзя считать удовлетворительными, потому-что, строго говоря, онѣ относятся къ пунктамъ наблюденія; температура же и влажность въ промежуточныхъ точкахъ остаются неизвѣстными. Кроме того, по при-

<sup>1)</sup> Relation t. 3, p. 480.

<sup>2)</sup> Pogg. Ann., B. CXXIV, S. 453.

<sup>3)</sup> Relation, t III, p. 86, et 492.

чинѣ разной температуры, давленія и влажности, плотность воздуха на пути звука различна; вслѣдствіе этого, звукъ претерпѣваетъ преломленіе и отстываетъ отъ прямолинейнаго направленія.

8. Мнѣ кажется, что скорость звука должна зависѣть еще отъ степени прозрачности атмосферы; взвѣшенные въ воздухѣ частицы пыли, микроскопическіе организмы, составляя одно цѣлое съ воздухомъ, участвуютъ въ дрожаніи его частицъ; увеличивая, такимъ образомъ, плотность воздуха, онѣ уменьшаютъ скорость звука.

Взвѣшенные мелкія капли воды могутъ произвести двоякое дѣйствіе. Въ своей недавно опубликованной работѣ, Бейме <sup>1)</sup> доказалъ, что если звуковая волна распространяется чрезъ водяной паръ въ состояніи насыщенія, то въ сгущенной части волны паръ перегрѣвается. Такое явленіе должно происходить и въ воздухѣ, содержащемъ насыщенные водяные пары. Если же, кромѣ того, въ воздухѣ плаваютъ капли воды, то въ сгущенной части волны водяныя капли могутъ обратиться въ пары, такъ что при той же средней плотности (воздуха, пара и воды) упругость сгущенной части волны увеличится. Въ разрѣженной части волны, водяной паръ перейдетъ частію въ жидкое состояніе, и упругость этой части волны, при той же плотности, уменьшится. Слѣдовательно, скорость звука увеличится. Если воды въ видѣ капель очень много (густой туманъ), то паръ можетъ и не перегрѣться. Тогда капли воды, подобно твердымъ частицамъ, будутъ уменьшать скорость звука. Трудно вычислить, по недостатку данныхъ, какое количество воды надо примѣшать къ воздуху, чтобы получить наибольшее увеличеніе скорости звука, но несомнѣнно, что такое увеличеніе возможно.

Такимъ образомъ, точное опредѣленіе скорости звука въ свободномъ воздухѣ весьма затруднительно, потому что при этомъ является множество погрѣшностей, которыя ни устранишь, ни вычислить съ точностію невозможно; однѣ изъ нихъ увеличиваютъ скорость звука, другія уменьшаютъ, — и даже неизвѣстно, какое ихъ окончательное вліяніе—увеличеніе или уменьшеніе.

9. Первые наблюденія надъ скоростью звука въ воздухѣ принадлежатъ Мерзену и Гассенди <sup>2)</sup>. Опыты потомъ были повторены Бойлемъ, Біанкони, Фламстедомъ и Галлеемъ. Совершенное несогласіе выводовъ заставило французскую академію въ 1738 г. пред-

---

<sup>1)</sup> Weibl., V. IX, S. 503.

<sup>2)</sup> Ann. de ch. et de phys., 3-me S., t. LXXIII, p. 5. Bravais et Martins.



принять тѣ же опыты. По ея порученію, Лакаль, Маральди и Кассини произвели испытанія въ окрестностяхъ Парижа. Стрѣляли изъ пушекъ навстрѣчу, съ двухъ пунктовъ, отстоявшихъ другъ отъ друга на 22914 метровъ; на тѣхъ же пунктахъ находились наблюдатели. Выстрѣлы были несовременные, но съ промежутками въ 35 минутъ; влажность не наблюдалась; время опредѣлялось ударами секундныхъ маятниковъ. Леру <sup>1)</sup>, принявъ гадательно вѣроятную влажность и коэффициентъ 0,00366, нашелъ, что скорость, при 0°, 332 метр. Такъ какъ въ счетѣ времени ошибка могла быть 1 сек., то, по формулѣ (3), въ скорости нельзя поручиться за 5 м.

Годъ спустя, Лакаль и Кассини повторили опыты; точность ихъ не болѣе предыдущихъ. Затѣмъ, слѣдуютъ опыты Кондамина въ Квито (1740 г.) и въ Каэннѣ (1744 г.). Кестнеръ, употреблявшій часы съ терціями и останавливаемой стрѣлкою, Мюллеръ (1791 г.) и Еспиноза и Вауза (1794 г.) мало улучшили приемы для опредѣленія скорости звука. Болѣе тщательны наблюденія Бенцевберга (1809 и 1811 гг.), но выстрѣлы были только въ одномъ направленіи. Скорость, по вычисленію Леру, отнесенная къ 0° и сухому воздуху, 333,02 м. Такъ какъ разстояніе было не велико и не исключено вліяніе вѣтра, то можно подозрѣвать большую погрѣшность.

Гольдингамъ въ Мадрасѣ (1820 и 1821 г.г.) сдѣлалъ болѣе 800 выстрѣловъ. Хотя разстояніе было не велико, время пробѣга звука не болѣе 26 сек. и выстрѣлы производились въ одномъ направленіи, но ихъ было много, для опытовъ выбиралось спокойное состояніе атмосферы и потому заслуживаютъ вниманія. Средняя величина скорости изъ всѣхъ наблюденій, по Леру, 331,1 метр.

По порученію Bureau des Longitudes, Пронц, Буваръ, Араго, Матье, Ге-Люссакъ и Гумбольдтъ произвели (1822 г.) опыты въ окрестностяхъ Парижа. Разстояніе между станціями было 18613 м. Время измѣрялось 5-ю хронометрами съ останавливаемыми стрѣлками. Выстрѣлы—встрѣчные и очередные, чрезъ каждые 5 минутъ. Наблюдалась влажность. Скорость звука, по Леру, 330,644 м. Погрѣшность въ измѣреніи времени не менѣе 0,2 сек., а слѣдов. въ скорости—2,5 м.

Наблюденія Молля и Ванъ-Бука, произведенныя въ окрестностяхъ Амстердама, должно считать болѣе совершенными. Вы-

---

<sup>1)</sup> Ann. de ch. et de ph., 4. S., t. XII, p. 345.

стрѣлы были встрѣчные и современные; хронометры съ останавливающимися стрѣлками; наблюдались термометръ, барометръ, гигрометръ и флюгеръ. Разстояніе между станціями 17669<sup>м</sup>, 5. Скорость, по Браве и Мартену <sup>1)</sup>, 332<sup>м</sup>, 25. Шредеръ-Ванъ-деръ-Колькъ <sup>2)</sup>, принявъ во вниманіе боковое дѣйствіе вѣтра, получилъ 332,77.

Опыты Грегори въ Вульвичѣ (1824) менѣе точны: разстояніе мало, выстрѣлы не современные.

Всѣ предыдущія наблюденія произведены на одномъ горизонтѣ.

Штампферъ и Мирбахъ (1822) опредѣляли скорость звука при разности высотъ между станціями въ 1364 м, на разстояніи 9940 м. Выстрѣлы встрѣчные, но не современные. Влажность не наблюдалась. Скорость звука, при коэффициентѣ 0,00306, 332,96. Леру, взявъ влажность, по Кемцу, для соответственнаго мѣсяца, нашель 332,44.

Браве и Мартенъ <sup>3)</sup> избрали для наблюденій вершину Фольгорна и деревню Трахтъ на Бріенцкомъ озерѣ. Разность высотъ 2079 м., разстояніе 9650<sup>м</sup>, 7. Время отсчитывалось пишущими секундомѣрами (à pointage), свѣренными съ хронометромъ. Влажность опредѣлялась по психрометру. Выстрѣлы встрѣчные и современные. Скорость звука оказалась 332,37. Наблюдатели полагаютъ, что ошибка во времени не болѣе 0,1 сек. Принявъ эту величину для обоихъ сигналовъ, найдемъ погрѣшность въ скорости звука для одного наблюденія не менѣе 2 метр.

Наблюденія Реньо <sup>4)</sup> отличаются отъ предыдущихъ преимущественно тѣмъ, что время записывалось автоматическими снарядами.

Закопченная полоса бумаги приводится въ движеніе помощію часового механизма. Ея постоянно касаются три стили и оставляютъ на ней три слѣда. Одинъ стиль соединенъ съ одной изъ вѣтвей камертона, совершающаго 50 двойныхъ дрожаній въ секунду. Такимъ образомъ, стиль описываетъ на закопченной бумагѣ бѣлую кривую линію въ видѣ зигзага. Дрожаніе камертона поддерживается двумя электромагнитами; замыканіе и размыканіе дѣли производится ртутнымъ прерывателемъ, дрожащимъ въ униссонъ съ камертономъ.—Другой стиль, соединенный съ якоремъ особаго электромагнита, чертитъ на бумагѣ прямую линію. Въ гальвани-

<sup>1)</sup> Ann. de ch. et de phys., 3 S, t. XXIII.

<sup>2)</sup> Pogg. Ann., B. CXXIV, S. 453.

<sup>3)</sup> Ann. de ch. et de phys., 3 S., t. XXIII., p. 5.

<sup>4)</sup> Relation, t. III.

ческую цѣпь этого электромагнита введенъ секундный или полу-секундный маятникъ. При каждомъ ударѣ маятника, цѣпь замыкается или размыкается, стиль передвигается въ ту или другую сторону, описывая, такимъ образомъ, параллельныя между собою прямыя линіи, соединенныя малыми кривыми линіями. Изъ сравненія лнвій, описанныхъ обоими стилями, можно опредѣлить, сколько дрожаній въ секунду совершаетъ камертонъ.—Третій стиль управляется также электромагнитомъ, включеннымъ въ общую гальваническую цѣпь съ каучуковой перепонкой, натянутой на рамку. Когда звукъ прибываетъ къ перепонкѣ, то гальваническая цѣпь замыкается или размыкается. Во всякомъ случаѣ, стиль пишетъ рядъ прямыхъ лнвій, соединенныхъ малыми кривыми линіями, коихъ длина зависитъ отъ времени, на которое цѣпь замыкается или размыкается. Моментъ возникновенія звука возвѣщается прекращеніемъ гальваническаго тока. Для этого, предъ дуломъ орудія натягивали проволоку, введенную въ гальваническую цѣпь; проволока разрывалась пнжомъ. Тогда наблюдатель, помощію коммутатора, вводилъ въ цѣпь перепонку для принятія звука. Разстояніе между двумя послѣдовательными кривыми линіями измѣрялось зигзагами лнвій, описанной камертономъ.

Пространство между орудіемъ и перепонкой пробѣгалось звукомъ, приблизительно, въ 8 секундъ, точнѣе 373 двойн. дрожаній камертона. Такъ какъ часть кривой лнвій, изображающей двойное дрожаніе камертона занимала 4 mm, а такую длину легко раздѣлить на 10 частей, то можно было-бы принять, что время отсчитывалось съ точностью до  $\frac{1}{3730} = 0,0003$ . Въ другомъ мѣстѣ будетъ показано, что перепонка представляетъ нѣкоторое опаздываніе относительно сигналовъ, и погрѣшность могла достигать 0,6 времени дрожанія или, приблизительно, 0,012 секунды. Слѣдов., точность въ отсчитываемомъ времени не превосходила 0,0015, что могло въ скорость ввести погрѣшность  $0,^m 5$ . Что касается разстоянія между орудіемъ и чувствительной перепонкой, 2500 метровъ, то оно было измѣрено весьма тщательно и не могло ввести въ скорость погрѣшности болѣе 0,1 метра. Выстрѣлы были встрѣчные и почти современные, съ промежутками въ 23 сек.

Чтобы исключить вліяніе вѣтра, Реньо ввелъ поправку, но ее нельзя считать достаточною, потому что она выведена въ предположеніи, что вѣтеръ имѣетъ постоянную силу и направленіе. Этимъ, между прочимъ, объясняется, почему отдѣльныя наблюде-

нія значительно между собою разнятся, иногда болѣе, чѣмъ на 1 метръ. Несовершенство поправки признаеть и Реньо.

Температура и влажность опредѣлялись на обѣихъ станціяхъ и брались среднія ариметическія; хотя это не вполне точно, но протекающая отсюда погрѣшность была не велика.

Самая большая неправильность происходитъ оттого, что звукъ вблизи орудія весьма силенъ, и, слѣдовательно, найденная Реньо скорость 330,9 м. слишкомъ велика. Кромѣ того, она болѣе истинной еще потому, что пороховые газы сообщали воздуху поступательное движеніе по направленію распространенія звука. Реньо старался опредѣлить величину послѣдней погрѣшности, располагая чувствительныя перепонки *C* и *D*<sup>1)</sup> на линіи, перпендикулярной къ распространенію звука, и еще перепонку *F* сзади пушки. Изъ опытовъ надо заключить, что такое вліяніе, повидимому, есть. Но боковыя перепонки *C* и *D* стояли близко отъ орудія (312,5 м. и 740,5 м.), а съ перепонкой *F* мало сдѣлано опытовъ.

Отсюда, поэтому, нельзя дѣлать никакихъ выводовъ. И дѣйствительно, таблица на стран. 517 представляетъ непонятное явленіе: на разстояніи 2422,8 м. (отъ *E* до *A*) получилась скорость звука 331,88 м., а на разстояніи 3829,3 м. (отъ *E* чрезъ *A* до *F*)—332,06, т. е. болѣе. Къ тому же выстрѣлы между *E* и *F* не были взаимныя. Реньо также не дѣлаетъ рѣшительныхъ выводовъ по этому поводу и среднюю скорость вычислилъ только изъ встрѣчныхъ выстрѣловъ между *E* и *A*.

Сравнивая числа, найденныя разными наблюдателями для скорости звука въ свободномъ воздухѣ, мы видимъ большія разности. Число Реньо принадлежитъ къ наименьшимъ. Мнѣ кажется и эта скорость слишкомъ большою, потому что изъ нея не исключено вліянія пороховыхъ газовъ и того обстоятельства, что вблизи орудія скорость звука весьма велика. Я указалъ выше, что для уничтоженія этихъ погрѣшностей, надо брать не двѣ, но 4 станціи. Кромѣ этихъ крупныхъ погрѣшностей, остается еще много мелкихъ, трудно устранимыхъ, какъ наприм. вліяніе вѣтра, когда измѣняются его сила и направленіе, неопредѣленность въ измѣреніи температуры и влажности; и друг. Эти погрѣшности могутъ сгладиться увеличеніемъ числа наблюденій, но только отчасти.

Такимъ образомъ, точное опредѣленіе скорости звука въ свободномъ воздухѣ, даже до 0,001 ея величины, врядъ ли возможно.

<sup>1)</sup> Relation, t. III, Planche 1, fig. 6.

Какъ это обстоятельство, такъ и экспериментальныя трудности на открытомъ воздухѣ, заставили наблюдателей обратиться къ опредѣленію скорости звука въ болѣе или менѣе широкихъ трубахъ, а также къ другимъ непрямымъ способамъ.

10. Первые, заслуживающія вниманія, наблюденія надъ скоростью звука въ трубахъ принадлежатъ Леру <sup>1)</sup>. Цинковая труба 70 мм. въ діаметрѣ, согнутая почти на половинѣ ея длины, погружена въ горизонтальномъ положеніи въ резервуаръ съ водою (за исключеніемъ ея концовъ), для сохраненія температуры одинаковою и постоянною по всей длинѣ трубы. Открытые концы трубы замкнуты перепонками, влюченными въ гальваническую цѣпь, содержащую также одну изъ проволокъ индуктивной спирали. Хронографомъ служитъ падающая вертикально линейка, обремененная снизу грузомъ. Звукъ возбуждается ударомъ деревяннаго молотка по перепонкѣ. При этомъ гальваническая цѣпь замыкается. Волна двигается сначала по одному колѣну трубы, потомъ по другому и, достигнувъ второй перепонки, снова замыкаетъ гальваническую цѣпь. При каждомъ замыканіи цѣпи, индуктируется въ индуктивной спирали мгновенный токъ, который даетъ электрическую искру между металлическимъ остриемъ и падающею линейкой; искра оставляетъ на линейкѣ знакъ въ видѣ точки. На основаніи законовъ свободно падающаго тѣла, Леру разчислилъ время между появленіями двухъ электрическихъ искръ. По мнѣнію автора, погрѣшность въ измѣреніи времени не превышала 0,0002 всего измѣреннаго промежутка времени. Въ длинѣ трубы можно подозревать ошибку, именно въ согнутой ея части, потому что нельзя рѣшить съ увѣренностью, какъ распространяется звукъ—по оси ли трубы, или инымъ путемъ. Разсужденія Леру по этому поводу нельзя считать точными. Вообще, длину пути звука онъ опредѣляетъ въ 72,03606 м. Скорость оказалась 330,6 м., причемъ погрѣшность, по его мнѣнію, не болѣе 0,2 м. Въ послѣднемъ позволительно усумниться. Отдѣльныя наблюденія различаются болѣе, чѣмъ на одинъ метръ, не говоря уже о постоянной ошибкѣ, входящей въ исчисленіе пути звука въ кривой части трубы. Между выводами Леру, отмѣтимъ слѣдующій: отъ напряженности волны скорость звука не зависитъ. Когда ударный молотокъ управлялся 2-мя пружинами, то волна пробѣгала всю длину трубы въ 0,21792 сек.; при 4-хъ пружинахъ—въ 0,21798 сек. <sup>2)</sup>; разность лежитъ въ

<sup>1)</sup> Ann. de ch. et de phys., 4 S., t. XII, p. 345.

<sup>2)</sup> Тамъ же, стран. 391.

предѣлахъ погрѣшностей. Этотъ опытъ заслуживаетъ полнаго довѣрія, потому что погрѣшности, свойственныя методѣ Леру, были одинаковы въ обоихъ случаяхъ. Нельзя однако же согласиться съ такимъ общимъ выводомъ; правильнѣе было бы сказать, что если звукъ слабъ, то измѣненіе силы его въ нѣкоторыхъ предѣлахъ не сопровождается измѣненіемъ скорости.

Работа Леру замѣчательна въ томъ отношеніи, что всѣ наблюденія (числомъ 77) произведены при температурѣ 0° и, значитъ, не было надобности въ температурной поправкѣ. Кромѣ того, сколько мнѣ извѣстно, Леру первый примѣнилъ перепонки, введенныя въ гальваническую цѣпь, къ опредѣленію скорости звука.

Классическая работа Реньо <sup>1)</sup> надъ газопроводными, водопроводными и водосточными трубами 0,1м, 0,2м, 0,3м и 1,1м въ диаметръ, пользуется всеобщю извѣстностью. Общая идея метода Реньо, приблизительно, та же, что и при опредѣленіи скорости въ свободномъ воздухѣ. Возникновеніе звука и прибытіе его въ другую точку записываются автоматически. Воспринимаются звуки перепонками, на которыхъ посредникъ укрѣпляется по платиновой пластинкѣ, соединенной тонкой серебряной проволокой съ однимъ изъ электродовъ гальванической батареи. Противъ пластинки устанавливается въ небольшомъ разстояніи металлическое тупое остріе, соединенное съ другимъ электродомъ. Если звуковая волна ударяетъ въ перепонку, то пластинка приходитъ въ прикосновеніе съ остріемъ, и цѣпь замыкается. Иногда устройство измѣнялось, именно при впусканіи въ трубку сгущеннаго воздуха; вмѣсто перепонки, ставили гибкую металлическую пластинку, которая, подъ вліяніемъ струи воздуха, отгибалась и приходила въ прикосновеніе съ металлическою частью, и гальваническая цѣпь замыкалась. Иногда прибытіе звука сопровождалось размыканіемъ цѣпи. Для этого, противъ платиновой пластинки, укрѣпленной на перепонкѣ, привѣшивали металлическій шарикъ на проволоку; при ударѣ въ перепонку, шарикъ отскакиваетъ, и цѣпь размыкается.

Возбуждали звукъ преимущественно пистолетнымъ выстрѣломъ. Одно отверстіе испытуемой трубы задѣлывали крышкою, часть которой въ срединѣ была вырѣзана и задвигалась заслонкой. Черезъ круглое отверстіе въ заслонкѣ вставляли герметически, помощію пробки, пистолеть, дуломъ во внутрь пробки. Послѣ выстрѣла, заслонку быстро принимали и замѣняли перепонкой, введенной,

<sup>1)</sup> Relation, t. III.

при помощи одного изъ упомянутыхъ способовъ, въ гальваническую цѣпь.

Звукъ, между тѣмъ, пробѣгалъ по трубѣ до другого конца, гдѣ дѣйствовалъ на вторую чувствительную перепонку, отражался назадъ, производилъ ударъ на первую перепонку, замѣнившую пистолеть, снова отражался, дѣйствовалъ опять на вторую перепонку, и т. д. Иногда, одинъ конецъ трубки задѣлывали металлическимъ листомъ, и тогда дѣйствовала только одна перепонка, а задвижка служила только отражающей поверхностью.

Каждый ударъ въ перепонку отмѣчался на законченной бумагѣ. Начало звука, или выстрѣлъ, сопровождалось размыканіемъ цѣпи, вслѣдствіе разрыва проволоки, введенной въ цѣпь и поставленной предъ дуломъ пистолета:

Ударные капсулы дали звуки недостаточно сильныя, и потому опытовъ съ ними было мало. Взрывъ гремучаго газа также оказался неудобнымъ. Волна возбуждалась еще впусканіемъ въ трубу сгущеннаго воздуха: 1) чрезъ вталкиваніе поршня въ насосъ, соединенный съ трубою, 2) поворачиваніемъ крана на  $180^\circ$  въ трубкѣ, соединяющей испытуемую трубу съ резервуаромъ, содержащимъ сгущенный воздухъ и 3) помощію ударнаго поршня, вдвигаемаго въ насосъ сильными пружинами.

Разсмотримъ, какой можно ожидать точности въ выводахъ Реньо.

Знаменитый ученый полагаетъ, что въ измѣреніи длины, ошибка не превышала 0,7 м. на 5000 м. Позволю себѣ въ этомъ усумниться. Трубы непосредственно почти никогда не измѣрялись, потому что лежали въ землѣ зарытыя или въ галлереяхъ. Измѣренія производились или по поверхности земли, или по полу подземныхъ галлерей. Кромѣ того, трубы имѣли болѣе или менѣе значительную кривизну по горизонтальному или вертикальному направленіямъ. Нѣтъ, однакоже, ни теоретическихъ, ни опытныхъ данныхъ, на основаніи которыхъ можно было бы съ увѣренностью рѣшить, что въ этомъ случаѣ надо разумѣть подъ длиною трубы; Реньо считаетъ длину по оси. Простекающая отсюда погрѣшность зависитъ отъ длины и вида трубы; при одинаковыхъ условіяхъ, влияние этой погрѣшности на выводы тѣмъ менѣе, чѣмъ длиннѣе труба. Но всѣ прямыя трубы были коротки, всѣ длинныя имѣли болѣе или менѣе значительную кривизну. Труба 0,3 м. въ діаметрѣ (route militaire) имѣла 1905 м. длины, но была крива въ двухъ мѣстахъ. Труба 1,1 м. (Syphon de Villemonble) имѣла еще большую длину, именно 4886,45 м., но была такъ изогнута, что опыты

производились только надъ частями ея, наименѣе кривыми.—При многократныхъ отраженіяхъ, путь, пройденный звукомъ, увеличивается, но вліяніе этой неточности на выводъ не измѣняется, потому что и погрѣшность повторяется столько разъ, сколько произошло отраженій. Вычислить предѣлы погрѣшностей, однакоже, невозможно, но, несомнѣнно, ошибка болѣе предполагаемой Реньо, т. е. 0,7 м. на 5000 м. или 0,14 м. на 1000 м.

Разрываніе проволоки прыжкомъ и движеніе пишущаго стила не могутъ произойти въ одно и то же мгновеніе точно такъ же, какъ ударъ въ перепонку и движеніе второго стила. Реньо пытался опредѣлить погрѣшность и нашель, что она заключается между 0,1 и 0,6 дрожанія камертона и достигала, слѣдов., 0,012 секунд. Если время рассчитывали между ударами волны въ одну и ту же перепонку, то погрѣшность могла компенсироваться, по крайней мѣрѣ, отчасти, но при ударѣ въ разныя перепонки рассчитывать на это нельзя, тѣмъ болѣе, что испытанію подвергалась только перепонка малыхъ размѣровъ. Большія же перепонки, иначе натянутыя, дали бы, конечно, другія числа. Кромѣ того, послѣдовательныя отраженія волны даже отъ одной и той же перепонки должны сопровождаться разными запаздываніями, потому что волна, частію вслѣдствіе отраженій, частію отъ дѣйствія стѣнокъ трубы, мало по малу ослабѣваетъ <sup>1)</sup>). Невозможно даже приблизительно судить о величинѣ этой погрѣшности, безъ новыхъ пысканій, но все таки нельзя поручиться за  $\frac{1}{2}$  одного дрожанія или 0,01 секунды.

Чтобы опредѣлить скорость звука, Реньо раздѣлялъ весь пробѣгъ волны, послѣ нѣсколькихъ отраженій, на протекшее время. Но такъ какъ вначалѣ звукъ весьма силенъ, то и скорость его тогда самая большая и постепенно уменьшается до предѣльной своей величины; слѣдовательно, частное отъ дѣленія есть среднее значеніе скорости и болѣе ея истинной величины, или той величины, къ которой относится формула Лалласа. Въ среднюю величину входятъ еще вліяніе, и, вѣроятно, весьма значительное, пороховыхъ газовъ. Реньо сознаетъ эти погрѣшности и обозначаетъ среднюю скорость чрезъ  $V$ , а скорость каждаго пробѣга звука, между двумя послѣдовательными отраженіями, чрезъ  $W$ . Наибольшій научный интересъ имѣетъ  $W$  только для послѣднихъ пробѣговъ, когда скорость звука дѣлается постоянной. Но тогда путь, пройденный волною, малъ, и погрѣшности становятся значительными. Кромѣ того, чтобы ослабить погрѣшность, происходящую

<sup>1)</sup> Тамъ же, стр. 81.



отъ неодинаковой<sup>1</sup> чувствительности перепонокъ, слѣдуетъ брать два пробѣга волны между двумя послѣдовательными отраженіями отъ одной и той же перепонки. Выписываю здѣсь именно такія величины  $W_0$  для послѣднихъ пробѣговъ въ трубкахъ Syphon de Villemonble и l'égout Sébastopol 1,1 m. въ діаметрѣ. Верхняя строка представляетъ величины  $W_0$ , а нижняя—страницы, съ которыхъ онѣ заимствованы:

331,07	330,80	331,48	331,57	329,28	328,4	329,07	327,48
234	242	247	250	252	259	273	273

Разности, какъ видимъ, весьма значительны. Вѣроятно, поэтому, Реньо не вездѣ даетъ величины  $W_0$  и не выводитъ изъ нихъ въ окончательныхъ результатахъ средней арифметической. На страницѣ 454 приведены скорости  $W_0$  для трубы l'égout Saint-Michel, болѣе согласныя, и для которыхъ Реньо вывелъ среднюю арифметическую, именно 330,09 m, но не считаетъ ее истинною величиною скорости и даетъ предпочтеніе средней 330,7.

Такимъ образомъ скорость 330,7 m, найденная Реньо для трубы 1,1 m, а также скорости для трубъ другихъ діаметровъ, суть только среднія скорости и болѣе дѣйствительныхъ, которыя относятся къ равномерному движенію звука.

Были и другія обстоятельства, увеличившія скорость звука.

Для приведенія къ 0°, Реньо пользовался коэффициентомъ 0,00366, между тѣмъ какъ слѣдовало брать коэфф., свойственный влажному воздуху. Это замѣчаніе не относится къ трубѣ 0,1 m въ Collége de France, потому что тамъ испытывался воздухъ осушенный.

Погрѣшность могла произойти еще оттого, что воздухъ трубъ былъ вполнѣ насыщенъ парами (8). Нельзя вычислить величину этой погрѣшности, но она несомнѣнно была, въ чемъ я убѣдился непосредственнымъ опытомъ (34).

Среднія скорости, выведенныя Реньо, относятся къ пистолетному выстрѣлу. Скорости волнъ, возбужденныхъ впусканіемъ въ трубку сгущеннаго воздуха, не были приняты въ расчетъ при общихъ выводахъ, на томъ, вѣроятно, основаніи, что онѣ казались Реньо слишкомъ малыми. Авторъ объясняетъ это слабостью волнъ. Но тогда, именно, эти наименьшія скорости и слѣдовало считать нормальными, ибо чѣмъ слабѣ звуки, тѣмъ точнѣе примѣняется къ нимъ формула Лапласа. Это объясненіе, какъ справедливо заключаетъ Ринкъ<sup>1)</sup>, не согласно съ другими опытами

<sup>1)</sup> Pogg. Ann., B. CXLIX, S. 533.

Реньо, ибо звуки, произведенные разными количествами пороха, распространяются почти съ одинаковою скоростью.

Здѣсь есть, по моему мнѣнію, другая причина, вліяніе которой въ точности опредѣлить трудно. Если волна подошла къ перепонкѣ, то давленіе на послѣднюю возрастаетъ мало по малу, хотя и въ теченіе весьма короткаго промежутка времени, и какъ бы перепонка ни была чувствительна, она придетъ въ движеніе и замкнетъ или разомкнетъ гальваническую цѣль не тотчасъ по прибытіи волны, а когда давленіе достигнетъ нѣкоторой величины. Волна крутая, въ которой давленія измѣняются быстро, скорѣе приведетъ въ движеніе перепонку, чѣмъ волна отлогая. Струя сгущеннаго воздуха возбуждаетъ именно волну отлогую или, можетъ быть, рядъ короткихъ волнъ, которыхъ напряженіе постепенно возрастаетъ; передніи волны такъ слабы, что не производятъ никакого дѣйствія на перепонку. Такъ, вѣроятно, и было при вталкиваніи воздуха поршнемъ, помощію руки или сильныхъ пружинъ. Быстрое поворачиваніе крана для впуска сгущеннаго воздуха удовлетворительнѣе, потому что волна возникаетъ сразу. Для этого, однакоже, необходимо, чтобы отверстіе въ кранѣ было узкое (у Реньо широкое) и чтобы впускалось весьма малое, и всегда одно и то-же, количество сгущеннаго воздуха. Приписывая уменьшеніе скорости слабости волнъ, Реньо старался доказать это помощію опыта, вталкивая поршень съ болѣе сильнымъ усиліемъ или подымая ударный поршень на болѣе высокую высоту, и нашелъ болѣе скорости; но такое увеличеніе есть кажущееся явленіе и объясняется меньшею покатостью волны (если она одна) или тѣмъ, что сила передовыхъ волнъ болѣе; если прежде была дѣйствительна 4-ая волна, то теперь, можетъ быть, будетъ 3-я, но скорость ихъ движенія могла остаться прежнею—и притомъ равною скоростямъ волнъ, возбужденныхъ пистолетнымъ выстрѣломъ, испытавшихъ нѣсколько отраженій и уже ослабленныхъ.

Изъ всего вышесказаннаго выходитъ, что скорости, найденныя Реньо для трубъ, нѣсколько велики, потому что: 1) поправка на температуру болѣе надлежащей, 2) взяты въ расчетъ первые пробѣги, когда сила звука велика, а при первомъ пробѣгѣ дѣйствовали еще по направленію звука пороховые газы, и 3) воздухъ былъ насыщенъ парамъ, и одной поправки на измѣненіе плотности воздуха недостаточно.

Къ трубѣ 0, 1 m въ Collége de France замѣчанія первое и послѣднее не относятся, но тамъ и скорости получились относительно меньше; по причинѣ малой длины трубы (70, 5 m) и вслѣдствіе

того значительныхъ погрѣшностей, опыты съ этой трубой не были приняты во вниманіе при общихъ выводахъ.

Въ новѣйшее время Тумлиръцъ <sup>1)</sup> опредѣлилъ скорость звука въ трубахъ 24 mm въ діаметрѣ и 24, 9 m и 42 m длины, наполненныхъ сухимъ воздухомъ; трубы были на половинѣ длины согнуты. Концы каждой трубы были обращены къ цилиндру, покрытому законченной бумагой и приводимому во вращательное движеніе рукояткой,—и сообщались съ двумя коробками Мареев <sup>2)</sup>, которыхъ стили касались законченной бумаги. У одного изъ концовъ было сдѣлано отверстіе, затянутое перепонкой. По этой перепонкѣ производили ударъ, отъ котораго приходили въ движеніе стили коробокъ Мареев: сначала ближайшій и потомъ отдаленный. Въ то же время, по той же бумагѣ, камертонъ, при помощи стила, чертилъ линію въ видѣ зигзага, служившую для измѣренія времени. Пока не произошелъ ударъ, стили коробокъ Мареев писали двѣ прямыя параллельныя линіи. Послѣ удара, стили—сперва ближайшій, потомъ отдаленный—отступали отъ прямолинейнаго направленія и начинали писать волнообразныя линіи, представлявшія измѣненія давленій въ волнѣ. Измѣривъ, посредствомъ зигзаговъ линіи камертона, разстояніе между точками, гдѣ прямыя линіи переходятъ въ кривыя, опредѣляли время, употребленное звукомъ, чтобы пробѣжать всю длину трубы. Тумлиръцъ нашелъ, что скорость звука въ сухомъ воздухѣ при 0° въ трубѣ 24, 9 m длины 330, 817 m, а въ трубѣ 42 m—330, 575 m. Результаты, какъ видимъ, весьма близки между собою и къ скоростямъ, найденнымъ Реньо для свободного воздуха и въ широкихъ трубахъ, но также, вѣроятно, болѣе истинныхъ. Я здѣсь не могу сдѣлать возраженій, приведенныхъ выше относительно изслѣдованій Реньо; замѣчу только, что слѣдовало-бы, вмѣсто коэффициента 0,00366, взять 0,00368. Зато въ этой работѣ велики возможныя погрѣшности, Такъ, авторъ ничего не говоритъ, какъ онъ вводилъ въ вычисленіе длину кривой части трубы и какую точку перепонки, лежавшей параллельно длинѣ трубы, онъ принималъ за начало. Поэтому, длина могла содержать погрѣшность до 0, 05 m. Въ исчисленіи времени погрѣшность еще болѣе. Сужу по собственному опыту, какъ трудно опредѣлить точку, въ которой прямая линія переходитъ въ кривую, потому что это дѣлается не сразу, а постепенно.

<sup>1)</sup> Sitz. ber. der Wiener Akad., B. LXXX, Heft III.

<sup>2)</sup> La méthode graphique, p. 138.

Точность этого опредѣленія невозможна далѣе 0,005 секунды. Отсюда выходитъ весьма грубая погрѣшность 13 метровъ.

Такимъ образомъ работа Тумлирца ничего новаго къ работѣ Реньо не прибавила.

11. Одинъ изъ непрямыхъ способовъ опредѣленія скорости звука въ газахъ состоитъ въ измѣреніи длины звучащей трубы и высоты ея тона. По длинѣ трубы находятъ  $\lambda$  длину волны тона, издаваемого трубою; если число дрожаній назовемъ чрезъ  $N$ , то скорость звука будетъ  $\lambda.N$ . Таковы изысканія Вертгейма <sup>1)</sup>. Но самъ авторъ считаетъ свои наблюденія неточными. Вообще отъ этой методы нельзя ожидать благонадежныхъ выводовъ, потому что ошибка въ измѣреніи длины трубы умножается на  $N$ , число весьма большое. Кромѣ того, нѣкоторую часть трубы у амбушура и самый амбушуръ не слѣдуетъ принимать въ общій расчетъ, а это вводитъ неопредѣленность въ измѣреніе длины трубы. — Позднѣе, Вертгеймъ построилъ новый приборъ <sup>2)</sup> для опредѣленія скорости звука въ газахъ какъ для обыкновеннаго, такъ и для слабыхъ давленій. Здѣсь нѣтъ амбушура. Испытуемая труба введена въ большой резервуаръ; отверстіе ея закрыто пробкой. Если быстро открыть пробку, то получается звукъ, подобный тому, который издаетъ откупориваемая бутылка. Пробка вдавливается пружинами, откупоривается электромагнитами.

Въ повѣйшее время Blaikley <sup>3)</sup> также произвелъ опыты надъ звучащими трубами разныхъ діаметровъ, причемъ вліяніе амбушура, по увѣренію автора, было исключено.

12. Весьма большою извѣстностью пользуется метода Кундта, основанная на одномъ открытомъ имъ явленіи <sup>4)</sup>. Если стѣнки стеклянной трубки обсыпать мелкимъ порошкомъ, наприм. измельченнымъ пескомъ, и привести ее въ продольныя дрожанія, то порошокъ собирается на узловыхъ линіяхъ. При извѣстныхъ условіяхъ, которыя неумѣстно было-бы здѣсь излагать, пыльные фигуры зависятъ не отъ стекла, но отъ наполняющаго трубку газа и лежатъ на узловыхъ плоскостяхъ газоваго столба. Онѣ даютъ, такимъ образомъ, возможность измѣрить длину волны. Кундтъ воспользовался этимъ явленіемъ для сравненія скоростей звука въ разныхъ газахъ, въ трубкахъ разныхъ діаметровъ, при разныхъ темпера-

<sup>1)</sup> Ann. de ch. et de phys., 3-me S. t. XXIII.

<sup>2)</sup> Ann. de ch. et de phys., 3-me S. t. XXXI, p. 432.

<sup>3)</sup> Beiblätter, B. VIII, S. 287 und B. IX, S. 501.

<sup>4)</sup> Pogg. Ann., B. CXXVII und CXXVIII.

турахъ, разныхъ давленіяхъ и другихъ разнообразныхъ условіяхъ <sup>1)</sup>. Абсолютная величина скоростей не была опредѣлена, потому что высота тоновъ въ точности не измѣрялась, и была произвольно принята какъ для свободнаго воздуха, такъ и для трубы 26 мм въ діаметрѣ, равною 332, 8 м. Работа Кундта въ настоящее время потеряла свое значеніе, потому что позднѣе были сдѣланы болѣе надежныя наблюденія. Тѣмъ не менѣе, слѣдующіе его выводы и теперь остаются неизмѣнными: съ уменьшеніемъ діаметра трубы, скорость звука уменьшается; въ узкихъ трубахъ низкіе тоны идутъ медленнѣе высокыхъ; отъ напряженности звука скорость его не зависитъ. Такъ какъ звука въ опытахъ Кундта были вообще слабы, то послѣдній законъ надо понимать такъ: при небольшомъ измѣненіи напряженности звука, скорость его не мѣняется.

Исслѣдованія Кундта имѣютъ также отношеніе къ теоретическимъ изысканіямъ о скорости звука въ трубахъ.

13. Волна, двигающаяся вдоль трубы, испытываетъ треніе со стороны стѣнокъ, отчего скорость звука должна уменьшаться. Кромѣ того, теплота, возбужденная въ сгущенной части волны, передается стѣнкамъ трубы; обратно, потеря тепла въ разреженной части волны вознаграждается притокомъ теплоты отъ стѣнокъ. Слѣдов., коэфф.  $k$  въ формулѣ Лалласа слишкомъ великъ; это составляетъ вторую причину уменьшенія скорости звука въ трубахъ, сравнительно съ свободнымъ воздухомъ. Принимая это во вниманіе, а также внутреннее треніе въ газахъ, Кирхгофъ <sup>2)</sup>, исходя изъ теоретическихъ основаній, вывелъ помощію весьма сложнаго, но неточнаго, анализа, формулу:

$$U = u \left( 1 + \frac{\gamma}{2r\sqrt{\pi \cdot n}} \right),$$

гдѣ  $U$  есть скорость звука въ свободномъ воздухѣ,  $u$  — скорость звука въ трубѣ, коей радіусъ равенъ  $r$ ,  $n$  — число дрожаній,  $\gamma$  — постоянный коэффиціентъ, опредѣляемый изъ опыта. Эта формула можетъ быть разложена на два закона: разность между скоростями звука въ свободномъ воздухѣ и въ трубѣ обратно пропорціональна 1) діаметру трубы и 2) корню квадратному изъ числа колебаній въ секунду. — Справедливость требуетъ прибавить, что та же формула дана была ранѣе Гельмгольцемъ; только коэфф.  $\gamma$  имѣлъ иное значеніе <sup>3)</sup>.

<sup>1)</sup> Pogg. Ann., B. CXXXV, S. 337 und 527.

<sup>2)</sup> Pogg. Ann., CXXXIV, s. 177.

<sup>3)</sup> Wissenschaftliche Abhandlungen, S. 385.

14. Несогласіе формулы Кирхгофа съ числами Кундта вызвало новыя работы Шнеебели <sup>1)</sup> и Зеебека <sup>2)</sup>, по другой методѣ, основанной на интерференціи звука. Сущность ея заключается въ слѣдующемъ. Вообразимъ трубку, имѣющую форму буквы Т. У одного пзъ концовъ ея горизонтальной части производятъ звукъ, въ другой конецъ вставляютъ поршень, который можно вдвинуть болѣе или менѣе. Черезъ вторую, боковую трубку, служащую ножкой буквѣ Т, слушаютъ. Звуковыя волны, дойдя до поршня, отражаются назадъ и интерферируютъ съ волнами, идущими имъ навстрѣчу. Передвигая поршень взадъ или впередъ, можно найти такія его положенія, когда звуки черезъ боковую трубку не слышны. Въ эту пору поршень отстоитъ отъ точки, въ которой обѣ трубки спаяны, на  $\frac{1}{4}$  волны,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{5}{4}$ , и вообще на нечетное число четвертей волны. Отсюда опредѣляется длина волны, соотвѣтствующей произведенному тону. Трубку, содержащую поршень, можно пережѣнять. Такимъ образомъ изслѣдованы были трубки разныхъ діаметровъ, стеклянныя, металлическія и друг. Источниками звука служили камертоны отъ Кёнига разнаго числа колебаній (отъ 256 до 512 въ секунду). Точность измѣренія  $\frac{1}{4}$  волны была не менѣе 1 мм., что могло ввести въ скорость погрѣшность до 2 м. Къ тому же камертоны не были провѣрены. Способы осушенія нельзя признать дѣйствительными. Всѣ числа, найденныя Зеебекомъ, болѣе чиселъ Шнеебели; только стеклянная трубка перваго 29 мм. даетъ меньше скорость (326,36), чѣмъ трубка втораго 21 мм. (326,55), хотя камертоны Зеебека были ниже камертоновъ Шнеебели, и, значить, по 2-му закону Кирхгофа, надлежало получиться обратному явленію.

Отмѣтимъ одну странность въ опытахъ Зеебека: трубка 29 мм. въ діаметрѣ (табл. VI) дала меньше скорость, чѣмъ трубка 17,5 мм. и даже 9 мм. Авторъ объясняетъ это неудовлетворительно, именно тѣмъ, что камертоны были малы сравнительно съ отверстіемъ широкой трубки (29 мм.), въ которой должны были, поэтому, будто бы, возбуждаться вихревыя движенія, что влекло за собою уменьшеніе скорости.

Первый законъ Кирхгофа довольно близко удовлетворяетъ числамъ обоихъ наблюдателей. На основаніи того же закона, комбинируя наблюденія надъ трубками разныхъ діаметровъ, Шнеебели вычислилъ скорость звука въ свободномъ воздухѣ. Получились числа

<sup>1)</sup> Pogg. Ann., B. CXXXVI.

<sup>2)</sup> Pogg. Ann., B. CXXXIX.

довольно близкія; среднее изъ нихъ равно 332,06 м. Такому выводу нельзя давать большого довѣрія, потому что законы Кирхгофа требуютъ еще опытной провѣрки.—Низкіе тоны идутъ медленнѣе высокіхъ, но числа колебаній не удовлетворяютъ 2-му закону Кирхгофа.

Здѣсь встаетъ припомнить опыты Реньо <sup>1)</sup>, изъ которыхъ выходитъ, что низкіе тоны распространяются скорѣе высокіхъ. Онъ считаетъ это явленіе кажущимся и зависящимъ отъ устройства нашего слухового аппарата, потому что барабанная перепонка приходитъ въ созвучіе сначала съ низкими тонами, а потомъ съ высокими. Такое объясненіе, не подкрѣпленное прямыми опытами, нельзя считать основательнымъ. Реньо прибавляетъ, что звукъ, пройдя болѣе или менѣе значительное пространство, принимаетъ иной цвѣтъ (тембръ) и причину этого видитъ въ запаздываніи гармоникъ (обертоновъ), сопровождающихъ основной тонъ. И это объясненіе кажется мнѣ неосновательнымъ и, кромѣ того, не совсѣмъ понятнымъ. Съ одинаковымъ правомъ можно предложить другое объясненіе, по крайней мѣрѣ, понятное. Измѣненія цвѣта звука происходятъ не отъ запаздыванія гармоникъ, а отъ ослабленія ихъ и, можетъ быть, для иныхъ, отъ совершеннаго уничтоженія. Реньо замѣтилъ, что звукъ, распространяющійся по трубѣ, слышенъ бываетъ внѣ трубы; значить, часть живой силы волны проникаетъ чрезъ стѣнки трубы; сверхъ того, нѣкоторая часть живой силы поглощается стѣнками и превращается въ дрожаніе самой трубы и теплоту. Словомъ, звукъ, пройдя трубу, въ большей или меньшей мѣрѣ, долженъ ослабляться, что и въ самомъ дѣлѣ наблюдается. Но какой высоты звуки испытываютъ болѣешую потерю, опыты не показали. По теоретическимъ же изслѣдованіямъ Гельмгольца <sup>2)</sup>, высокіе тоны ослабѣваютъ болѣе низкіхъ. Если это принять за несомнѣнное, то измѣненіе цвѣта звука, при движеніи его по трубѣ, сдѣлается совершенно понятнымъ. На свободномъ воздухѣ, удаляясь возможно болѣе отъ оркестра, исполняющаго нѣкоторую музыкальную пьесу, мы не замѣчаемъ никакого измѣненія мелодіи и никакой неправильности въ музыкальномъ отношеніи, между тѣмъ какъ наше ухо чрезвычайно чувствительно къ послѣдовательности звуковъ. Изъ этого надо заключить, что какъ высокіе, такъ и низкіе тоны распространяются

---

<sup>1)</sup> Relation, t. III, p. 433.

<sup>2)</sup> Wissench. Abhandl., B. I, s. 385.

въ свободномъ воздухѣ съ одинаковою скоростью. По наблюденіямъ Біо, мелодія чрезъ широкія трубы также передается правильно. Слѣдовательно, причину измѣненія тембра звука въ трубахъ можно приписать неодинаковому ослабленію тоновъ разной высоты, а не различію въ ихъ скоростяхъ.

Дабы согласить теоретическія и экспериментальныя изслѣдованія, слѣдуетъ принять, что скорость звука въ свободномъ воздухѣ и въ трубахъ достаточно широкихъ одна и та же для тоновъ всякой высоты. Въ тонкихъ трубкахъ скорость меньше, чѣмъ въ свободномъ воздухѣ, и тѣмъ менѣе, чѣмъ трубка тоньше и тонъ ниже; точная же зависимость неизвѣстна.

15. На интерференціи звука основанъ также способъ Цоха <sup>1)</sup>. Двѣ манометрическія коробки Кёнига утверждаются на органной трубѣ; отъ коробокъ идутъ согнутыя, на подобіе буквы П, двѣ параллельныя между собою трубки; другіе концы тѣхъ же трубокъ оканчиваются въ двухъ такихъ же коробкахъ, мимо которыхъ пускаютъ свѣтильный газъ. Предъ двумя пламенами ставятъ вращающееся зеркало. Если органная труба издаетъ звукъ, то манометрическія коробки возбуждаютъ въ трубкахъ волны; перепонки другихъ коробокъ приходятъ въ созвучныя дрожанія и измѣняютъ видъ пламеней. Если П—образныя трубки имѣютъ равныя длины, то отраженія пламеней представляютъ одинаковый видъ. Одна изъ трубокъ раздвигается, на подобіе тромбона, такъ что длину ея можно увеличить и уменьшить. Если длину мало-по-малу увеличивать, то видъ соответствующаго ей отраженія пламени свѣтильнаго газа измѣняется, между тѣмъ какъ другое отраженіе сохраняетъ свой видъ.

Продолжая выдвигать подвижную часть трубки, можно достигнуть того, что оба пламени снова примутъ одинаковый видъ. Тогда увеличеніе длины трубки должно, быть равно длинѣ звуковой волны. Отсюда, зная еще высоту тона, издаваемого органною трубою, можно вычислить скорость звука.

Изъ самой методы ясно, что она не можетъ дать точныхъ выводовъ, и дѣйствительно, отдѣльныя наблюденія различаются между собою на 5 слишкомъ метровъ. Поэтому, средній выводъ скорости звука 332,05 нельзя считать благонадежнымъ.

16. Боша <sup>2)</sup> придумалъ оригинальную методу, идею которой,

---

<sup>1)</sup> Pogg. Ann., V. XXVIII, s. 497.

<sup>2)</sup> Pogg. Ann., V. XCII.



впрочемъ, Фэ приписываетъ себѣ. Вообразимъ двое часовъ; одни даютъ 60, другіе 59 ударовъ въ секунду. Черезъ каждую минуту, удары совпадаютъ. Можно слѣдить разомъ ухомъ и глазомъ за ударами. Въ моментъ совпаденія ударовъ для уха будутъ совпадать удары для глаза. Станемъ теперь одни часы отодвигать. Тогда видимое и слышимое совпаденія ударовъ будутъ происходить въ разныя мгновенія. Продолжая отодвигать часы, можно достигнуть того, что упомянутыя мгновенія снова совпадутъ. Для этого, очевидно, нужно удалить одни часы на разстояніе, равное скорости звука. Эту методу можно упростить. Представимъ себѣ двое часовъ, управляемыхъ гальваническимъ токомъ и урегулированныхъ такимъ образомъ, что маятники ихъ качаются совершенно согласно, и часы тикаютъ въ одно время. Отнесемъ одни часы на нѣкоторое разстояніе и помѣстимся между обоими часами, на срединѣ соединяющей ихъ прямой линіи; тиканья все-таки будутъ совпадать. Если мы подвинемся въ сторону однихъ часовъ, то удары послѣднихъ окажутся впереди ударовъ другихъ часовъ. Продолжая подвигаться въ ту же сторону, мы придемъ, наконецъ, въ точку, для которой тиканья опять станутъ совпадать. Въ эту пору, разность разстояній отъ уха до обоихъ часовъ пробѣгаетъ звукомъ въ теченіе времени, равнаго времени одного качанія маятника.

Неудобство метода Боша заключается въ томъ, что одни часы придется удалить на слишкомъ большое разстояніе, съ котораго тиканье часовъ и даже болѣе сильные звуки не будутъ слышны. Время колебанія маятника можно уменьшить до  $\frac{1}{3}$  секунды, но и тогда потребуется довольно большое разстояніе.

Кёнигъ <sup>1)</sup> усовершенствовалъ методу Боша. вмѣсто часовъ берутъ 2 камертона съ 10 двойными колебаніями въ секунду и управляемыхъ электромагнитами. Тиканья часовъ замѣняются ударами пружинокъ, прикрѣпленныхъ къ камертонамъ и ударяющихъ въ деревянный ящикъ при каждомъ размыканіи цѣпи и, значитъ, 10 разъ въ секунду; получаютъ короткіе громкіе звуки. Для опытовъ требуется разстояніе только 33—35 метровъ.

Эта остроумная метода не дала однако же точныхъ результатовъ.

---

<sup>1)</sup> Pogg Ann., B. CXVIII, S. 610 und B. CXXII, S. 244; Comptes Rendus, t. LV. p. 603.

Изъ этого краткаго историческаго очерка видно, что на опредѣленіе скорости звука въ воздухѣ и вообще въ газахъ потрачено много труда. Но полученные выводы содержатъ значительныя погрѣшности и потому несогласны между собою. Наибольше точны и, значитъ, ближе къ истинѣ результаты Реньо, но и въ нихъ можно подозревать важныя погрѣшности, вслѣдствіе которыхъ найденныя имъ величины для скорости звука въ воздухѣ и трубахъ нѣсколько велики.

17. Сущность настоящей работы состоитъ въ опредѣленіи сравнительной скорости звука въ воздухѣ, отъ обыкновеннаго до весьма слабыхъ давленій. Въ этомъ отношеніи я не имѣлъ предшественниковъ. Мнѣ извѣстны только три работы, изъ которыхъ, однако же, я не могъ извлечь полезныхъ для себя указаній. Такъ, Вертгеймъ<sup>1)</sup> построилъ снарядъ (описанный выше), который онъ назначалъ для слабыхъ давленій (11). Но съ нимъ невозможно идти далеко, потому что даже при обыкновенномъ давленіи звуки слабы, а при слабыхъ давленіяхъ они вовсе не могутъ быть слышны. Вертгеймъ такихъ опытовъ и не дѣлалъ. Въ сочиненіи Кундта<sup>2)</sup> есть только одно наблюденіе при 76 мм. (стр. 550, табл. XVI, 123 опытъ), но это, кажется, опечатка; слѣдуетъ быть 760 мм. Есть въ той же таблицѣ (опытъ 118) давленіе 380 мм.; разность въ отношеніи скорости звука при атмосферномъ давленіи не превышаетъ погрѣшностей наблюденій. Отсюда Кундтъ заключилъ, что скорость звука въ воздухѣ не зависитъ отъ давленія. Наблюденія Реньо<sup>3)</sup> не идутъ далѣе 247 мм.; онъ пришелъ къ выводу, что въ предѣлахъ 247 и 1267 мм. скорость звука не измѣняется. Протпвъ этого вывода можно поставить на видъ то обстоятельство, что трубы и другіе снаряды не держали давленія, вслѣдствіе втеканія воздуха снаружи. Отъ этого, съ одной стороны, испытуемый воздухъ становится болѣе или менѣе влажнымъ, съ другой—втекающая струя производила неправильности: если она втекала по направленію распространенія звука, то скорость звука увеличивалась, въ противномъ случаѣ—уменьшалась. Впрочемъ, и по моимъ наблюденіямъ (табл. 5), скорость звука, вблизи атмосфернаго давленія, измѣняется весьма мало.

Основанія принятой мною методы изложены въ моемъ предварительномъ сообщеніи<sup>4)</sup>. Волна, возбужденная однимъ изъ ука-

<sup>1)</sup> Ann. de ch. et de phys., 3-me S. t. XXXI, p. 432.

<sup>2)</sup> Pogg. Ann., V. CXXXIV.

<sup>3)</sup> Relation, t. III.

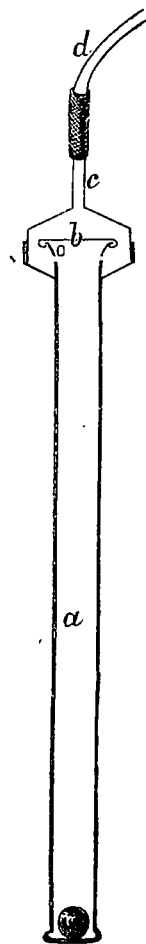
<sup>4)</sup> Ж. Р. Ф.-Х. Об., т. XVI, стр. 307.

занных ниже способовъ, пробѣжавъ нѣкоторое пространство, раздѣляется пополамъ, и части ея бѣгутъ, потомъ, по двумъ отдѣльнымъ трубкамъ—длинной и короткой. Обѣ волны прибываютъ въ снаряды, устроенные на подобіе коробокъ Марен и которые я буду называть воздушными замыкателями. Въ моментъ прихода волнъ, замыкаются двѣ гальваническія цѣпи, въ которыя введены электромагниты; къ якорямъ этихъ послѣднихъ прикрѣпляются легкіе стили. Если цѣпь замкнута, то стили касаются закопченной бумаги, покрывающей цилиндръ и имѣющей вмѣстѣ съ нимъ вращательное движеніе и поступательное въ направленіи оси. Если цѣпь разомкнута, то стили отъ законченной бумаги отходятъ. Какъ только волна вбѣгаетъ въ воздушный замыкатель, то гальваническая цѣпь замыкается, и стиль, придя въ прикосновеніе съ закопченной бумагой, чертитъ на ней бѣлую винтовую линію, въ теченіе всего времени, пока цѣпь остается замкнутой. Если трубки, по которымъ двигаются волны, имѣютъ, при одинаковыхъ діаметрахъ, разныя длины, то волны приходятъ въ воздушные замыкатели и стили начинаютъ писать въ разныя мгновенія, раньше — тотъ, который соотвѣтствуетъ короткой трубкѣ. Для измѣренія времени употребляется камертонъ съ 101,5 двойныхъ дрожаній въ секунду. Съ камертономъ соединенъ гальванически хронографъ Марен, который пишетъ на бумагѣ кривую линію въ видѣ зигзага; 203 зигзага изображаютъ одну секунду. Измѣренное помощію зигзаговъ время равно тому, въ теченіе котораго звукъ пробѣгаетъ разстояніе, равное избытку длины одной трубки предъ другою. Отъ раздѣленія этого разстоянія на время получается скорость звука.

18. Способовъ возбужденія волны было два: удары по перепонкѣ и впусканіе сгущеннаго воздуха. Мѣдвая, закрытая съ одного конца, трубка *a* (фиг. 1), 0,04 м. въ діаметрѣ и 1,12 м. длины, имѣетъ на другомъ концѣ низкую воронку, затянутую каучуковой перепонкой *b*. Воронка съ перепонкой заключены въ другія двѣ металлическія воронки, склеенныя мастикой. Верхняя воронка оканчивается трубкой *c*, которая, помощію каучуковой трубки, соединяется съ гибкой свинцовой трубкой *d*, 3 мм. въ діаметрѣ и въ 1,5 м. длиною. Въ трубку *a* вводится свинцовый шаръ 200 gr. въсу, обшитый лайкой. Если быстро перевернуть весь приборъ, такъ чтобы закрытый конецъ трубки *a* былъ наверху, а воронка съ перепонкой *b*—внизу, то свинцовый шарикъ падаетъ на перепонку *b* и возбуждаетъ волну, которая бѣжитъ въ трубку *c*, потомъ въ трубку *d* и дальше въ испытываемыя снаряды.

Такъ какъ удары производились не только въ обыкновенномъ, но и въ разряженномъ воздухѣ, то пространство *a* нельзя было оставлять запертымъ. Съ этою цѣлю, въ стѣнкахъ внутренней воронки были сдѣланы 2 отверстія *o* около 2 мм. въ диаметръ, чрезъ которыя давленіе уравнивалось, какъ бы оно мало ни было. Отверстія больше 2 мм. замѣтно уменьшали напряженность волны. Чтобы воздушный замыкатель приходилъ въ движеніе тотчасъ же, какъ въ него вступаетъ волна, необходимо дѣйствовать крутыми волнами, и чтобы имъ не предшествовали другія волны слабаго напряженія. Поэтому ударъ по перепонкѣ *b* долженъ быть по возможности короче. Тонкая перепонка даетъ ударъ продолжительный и волну отлогую, а слишкомъ толстая возбуждаетъ волну недостаточно сильную. Перепонка 1 м. толщины оказалась удовлетворительною: волна получается крутая и не предшествуется другими слабыми волнами; позже будетъ указано, какъ въ этомъ можно убѣдиться изъ опыта. По мѣрѣ разряженія воздуха, волны, возбужденныя ударнымъ снарядомъ, ослабѣваютъ и при 60—25 мм. перестаютъ дѣйствовать на замыкатели; при меньшихъ давленіяхъ приходилось пользоваться слѣдующимъ вторымъ способомъ.

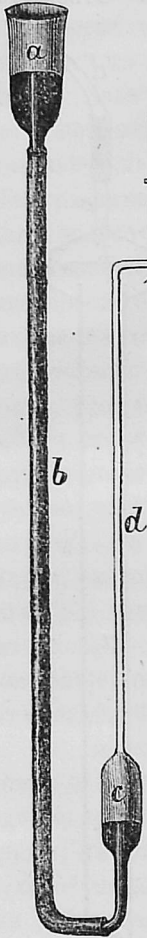
Этотъ способъ состоялъ въ томъ, что въ испытуемую трубу впускалось небольшое количество сгущеннаго воздуха быстрымъ поворачиваніемъ крана. Такъ какъ рукою невозможно сдѣлать такой поворотъ одинаково быстро, то являются неправильности, и отдѣльныя наблюденія оказываются несогласными. Этотъ приемъ, практикованный Реньо<sup>1)</sup>, я принужденъ былъ измѣнить. Воронка *a* (фиг. 2) соединяется, при помощи каучуковой трубки *b*, съ широкой трубкой *c*, которая переходитъ въ тонкую *d* (1 мм.), поставленную вертикально. Последняя соединяется съ горизонтальной трубкой *e*, утвержденной на столѣ. Отъ нея выходитъ также горизонтальная трубка (для удобства чертежа представлена вертикально), содержащая кранъ *k* и направляющаяся къ осушитель-



Фиг. 1.

<sup>1)</sup> Relation, t. III.

ному снаряду съ фосфорнымъ ангидридомъ. На продолженіи трубки *e* имѣются 2 стальные крана *m* и *n*, соединенные между собою каучуковыми и стеклянной трубкой *l*, которая по серединѣ раздута. Воронка *a* и трубки *b* и *c* содержатъ ртуть. Воронку можно



Фиг. 2.

поднять и опустить. Если ее опустить, то ртуть переливается изъ трубки *c* въ воронку и замѣняется воздухомъ, притекающимъ изъ осушительнаго снаряда; въ это время краны *k* и *m* должны быть открыты, а кранъ *n* запертъ. Потомъ кранъ *k* запираютъ. Если теперь поды-  
 мать воронку *a*, то ртуть переливается въ тру-

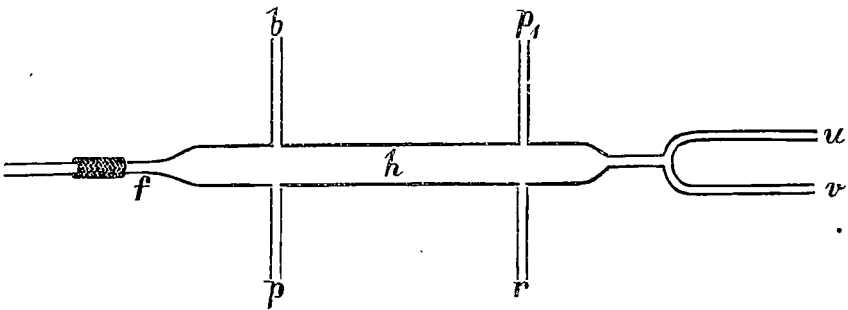
ку *c*, но такъ какъ объемъ послѣдней весьма великъ сравни-

тельно съ объемами прочихъ трубокъ, то ртуть не подымается даже до ея вершины. Затѣмъ, кранъ *m* запираютъ, а кранъ *n* быстро поворачиваютъ на 90°. Определенное количество сгущеннаго воздуха, заключеннаго въ трубку *l*, вылетаетъ чрезъ кранъ *n* и трубку *t* въ испытуемыя трубки и возбуждаетъ въ нихъ волны. Такое приспособленіе давало возможность производить нѣкоторое подобіе пистолетнаго выстрѣла, но сравнительно весьма слабого; при этомъ всегда выбрасывалось одно и тоже количество сгущеннаго воздуха. Употребленные сгущенія были 2 и 2,5 атмосфер. Дальше я идти не могъ, потому что въ точкахъ скрѣпленія трубокъ начиналъ выходить воздухъ. Чтобы воспользоваться большими давленіями, надлежало перестроить снарядъ; впрочемъ, какъ видно будетъ далѣе, я не имѣлъ въ этомъ надобности. Такой способъ возбужденія волны менѣе удовлетворителенъ, чѣмъ при помощи ударнаго снаряда, потому что волны получаютъ отлогія; это объясняется недостаточно быстрымъ поворачиваніемъ крана.

19. Возбужденная тѣмъ или другимъ способомъ, волна прибываетъ въ стеклянную трубку *h* (фиг. 3), которую я буду называть распределителемъ. Эта трубка соединяется трубкой *f* съ ударнымъ снарядомъ, трубкой *r* — съ краномъ, чрезъ который

впускается сгущенный воздухъ, трубками *u* и *v* — съ тѣми снарядами, въ которые направляютъ волны, трубкой *b* — съ бароманометромъ, трубкой *p* — съ поршневой пневматической машиной, трубкой *p*<sub>1</sub> — съ ртутнымъ насосомъ, который, впрочемъ, при этихъ опытахъ, не употреблялся. Волна выходитъ изъ трубки *h* въ трубки *u* и *v*, и такъ какъ послѣднія имѣли одинаковые діаметры, то выходящія изъ нихъ волны были равныхъ напряженій.

20. Фигура 4 изображаетъ одинъ изъ воздушныхъ замыкателей <sup>1)</sup>. Существенная часть его металлическая весьма мелкая чашечка *a*, которой края возвышаются надъ дномъ на 2 мм. Она затянута тонкой каучуковой перепонкой *b*, на серединѣ которой приклеена платиновая пластинка *m*, соединенная тонкой мѣдной



Фиг. 3.

проволокой *r* съ столбикомъ *h*. Чашечка *a* сообщается, посредствомъ трубки *c*, съ одной изъ испытуемыхъ трубъ и отдѣлена отъ окружающаго воздуха стекляннмъ цилиндромъ *n* и толстымъ металлическимъ кружкомъ *k* и квадратной пластинкой *k*<sub>1</sub>; кружокъ *k* и цилиндръ *n* склеены мастикой и составляютъ такимъ образомъ колпакъ, которымъ покрывается коробка *ab*; нижніе края цилиндра смазываются спускомъ изъ параффиноваго масла съ бѣлымъ воскомъ; пластинка *k*<sub>1</sub> утверждается на столикѣ, въ которомъ сдѣланъ прорѣзъ для пропуска трубокъ *c* и *d*. На кружкѣ *k* опираются два столбика *e*, поддерживающіе гайку *p*, въ которой ходитъ микрометрической винтъ, оканчивающійся съ одной стороны головкой *q*, раздѣленной на 100 равныхъ дѣленій, съ

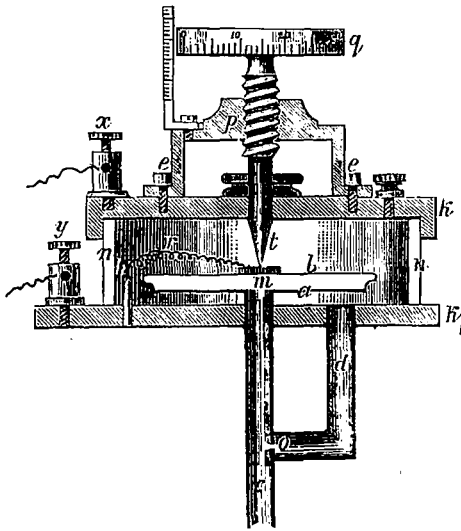
<sup>1)</sup> Воздушные замыкатели и, вообще, все новые приборы построены въ мастерской оптико-механика О. Рихтера.

другой—платиновымъ наконечникомъ  $t$  съ тупымъ остриемъ. Высота винтового хода винта равна, приблизительно, 1 мм. Вращая головку  $q$  винта, можно привести острие  $t$  въ прикосновение съ пластинкой  $m$  или приблизить его на весьма малое разстояніе, менѣе, чѣмъ на 0,01 мм. Верхній и нижній кружки  $k$  и  $k_1$  вводятся въ гальваническую цѣпь помощью винтовъ  $x$  и  $y$ ; если острие  $t$  касается пластинки  $m$ , то цѣпь замкнута. Чтобы перепонка  $b$  сохраняла постоянную форму, именно плоскую, давления по обѣ стороны ея должны быть равны, а потому какъ чашечка  $a$ , такъ и цилиндръ  $n$  должны быть наполнены воздухомъ одинаковой упругости. Съ этою цѣлью придѣлывается трубка  $d$ , сообщающая цилиндръ  $n$  съ трубкой  $c$ , чрезъ малое весьма отверстіе  $o$ . Если вытягивается воздухъ изъ трубки  $c$ , воздухъ выходитъ одновременно изъ цилиндра  $n$  и закрытаго пространства  $ab$ , образованнаго чашечкой и перепонкой, и давленіе въ обѣихъ полостяхъ остается одинаковымъ. Если въ трубку  $c$  приходитъ волна, то весьма малая часть ея энергіи тратится на возбужденіе второстепенной волны въ трубкѣ  $d$ ; большая же часть ея передается въ чашечку  $a$ , приподнимаетъ перепонку  $b$  и замыкаетъ гальваническую цѣпь; но вскорѣ давленіе по обѣ стороны перепонки уравнивается чрезъ отверстіе  $o$ , и цѣпь размыкается. Чѣмъ меньше отверстіе  $o$ , тѣмъ сильнѣе дѣйствіе волны на перепонку  $b$ , тѣмъ продолжительнѣе бываетъ замкнута гальваническая цѣпь и тѣмъ приборъ чувствительнѣе. Нельзя, однакоже, слишкомъ много уменьшать отверстіе  $o$ , потому что тогда, при вытягиваніи или впусканіи воздуха, перепонка можетъ попортиться. Большое отверстіе, уменьшая чувствительность прибора, имѣетъ еще и другую невыгодную сторону: пластинка  $m$  приходитъ въ прикосновение съ остриемъ  $t$  на столь короткое время, что якорь пишущаго прибора не успѣваетъ поставить знакъ на закопченной бумагѣ. Подобное явленіе было замѣчено и Реньо, при очень короткихъ, хотя и сильныхъ, звукахъ, каковы пушечные выстрѣлы. Я придавалъ отверстію  $o$  такую величину, чтобы перепонка не принимала замѣтнаго для глаза движенія, если воздухъ вытягивается пневматической машиной не спѣша. Послѣ нѣсколькихъ пробъ оказалось, что отверстіе въ 1 мм удовлетворяетъ этому требованію. При этой величинѣ, волна замыкаетъ цѣпь не менѣе какъ на 0,01 секунды, оставляя на бумагѣ совершенно ясный слѣдъ; затѣмъ, цѣпь замыкается, обыкновенно, еще нѣсколько разъ, вслѣдствіе волнъ, сопровождающихъ главную волну.

Замыкателей, совершенно одинаково устроенныхъ, два; они утверждены на общемъ столѣ.

Оба способа возбужденія волны—удары по перепонкѣ и впускание сгущеннаго воздуха—давали почти одинаковые результаты, но только въ первомъ случаѣ отдѣльныя наблюденія были болѣе между собою согласны.

21. Пишущій снарядъ состоитъ изъ электромагнита  $M$  (фиг. 5) съ якоремъ, вращающимся около точки  $c$ . Винты  $x$  и  $y$  служатъ для установки якоря въ такомъ положеніи, чтобы онъ не могъ ни касаться электромагнита, ни слишкомъ далеко отъ него отходить.



Фиг. 4.

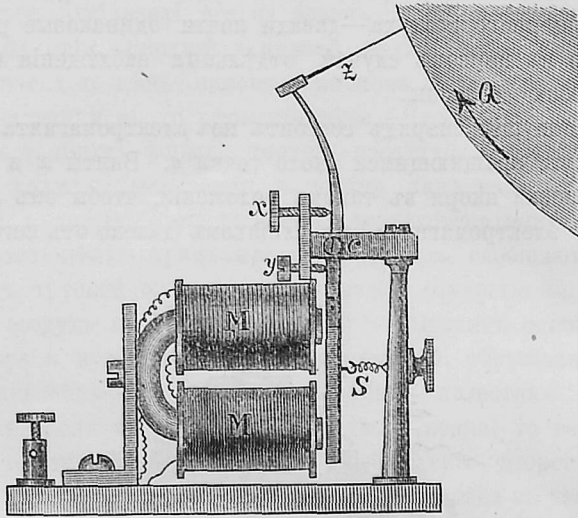
Слабая пружина  $S$  оттягиваетъ якорь отъ электромагнита. Къ якорю прикрѣпленъ пишущій стиль  $z$ , состоящій изъ гибкой и заостренной пластинки, вырѣзанной изъ гусиного пера; остріе его отстоитъ не болѣе какъ на 0,5 мм. отъ законченной бумаги, покрывающей вращающійся цилиндръ  $Q$ . При замыканіи гальванической цѣпи, якорь притягивается къ электромагниту, остріе стила ложится на бумагу и ведетъ по ней бѣлую линію.

Пишущихъ снарядовъ два. Каждый изъ нихъ вводится съ однимъ изъ пневм. замыкателей въ отдѣльную гальваническую цѣпь съ однимъ элементомъ Лекланше.

22. Вращающійся горизонтальный цилиндръ  $Q$  (фиг. 6) имѣеть

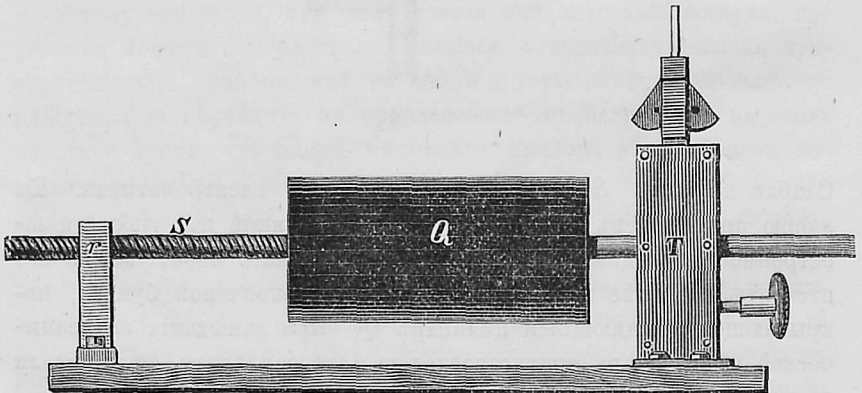


103 mm. въ діаметрѣ и 176 mm. длины. Онъ приводился въ движеніе часовымъ механизмомъ  $T$ , управляемымъ гирею. Ось  $S$  ци-



Фиг. 5.

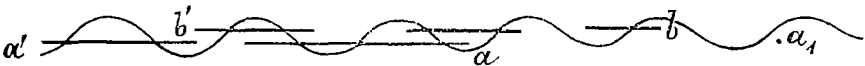
линдра съ одной стороны имѣеть винтовые нарѣзы, пропущенные чрезъ гайку  $r$ . Такимъ образомъ, вращаясь около своей геометрической оси, цилиндръ въ то же время, по направленію ея, имѣеть



Фиг. 6.

еще поступательное движеніе (на чертежѣ—слѣва направо). Цилиндръ обтягивался бумажной лентой, которой края склеивались; лента закапчивалась потомъ надъ пламенемъ лампы съ соляровымъ

масломъ. Скорость вращенія можно измѣнять отъ 1 до  $3\frac{1}{2}$  оборотовъ въ секунду. Противъ цилиндра, на одной высотѣ устанавливались стили пишущихъ приборовъ, а нѣсколько выше ихъ — стиль хронографа Марей <sup>1)</sup>. На той сторонѣ цилиндра, противъ которой поставлены стили, бумага двигается снизу вверхъ, такъ что стили пишущихъ приборовъ оставляютъ свои знаки по начерченной уже стилемъ хронографа волнообразной линіи. Послѣдній стиль находится впереди первыхъ двухъ, примѣрно на 15 мм., болѣе или менѣе, что каждый разъ принималось въ расчетъ. Когда вся бумага зачернена, то она разрѣзывалась вдоль цилиндра, снималась и фиксировалась растворомъ канифоли въ спиртъ. Фиг. 7 представляетъ часть такой бумажной ленты;  $bb'$  и  $aa'$  слѣды стилей пишущихъ приборовъ; линія  $b'b$  начата ранѣе, чѣмъ  $a'a$  и точка  $b$  ранѣе  $b'$ , точка  $a$  ранѣе  $a'$ .



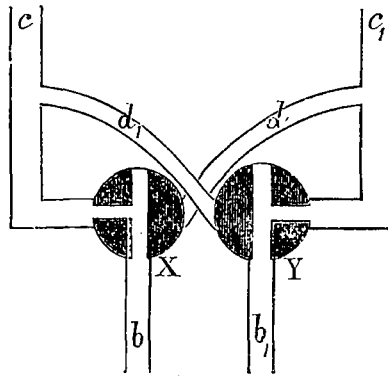
Фиг. 7.

Чтобы узнать, на сколько времени точка  $b$  появилась на бумагѣ ранѣе, чѣмъ  $a$ , надо отложить по направленію движенія отъ  $a$  къ  $a_1$ , 15 мм., точнѣе—разстояніе между стилемъ хронографа и стилями пишущихъ приборовъ. Затѣмъ, измѣряется длина 10-ти волнъ, изъ коихъ 5 лежитъ по одну сторону точки  $a_1$  и 5 — по другую; раздѣливъ эту длину на 10, получаемъ среднюю величину одной волны. Измѣривъ потомъ линію  $ab$ , можно выразить эту величину числомъ двойныхъ дрожаній камертона. Для измѣренія служила линейка, раздѣленная на четверти миллиметра. Цилиндру  $Q$  сообщается такой ходъ, чтобы длина двойного зигзага выходила 7—8 мм. При меньшей скорости трудно производить измѣренія; при большей — получаются неправильности, вслѣдствіе сотрясеній и неравномѣрнаго хода цилиндра.

23. Какъ воздушн. замыкатели, такъ и пишущіе приборы должны запаздывать. Если одна пара—замыкатель и соединенный съ нимъ пишущій снарядъ запаздываютъ столько же, какъ и другая пара, то никакой погрѣшности не будетъ.

<sup>1)</sup> La méthode graphique, p. 139. Хронографомъ Марей съ принадлежностями меня ссудилъ мой другъ Д. И. Менделѣевъ, за что приношу ему мою глубокую благодарность.

Но опытъ показалъ, что сочетая замыкатели съ трубами различно, получаемъ результаты разные. Значитъ, запаздыванія неодинаковы. Чтобы устранить эту погрѣшность, я построилъ снарядъ, который буду называть воздушнымъ коммутаторомъ. Два стальные крана X и Y (фиг. 8) о двухъ ходахъ соединены между собою и съ другими снарядами металлическими трубками. Трубка  $c$  соединяется съ трубкой  $c$  (фиг. 4) воздушнаго замыкателя; трубка  $c_1$  (фиг. 8)—съ другимъ замыкателемъ. Трубка  $b$  соединяется съ одной изъ испытуемыхъ трубъ и при помощи ея съ трубкой  $v$  (или  $u$ ) распредѣлителя (фиг. 3); трубка  $b_1$  (фиг. 8) соединяется короткой трубкой съ другой трубкой  $u$  (или  $v$ ) распредѣлителя (фиг. 3).



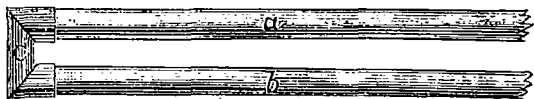
Фиг. 8.

При положеніи крановъ, показанномъ на фигурѣ 8, волна, прибывшая въ трубку  $b$ , идетъ потомъ въ трубку  $c$ ; волна, вошедшая въ  $b_1$ , направляется далѣе въ  $c_1$ . Если краны повернуть на  $180^\circ$ , то волна изъ  $b$  уходитъ, чрезъ трубку  $d$  въ  $c_1$ , а другая, чрезъ  $b_1$  и  $d_1$ , въ  $c$ . Тогда испытуемыя трубы мѣняются между собою замыкателями и пишущими приборами. Всегда производились два наблюденія, при двухъ положеніяхъ крановъ, и изъ двухъ выводовъ бралась средняя арифметическая величина. Отдѣльныя наблюденія между собою значительно разнились, но среднія арифметическія были весьма близки, что видно изъ таблицъ 1 и 2. Такія парныя наблюденія возможны только при условіи, что оба конца испытуемой трубы находятся вблизи другъ отъ друга. Поэтому, трубы на половинѣ ихъ длины сгибались; правильнѣе сказать — двѣ равной величины трубы  $a$  и  $b$  (фиг. 9) соединялись

перемычкой *C*, приготовленной изъ трубы большаго діаметра. Открытые концы трубъ соединились: одинъ съ коммутаторомъ, другой съ распредѣлителемъ.

24. Упругость воздуха опредѣлялась бароманометромъ, устройство котораго было описано мною въ Журналѣ Р. Ф. X. Общ. <sup>1)</sup>. Для измѣренія температуръ употреблялся термометръ съ десятими долями градуса; нуль шкалы лежитъ въ немъ выше точки замерзанія на  $0^{\circ},5$ .

25. Нахожу неудобнымъ изобразить на одномъ чертежѣ всю совокупность приборовъ моею довольно сложной методы, рассчитывая на воображеніе читателя. Я начиналъ съ того, что, осушивъ



Фиг. 9.

воздухъ въ испытуемыхъ трубахъ и соединенныхъ съ ними полостяхъ разныхъ приборовъ, доводилъ давленіе, помощію пневматической машины, до желаемой величины, которая измѣрялась катетометромъ. Затѣмъ, пускалъ въ ходъ цилиндръ *Q* (фиг. 6), а помощникъ мой возбуждалъ волну помощію ударнаго снаряда (фиг. 1) или поворачивалъ кранъ *n* (фиг. 2) для впуска сжатаго воздуха. Волна входила въ распредѣлитель, и оттуда высылала двѣ равнаго напряженія волны, чрезъ отверстія *u* и *v*, въ испытуемыя трубки; обѣ волны вступали въ коммутаторъ (фиг. 8), оттуда, смотря по расположенію крановъ, въ замыкатели (фиг. 4) и замыкали двѣ гальваническія цѣпи. Тотчасъ же пишущіе приборы (фиг. 5) приходили въ движеніе и оставляли на заковченной бумагѣ знаки. Тогда вращающійся цилиндръ останавливали, краны коммутатора поворачивались на  $180^{\circ}$ , давленіе, сколь возможно ближе, приводилось къ прежней величинѣ, и наблюденіе повторялось. Средняя арифметическая временъ относилась къ средней арифметической давленій. Въ случаѣ ударнаго снаряда, не требовалось подтягивать воздухъ, и опытъ можно было повторить сколько угодно разъ, что составляетъ большое преимущество этого способа возбужденія волны предъ впусканіемъ сжатеннаго воздуха. Къ сожалѣнію,

<sup>1)</sup> Т. XIX, стр. 395.

между 25 мм. и 60 мм. давленія, ударный снарядъ оказался не дѣйствительнымъ, и приходилось прибѣгать къ сгущенному воздуху.

Въ теченіи двухъ лѣтъ, мною сдѣлано было около тысячи наблюдений. При возникавшихъ сомнѣніяхъ, я привужденъ былъ нерѣдко отклоняться въ сторону, повторять сдѣланныя уже наблюдения при другихъ условіяхъ, дабы убѣдиться или отвергнуть полученные выводы, измѣнять устройство приборовъ и проч. Я изложу мою работу не въ томъ порядкѣ, какъ она производилась, но такимъ образомъ, чтобы устранить, по возможности, всякія возраженія, имѣющія возникнуть при чтеніи этого отчета, и прежде всего разсмотрю погрѣшности, свойственныя моему методу.

26. Нельзя допустить, чтобы пишущіе стили лежали совершенно на одной и той-же высотѣ. Это вводитъ погрѣшность въ одиночное наблюдение; при двойномъ-же наблюденіи, съ перемѣной замыкателей и пишущихъ приборовъ посредствомъ коммутатора, погрѣшность, очевидно, устраняется.

Неодинаковая подвижность якорей, неодинаковое ихъ разстояніе отъ электромагнитовъ, разная сила послѣднихъ, неодинаковая натянутость пружинокъ и проч. должны производить неравныя запаздыванія пишущихъ стилей. Чтобы изслѣдовать эти погрѣшности, я вводилъ въ одну и ту же гальваническую цѣпь оба электромагнита (безъ замыкателей) и, пустивъ въ ходъ часовой механизмъ, замыкалъ и размыкалъ цѣпь рукою. Разстояніе  $ab$  (фиг. 7) доходило иногда до 0,2—0,3 времени одного дрожанія камертона. Подтягивая или отпуская пружины  $S$  (фиг. 5), дѣйствуя винтами  $x$  и  $y$ , всегда можно было достигнуть того, что разстояніе  $ab$  не превышало разности высотъ стилей и, вообще, было близко къ нулю.

Можно предположить, что электромагниты, находясь вблизи другъ друга оказываютъ взаимное дѣйствіе, увеличивая или уменьшая притяженіе якорей и измѣняя, такимъ образомъ, промежутокъ времени между дѣйствіями пишущихъ стилей. Чтобы опредѣлить мѣру этого вліянія, электромагниты (вмѣстѣ съ замыкателями) вводились въ гальваническія цѣпи такимъ образомъ, чтобы одноименные полюсы находились въ ближайшемъ или наибольшемъ разстояніи другъ отъ друга; въ другихъ опытахъ между электромагнитами помѣщался магнитный экранъ; волна возбуждалась ударнымъ сварядомъ. Получаемыя при этомъ разности не превышали погрѣшностей наблюдений. Перестановка элементовъ Лекланше изъ одной цѣпи въ другую, обмѣнъ между замыкателями и пишущими приборами также не оказываютъ замѣтнаго вліянія.

Итакъ, пишущіе снаряды не давали постоянныхъ погрѣшностей.

27. Чувствительность замыкателей зависитъ отъ натянутости перепонки  $b$  (фиг. 4), отъ упругости проволоки  $r$ , соединяющей пластинку  $m$  съ столбикомъ  $h$  и отъ разстоянія между этой пластинкой и остриемъ  $t$ .

Чтобы придать перепонкамъ одинаковую натянутость, большая каучуковая перепонка 200 мм. длины и 100 мм. ширины растягивалась по возможности равномерно на деревянной доскѣ и края ея закрѣплялись кнопками. Потомъ, верхняя часть замыкателя, вмѣстѣ съ цилиндромъ  $n$ , снималась. Разогрѣвъ у обѣихъ чашечекъ  $a$  края и покрывъ ихъ мастикой, я накладывалъ ихъ на растянутую перепонку. Когда мастика остывала,—кнопки принимались и излишекъ перепонки отрѣзывался. Затѣмъ, приклеивалась мастикой пластинка  $m$ , но такъ, чтобы проволока  $r$  не была вовсе натянута.

Чувствительность замыкателей испытывалась слѣдующимъ образомъ. Двѣ оконечности  $u$  и  $v$  распредѣлителя (фиг. 3) соединялись, двумя трубками, съ трубками  $b$  и  $b_1$  (фиг. 8) коммутатора. Краны X и Y повертывались на  $90^\circ$ , такъ чтобы трубка  $b$  сообщалась съ обоими замыкателями, между тѣмъ какъ трубка  $b_1$  была заперта. Волна, возбужденная ударнымъ снарядомъ или впусканіемъ сжатого воздуха, входила въ трубку  $b$  и дѣйствовала разомъ на оба замыкателя, а тѣ на пишущіе снаряды. Если замыкатели имѣютъ одинаковую чувствительность, то  $ab$  (фиг. 7) должно быть равно нулю. Если, обратно,  $ab$  имѣетъ замѣтную величину, то замыкатели обладаютъ разною чувствительностью. Запоздавшій замыкатель можно поправить, ввинчивая микрометрической винтъ посредствомъ головки  $q$  (фиг. 4) и приближая острие  $t$  къ пластинкѣ  $m$ . Тотъ-же опытъ можно повторить, для проверки, повернувъ краны коммутатора (фиг. 8) въ противоположную сторону, чтобы на оба замыкателя дѣйствовала трубка  $b_1$ . Такіе опыты продѣлывались много разъ съ одинаковыми и разными соединительными трубами, при разнообразныхъ давленіяхъ; оказалось, что замыкатели невозможно сдѣлать совершенно одинаково чувствительными (развѣ случайно), потому что чувствительность ихъ съ теченіемъ времени измѣняется, то увеличиваясь, то уменьшаясь. Я думаю, это происходитъ отъ пыли, которая садится на поверхности пластинокъ  $m$  (фиг. 4) и остриевъ  $t$ ; въ самомъ дѣлѣ, замыкатели становились значительно постояннѣе, если эти поверхности очищались, что и дѣлалось отъ времени до времени. Поэтому, я не особенно заботился о приведеніи замыкателей къ оди-

наковой чувствительности, въ надеждѣ, что парвыя наблюденія, въ большомъ числѣ, уменьшать происходящую отсюда погрѣшность. Я старался только достигнуть возможно большей чувствительности; тогда остріе  $t$  отстояло отъ пластинки  $m$  на 0,002—0,003 мм; ближе ставить было нельзя, потому что сотрясеніе часового механизма и даже внѣшніе звуки вызывали замыканіе гальванической цѣпи.

Если въ разстояніи остріевъ отъ пластинокъ есть значительная разность, то и чувствительность замыкателей различна. Привожу нѣсколько опытовъ. Въ одномъ изъ замыкателей, который буду обозначать номеромъ I, остріе было поставлено въ разстояніи 0,02 мм. отъ пластинки, а въ другомъ II — на наибольшей чувствительности, т. е. въ разстояніи 0,002—0,003 мм. Дѣйствовалъ сгущеннымъ воздухомъ на оба замыкателя чрезъ трубу 8,8 м. длины и 34 мм. въ діаметрѣ, при 409 мм. давленія и  $16^{\circ},1$ . При 2 атм. сгущеннаго воздуха, замыкатель I отсталъ отъ II на 3,96 двойнаго дрожанія камертона, при 2,5 атм.—на 0,88. Это несогласіе имѣетъ понятную причину: сильная волна сообщаетъ перепонкамъ болѣе быстрое движеніе, чѣмъ слабая, и разность во временахъ замыканія гальваническихъ цѣпей должна уменьшиться. Дѣйствовалъ на оба замыкателя чрезъ короткую трубку 3 мм. въ діаметрѣ. Въ замыкателѣ I разстояніе между  $m$  и  $t$  было 0,01 мм., въ замыкателѣ II — 0,002—0,003 мм. При 2 атм. I отсталъ на 0,79, при 2,5 атм. —на 0,30. Тотъ же опытъ былъ повторенъ въ обратномъ порядкѣ: I былъ установленъ чувствительнѣе II. Получились числа подобныя предыдущимъ.

Отъ направленія гальваническаго тока—идетъ ли онъ отъ острія въ пластинкѣ, или обратно, чувствительность замыкателя не зависитъ.

Сильные токи не допускаютъ чувствительной установки; при употребленіи элемента Буизена, цѣпь уже замыкается при 0,01 мм. разстоянія между остріемъ и пластинкой.

28. Волна, по мѣрѣ движенія въ трубѣ, ослабѣваетъ, и хотя мои замыкатели чрезвычайно чувствительны, тѣмъ не менѣе слабая волна должна запаздывать относительно сильной. Такимъ образомъ, надлежало изслѣдовать напряженность волнъ и ихъ ослабленіе съ пройденнымъ пространствомъ.

Конецъ одной изъ испытываемыхъ трубокъ—длинной или короткой — отнимается отъ воздушнаго коммутатора и присоединяется къ коробкѣ Марeya. Пишущій стилъ ея приводится въ прикосновеніе съ заочечной бумагой цилиндра, который въ ходъ не пускаютъ. Волна, возбуждаемая ударнымъ снарядомъ, приводитъ въ

движеніе стиль коробки, который чертитъ на бумагѣ прямую горизонтальную линію, болѣе или менѣе длинную, въ зависимости отъ напряженія волны. Опытъ показаль, что, съ удлиненіемъ трубки, волна ослабѣваетъ. Такимъ образомъ, становится несомнѣннымъ, что запаздываніе волны въ длинной трубкѣ, сравнительно съ короткой, имѣеть двѣ причины: дѣйствительную, вслѣдствіе большаго пути, пройденнаго волною, и кажущуюся—отъ ея ослабленія; волна дѣйствуетъ тогда не переднею, болѣе слабую свою частью, но послѣдующею. Хотя опытъ показаль, что προϊстекающая отсюда погрѣшность немногимъ болѣе другихъ погрѣшностей, тѣмъ не менѣе я старался ее уменьшить. Для этого я помѣщаль между самою короткою изъ испытуемыхъ трубокъ и коммутаторомъ стеклянную трубку 3 мм. въ діаметрѣ и 40 мм. длины, съ одного конца оттянутую, чтобы образовалось отверстіе отъ 0,5 до 2 мм.; отверстіе обращалось къ коммутатору. Имѣя нѣсколько такихъ трубокъ, я подбираль такую, съ такимъ отверстіемъ, чтобы короткая изъ испытуемыхъ трубокъ съ такой стеклянной и длинная трубка давали бы на закопченной бумагѣ, при посредствѣ коробки Марее, одинаковой длины линіи. Такимъ образомъ, можно надѣяться, что обѣ волны, пробѣжавъ разные пути, приходили въ замыкатели съ равными напряженіями.—Я имѣль и другой способъ убѣдиться въ равной напряженности волнъ. Пропуская волны разомъ по двумъ трубкамъ разной длины, не приставляя притомъ къ короткой трубкѣ стеклянной, и производя испытанія при давленіяхъ отъ обыкновеннаго до весьма малыхъ, я, наконецъ, приходилъ къ такой упругости, при которой одинъ изъ замыкателей, именно соотвѣтствовавшій длинной трубѣ, переставаль дѣйствовать, между тѣмъ какъ другой еще продолжалъ замыкать гальваническую цѣпь даже при болѣе слабыхъ давленіяхъ. Если же суженная стеклянная трубка надлежащаго отверстія поставлена на мѣсто, то замыкатели перестаютъ дѣйствовать при одномъ и томъ же, приблизительно, давленіи.

Было еще и третье средство. Каждая волна, какъ упомянуто выше, оставляетъ на закопченной бумагѣ нѣсколько слѣдовъ, иногда до 10. По мѣрѣ разрѣженія воздуха, число слѣдовъ, уменьшается. Если суженной трубки нѣтъ, то число слѣдовъ оставленныхъ длинной трубкой, меньше, чѣмъ короткой; разность увеличивается съ уменьшеніемъ упругости воздуха. При надлежаще подобранной стеклянной трубкѣ, числа слѣдовъ, соотвѣтствующихъ обѣмъ трубкамъ, между собою равны при всякихъ давленіяхъ.



При всѣхъ моихъ наблюденіяхъ, я, первымъ долгомъ, старался уравнивать напряженность волнъ, располагая съуженную стеклянную трубку на пути волны, потерпѣвшей меньшее ослабленіе.

29. Весьма сильные звуки распространяются скорѣе слабыхъ, но никакихъ измѣрительныхъ работъ въ этомъ направленіи сдѣлано не было. Наблюденія Монтиньи, упомянутыя выше и подобныя имъ, а также изслѣдованія въ родѣ работы Маха и Зоммера <sup>1)</sup> нельзя признать основательными. Несомнѣнно, кажется, только одно, что сильные звуки имѣютъ весьма большую сравнительно скорость. Въ пользу этого говорить не разъ замѣченное явленіе, что въ большомъ разстояніи отъ артиллерійскаго орудія, командныя слова слышались послѣ выстрѣла. То же слѣдуетъ изъ работъ Реньо. По мѣрѣ уменьшенія амплитуды дрожанія воздушныхъ час-

---

<sup>1)</sup> Zitz. ber der Wien. Akad., B. LXXV, N. I. Двѣ короткія трубки, коихъ отверстія заклеены бумагой, располагаются на одной горизонтальной прямой линіи. По направленію этой прямой стрѣляютъ изъ пистолета пулей, которая послѣдовательно пробиваетъ нѣсь 4 покрышки и, затѣмъ, ударяется въ баллистическій маятникъ. Пробивъ первую покрышку первой трубки, она сгущается, пока еще не пробита вторая покрышка, въ этой трубкѣ воздухъ. Сгущеніе передается чрезъ боковое отверстіе въ каналъ, продѣланный въ деревянной доскѣ. Спустя нѣкоторый весьма малый промежутокъ времени, производится такое же сгущеніе во второй трубкѣ, сообщенной съ другимъ концомъ того же канала въ доскѣ. Возбужденныя, такимъ образомъ, двѣ волны бѣгутъ по каналу другъ другу навстрѣчу. Такъ какъ между прорываніями покрышекъ происходитъ нѣкоторый промежутокъ времени, зависящій отъ скорости пули и разстоянія между первыми покрышками, то встрѣча волнъ происходитъ не на серединѣ канала, а въ сторону запоздавшей волны. Точка встрѣчи опредѣляется посредствомъ порошка, которымъ обсыпается стѣнка канала, и который, послѣ выстрѣла, образуетъ пыльныя фигуры. Чтобы ихъ можно было видѣть, каналъ продѣлывается въ двухъ разнимающихся доскахъ. Скорость пули опредѣлялась баллистическимъ маятникомъ. Длина канала была около 1 м. Изъ этихъ данныхъ вычислялась скорость. Погрѣшности этой методы весьма велики. Неудивительно, поэтому, что авторы получили выводы несогласные. Для пистолетныхъ выстрѣловъ скорость звука вѣднчалась отъ 393 до 468 м; ударные капсули (изъ другого ряда опытовъ) дали отъ 334 до 422 м; отсюда авторы сочили себя въ правѣ заключить, что скорость сильныхъ звуковъ есть величина неопредѣленная. Въ слѣдующемъ затѣмъ изслѣдованіи (Zitz. ber. der Wiener Akad., B. LXXVII, N. II) Махъ, въ сотрудничествѣ съ Тумларцомъ и Кеглеромъ, самъ считаетъ предыдущую работу неточною и рассматриваетъ ее «ниг als rohe und vorläufige». Я также не нахожу въ ней ничего существеннаго и останавливаюсь теперь на ней только потому, что мнѣ на нее было указано (Ж. Р. Ф. Х. Общ. Т. XVI, стр. 409), какъ на такую, которая, будто бы опровергаетъ выводы, изложенные въ моемъ предварительномъ сообщеніи.

тиць, скорость уменьшается, приближаясь къ нѣкоторому предѣлу. Если напряженность звука не велика, то небольшое измѣненіе въ силѣ звука не оказываетъ вліянія на скорость. На основаніи теоретическихъ соображеній, Реньо вычислилъ избытокъ упругости въ сгущенной части волны <sup>1)</sup>. Этотъ избытокъ измѣняется отъ 34,2 мм. до 0,77 мм., а средняя скорость отъ 334,76 м. до 330,68 м.; при измѣненіи же давленія отъ 2,57 мм. до 0,77 мм., не происходитъ почти никакого измѣненія въ скорости; измѣненія были бы еще менѣе, если бы вычислялись не среднія скорости, а скорости для пробѣга звука между двумя послѣдовательными отраженіями отъ одной и той же перепонки.—Чтобы судить о полученныхъ мною скоростяхъ звука, я считалъ необходимымъ, хоть приблизительно, опредѣлить путемъ опыта напряженность волнъ.

Одинъ конецъ испытуемой трубы отнимался отъ коммутатора и присоединялся къ коробкѣ Марей, которой стиль устанавливался противъ закопченной бумаги цилиндра, пребывавшаго въ покоѣ; ударнымъ спарядомъ возбуждалась волна; стиль приходилъ въ движеніе и чертилъ на бумагѣ прямую линію нѣкоторой длины.

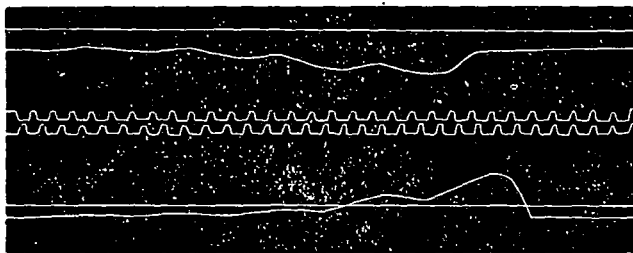
Затѣмъ, коробка Марей отдѣлялась отъ испытуемой трубы и соединялась съ нефтянымъ манометромъ. Съ помощію каучуковаго шара, производилось одновременно давленіе въ обоихъ приборахъ—коробкѣ Марей и манометрѣ—пока стиль не давалъ на бумагѣ линію прежней длины. Разность высотъ нефти въ манометрѣ представляетъ, насколько упругость воздуха въ коробкѣ Марей болѣе упругости наружнаго воздуха, и, слѣдов., избытокъ упругости воздуха въ волнѣ, въ моментъ прихода ея въ коробку Марей. Измѣреніе производилось приблизительно, приложеніемъ къ манометру линейки. При трубкѣ 3 мм. въ діаметрѣ и нѣсколькихъ сантиметровъ длины, этотъ избытокъ оказался 16 мм. нефтяного столба; при 4 м. длины—7 мм., при 8,5 м. длины—4 мм. Труба 16 мм. въ діаметрѣ и 8,4 м. длины дала въ манометрѣ 8 мм.; труба 34 мм. въ діаметрѣ и 8,8 м. длины—также 8 мм. Вообще, стало быть, избытокъ упругости не превышалъ 1 мм. ртутнаго столба и бывалъ иногда менѣе  $\frac{1}{2}$  миллиметра. Слѣдоват., напряженность волны была такъ мала, что найденную скорость звука можно было считать постоянною и равною своему наименьшему предѣльному значенію.

30. Любопытно также было знать высоту тона или длину волны. Эти опредѣленія были сдѣланы съ помощію двухъ коробокъ Марей,

---

<sup>1)</sup> Relation, t. III, p. 558.

которыя изъ предварительныхъ опытовъ оказались одинаково чувствительными. Онѣ были установлены противъ закопченной бумаги цилиндра, приводимаго на этотъ разъ во вращательное движеніе на маломъ ходѣ. Волна возбуждалась ударнымъ снарядомъ. Фиг. 10 представляетъ точный снимокъ съ бумажной ленты. Ранѣе начерчена правая сторона чертежа. Верхняя прямая линія и продолженіе ея кривая линія описаны стилемъ коробки Марей, на которую дѣйствовала волна, пробѣжавшая предварительно трубу длиною въ 8,8 м. и 34 мм. въ діаметрѣ. Ниже лежатъ два ряда волнообразныхъ линій, описанныхъ хронографомъ. Нижняя прямая линія и продолженіе ея кривая произведены стилемъ другой коробки Марей, соединенной съ распредѣлителемъ короткой трубкой 3 мм. въ діаметрѣ; суженной стеклянной трубки не было. Переходъ при-



Фиг. 10.

мыхъ линій—верхней и нижней—въ кривыя совершается въ тотъ самый моментъ, когда волны приходятъ въ коробки. Что кривыя линіи обращены другъ къ другу, произошло оттого, что такимъ же образомъ приходилось ставить стили коробокъ. Изъ чертежа видно, что ударный снарядъ возбуждаетъ только одну длинную волну, съ которой сочетаются другія волны меньшей длины и относящіяся къ первой, какъ обертоны. Подобные опыты повторялись много разъ, и фигуры, при одинаковыхъ условіяхъ, получались совершенно одинаковыя. Нерѣзкія очертанія затрудняютъ измѣренія, но, кажется, будетъ весьма близко принять, что длина одной второстепенной волны равна длинѣ 4-хъ волнъ хронографа; значитъ, на секунду приходится 25 двойныхъ колебаній. Подобный расчетъ для основной волны сдѣлать весьма трудно, по неясности ея очертаній. Значитъ вообще звуки были весьма назкіе. Высоту пистолетнаго выстрѣла Реньо опредѣлили въ 195 дрожаній въ секунду. Въ защиту моей работы, я долженъ здѣсь напомнить, что низкіе

тоны идутъ медленнѣе высокихъ только въ тонкихъ трубкахъ; въ свободномъ же воздухѣ и широкихъ трубахъ, особенно при небольшой длинѣ, тоны всякой высоты распространяются съ равными скоростями. Но самое главное, на что нахожу необходимымъ обратить вниманіе, что первая волна самая сильная и не предшествуется мелкими волнами—и что она вздымается сразу, въ теченіе весьма короткаго промежутка времени, около 0,01 секунды. При употребленіи замыкателей, отверстіе *o* (фиг. 4), вѣроятно оказываетъ вліяніе на видъ и число волнъ, но нѣтъ основанія предполагать, что первая волна не будетъ и тогда самая сильная.

Изъ фигуры 10 также видно, что короткая трубка даетъ рѣзкій переходъ отъ прямой къ кривой линіи, но для трубы въ 8,5 м. длины прямая линія лишь постепенно переходитъ въ кривую. Поэтому, точное опредѣленіе скорости звука помощью коробокъ Мареев затруднительно, и остается удивляться, что Тумлирцъ <sup>1)</sup> могъ получить столь согласные между собою выводы.

31. Мои наблюденія не имѣли цѣлью опредѣлять абсолютную величину скорости звука въ воздухѣ, а только сравнительныя величины скоростей при разныхъ давленіяхъ и притомъ приближенно. Поэтому, въ опредѣленіи числа дрожаній камертона не было надобности. Но, чтобы сравнить мои наблюденія съ результатами, найденными другими наблюдателями, мнѣ интересно было знать число дрожаній, совершаемыхъ камертономъ въ секунду. Взяты были хорошіе компенсированные часы съ отдѣльной секундной стрѣлкой, въ ходѣ которыхъ неправильность, въ теченіе сутокъ, не превышаетъ 1 минуты; это могло ввести погрѣшность не болѣе  $\frac{1}{1440}$  измѣреннаго промежутка времени, что для моихъ наблюденій болѣе, чѣмъ достаточно. Въ гальваническую цѣпь, содержащую элементъ Бунзена, были введены одинъ изъ пишущихъ снарядовъ и пружинный прерыватель. Ударяя по пружинѣ рукою, въ тактъ прерывистаго движенія секундной стрѣлки, я замыкалъ, такимъ образомъ, цѣпь; стиль пишущаго прибора давалъ отмѣтки на закованной бумагѣ вращающагося цилиндра. Эти отмѣтки ложились на волнообразной линіи, описываемой хронографомъ. Въ теченіе 40 секундъ сдѣланы 41 замыканія и получились 4060 двойныхъ дрожаній камертона. Слѣдовательно, камертонъ, въ секунду, даетъ 101,50 дв. дрожаній. Разность между отдѣльными наблюденіями, т. е. для каждой секунды, не превосходила 10 дрожаній. Допуская, что такая

<sup>1)</sup> Sitz. ber. der Wien. Ak., B. LXXX., Heft. III.

ошибка сдѣлана въ началѣ и концѣ, мы имѣли бы почти невозможную погрѣшность 20 дрожаній, а въ среднемъ 0,5 дрожаній; тогда число дрожаній камертона въ секунду заключалось бы между предѣлами: 101,25 и 101,75. Вѣроятно, погрѣшность менѣе. По формуламъ Фэ <sup>1)</sup>, средняя погрѣшность вывода оказывается только 0,04. Вслѣдствіе измѣненія силы тока и, вмѣстѣ съ тѣмъ, размаховъ вѣтвей камертона, а также отъ измѣненія температуры, измѣняется число дрожаній камертона, но, по опытамъ Меркадье <sup>2)</sup>, измѣненія эти такъ малы, что я не принималъ ихъ во вниманіе. Вообще погрѣшность въ числѣ дрожаній камертона не могла оказать замѣтнаго вліянія: допуская ее не въ 0,04, а даже въ 0,5, мы имѣли бы для относительной погрѣшности только 0,0005.

32. Въ измѣреніи длины трубъ нельзя допустить погрѣшности болѣе 0,03 м, что при трубѣ въ 8—9 м могло ввести въ скорость относительную погрѣшность 0,004; кромѣ того, можно подозрѣвать неопредѣленность въ измѣреніи длины согнутыхъ частей трубы, вліяніе которой въ точности неизвѣстно. По примѣру Реньо, я измѣрялъ длину трубы по оси.

Въ измѣреніи времени по зигзагамъ лінія, описанной стилемъ хронографа, ошибка не превышала 0,05 одного двойного дрожанія камертона, потому что длина одного двойного зигзага была отъ 6 до 8 мм., а абсолютная погрѣшность не могла быть болѣе одного дѣленія линейки, т. е.  $\frac{1}{4}$  мм. Не могла быть по тому, что пишущіе стили двигались по самой волнообразной линіи, и я не нуждался, подобно Реньо и Тумлирцу, въ опусканіи перпендикуляровъ. Предположивъ, что измѣренное время равнялось 3 дрожаніямъ камертона, найдемъ для относительной погрѣшности 0,017. Вслѣдствіе измѣнчивости замыкателей, можно ожидать болѣешихъ погрѣшностей, что и видно изъ таблицъ 1 и 2 для отдѣльныхъ наблюденій; среднія-же изъ двухъ наблюденій, при равныхъ положеніяхъ крановъ коммутатора, разнятся между собою на величины, близкія къ вычисленной. Должно, однако-же, замѣтить, что при давленіяхъ весьма слабыхъ разности болѣе. Чтобы уменьшить вліяніе погрѣшностей, надлежало-бы увеличить длину трубъ, но тогда, при малыхъ давленіяхъ, замыкатели, вслѣдствіе ослабленія волнъ, перестаютъ дѣйствовать.

33. По мѣсту, которое было въ моемъ распоряженіи и по

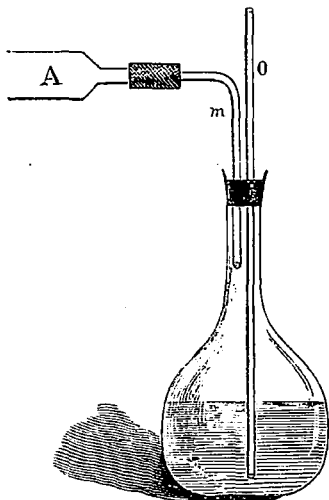
---

<sup>1)</sup> Cours d'astronomie, p. 201.

<sup>2)</sup> Comptes rendus, t. XXXIII.

сущности методы, я могъ производить опыты только надъ трубами согнутыми въ два колѣна. Я пробовалъ опредѣлить вліяніе кривизны трубокъ на скорость звука. Двѣ свинцовыя трубки 3 мм. въ діаметрѣ по 9 м длины, свернутыя въ кольца, подвергнуты были дифференціальному испытанію: каждая изъ нихъ соединяла одну изъ трубокъ распредѣлителя съ одной изъ трубокъ коммутатора. Кольца одной изъ трубокъ имѣли 0,3 м въ діаметрѣ, кольца другой 0,5 м. Начиная съ обыкновеннаго до 9 мм давленія, я нашелъ разности, не превышавшія погрѣшностей наблюдений. Весьма вѣроятно, что трубы большаго діаметра дали-бы иные результаты.

34. Водяные пары, примѣшиваясь къ воздуху, уменьшаютъ его плотность и увеличиваютъ скорость звука, а вслѣдствіе того, что они отступаютъ отъ закона Бойль-Мариотта болѣе чѣмъ воздухъ, должно происходить уменьшеніе скорости; вліяніе этой послѣдней причины, вѣроятно, ничтожно. Кромѣ того, находясь въ состояніи насыщенія, водяные пары должны увеличивать скорость звука еще по иной причинѣ, выше указанной (8 и 10). Если воздухъ насыщенъ парами и содержитъ, сверхъ того, плавающія въ немъ мелкія капли воды, то въ сгущенной части волны пары перегрѣются, и капли, ча-



Фиг. 11.

стію или вполнѣ обратятся въ пары; отъ этого упругость, при той-же плотности смѣси (воздуха, пара и воды), увеличится. Для изслѣдованія вліянія этой причины, взята была труба 67 мм. въ діаметрѣ и 9,1 м. длины. Одинъ конецъ ея А (фиг. 11), помощью свинцовой трубки *m*, былъ сообщенъ съ колбой, содержащей воду. Колба запиралась пробкой, чрезъ которую проходила эта свинцовая трубка и другая стеклянная *o*, опущенная однимъ концомъ въ воду. Изъ другого конца трубы А вытягивался воздухъ; колба снизу подогревалась. Наружный воздухъ проникалъ чрезъ трубку *o* въ воду и потомъ входилъ чрезъ трубку *m* въ испытуемую трубу 67 мм. По прошествіи часа, операція была прекращена, а по прошествіи другого часа, когда уже можно было надѣяться, что воздухъ, насыщенный теперь во-

даннымъ паромъ, принявъ температуру среды, труба была подвергнута обычному испытанію. Высота барометра равнялась 765, 2 мм., температура въ теченіе опытовъ измѣнялась отъ 22°,5 до 23°,4. Дѣйствовали ударный снарядъ. Въ первой строкѣ слѣдующей таблицы, выставлены числа дрожаній камертона, когда труба 67 мм., была соединена съ замыкателемъ I, а короткая свинцовая трубка съ замыкателемъ II. Вторая строка содержитъ подобныя числа, когда труба 67 мм. и трубка 3 мм. были обмѣнены, посредствомъ коммутаторовъ, съ замыкателями. Наконецъ, третья строка содержитъ среднія арифметическія величины первыхъ двухъ строкъ.

Таблица 1.

2,71	2,69	2,81	2,68	2,83	2,75	2,84	2,94	2,84	2,92	2,91
2,93	2,91	2,93	2,97	2,90	2,91	2,80	2,82	2,84	2,77	2,89
2,82	2,80	2,87	2,83	2,87	2,83	2,82	2,88	2,84	2,85	2,90

Средняя арифметическая изъ 22 наблюдений 2,85. Погрѣшность въ вода <sup>1)</sup>, считая число наблюдений не 22, а 11 двойныхъ наблюдений  $\pm 0,009$ . Чтобы перейти отъ влажнаго къ сухому воздуху, надо умножить 2,85 на  $1 + \frac{3}{10} \cdot \frac{f}{H}$ , гдѣ  $f$  упругость влажнаго пара, а  $H$  — давленіе атмосферы; такимъ образомъ получается 2,86.

Ранѣе, при такой же трубѣ и, вообще, при томъ же расположеніи всѣхъ приборовъ, но только для сухого воздуха, при давленіи 763 мм. и температурѣ отъ 22°,5 до 22°,6, было найдено:

Таблица 2.

3,00	2,85	2,78	2,72	2,93	2,75	2,77	2,81	2,88
3,00	2,96	2,98	2,97	2,80	3,10	3,03	3,05	3,00
3,00	2,91	2,88	2,85	2,87	2,93	2,90	2,93	2,94

Въ среднемъ 2,91. Погрѣшность вывода  $\pm 0,01$ . Поправка на температуру пренебрежима. Сравнивая это число съ предыдущимъ 2,86, находимъ разность 0,05. Она превышаетъ погрѣш-

<sup>1)</sup> Faye. Cours. d'astronomie, p. 201.

ности 0,009 и 0,01. Следовательно, водяной паръ въ насыщенномъ состояніи увеличиваетъ скорость звука болѣе, чѣмъ бы надлежало вслѣдствіе уменьшенія плотности воздуха; избытокъ представляетъ увеличеніе скорости, происходящее оттого, что насыщенный водяной паръ въ сгущенной части волны перегрѣвается. Такое заключеніе мнѣ кажется вполне законнымъ, не смотря на то, что величина 0,05 близка къ погрѣшностямъ наблюденій,—потому что оба сравнительныя наблюденія были сдѣланы при совершенно одинаковомъ расположеніи всѣхъ приборовъ и, значитъ, содержали равныя погрѣшности. Я думаю даже, что я получилъ слишкомъ мало (0,05), потому что воздухъ трубы содержалъ, вѣроятно, ничтожное количество воды въ видѣ взвѣшенныхъ капель, и не во всю длину трубы былъ насыщенъ; въ самомъ дѣлѣ, послѣ опыта, оказалось, что съ противоположнаго конца тому, откуда впускался паръ,—стѣнки трубы были сухи.

35. При изслѣдованіи трубъ приходилось соединять ихъ съ распределителемъ и коммутаторомъ болѣе или менѣе короткими трубками 3 мм. въ діаметрѣ, въ которыхъ скорость звука относительно мала. Хотя вліяніе этой причины не можетъ быть велико, тѣмъ не менѣе надлежало знать скорость волны и въ такихъ трубкахъ. Длина ихъ была различна: отъ 2 до 1000 метр. Каждый разъ испытывались двѣ трубки—длинная и короткая, соединявшія распределитель съ замыкателями; для опредѣленія скорости звука принималась въ расчетъ разность ихъ длины. Оказалось, что съ увеличеніемъ длины трубки 3 мм., скорость звука уменьшается. Такъ какъ широкія трубы сочетались только съ короткими этой толщины, то важно было знать скорость звука преимущественно въ трубкахъ небольшой длины. Съ другой стороны, въ слишкомъ короткихъ трубкахъ вліяніе погрѣшностей велико. Пересматривая наблюденія за 1884 и 1885 гг., я остановился на наблюденіяхъ надъ трубами 3 и 4 м. длины, сдѣланныхъ при условіяхъ, наиболѣе выгодныхъ.

Въ таблицѣ 3 сведены результаты этихъ наблюденій.

Высоты барометра приведены къ 0°, по формулѣ

$$h_0 = h (1 - t \cdot 0,0001624); .$$

онѣ помѣщены во 2-мъ вертикальномъ столбцѣ. 3-й столбецъ содержитъ температуры. Скорость звука вычислена по формулѣ

$$\frac{a \cdot 101,50}{n} ,$$



гдѣ  $a$  — означаетъ разность между длинами двухъ свинцовыхъ трубокъ 3 м,  $n$  — время, выраженное въ дрожаніяхъ камертона. Всѣ наблюденія произведены при температурахъ близкихъ къ  $18^\circ$ ; къ ней (а не къ  $0^\circ$ ) отнесены всѣ скорости. Назвавъ чрезъ  $t$  температу наблюденья и принявъ 0,00368 коэффициентомъ расширения сухого воздуха, получимъ для поправки скорости множитель  $\sqrt{1 + 0,00368(18-t)}$ , что весьма близко равно  $1 + 0,00184(18-t)$ . При весьма слабыхъ давленіяхъ коэффициентъ расширения воздуха имѣетъ ную величину; но такъ какъ она неизвѣстна, то приходится довольствоваться коэффициентомъ 0,00368. Во всякомъ случаѣ, эта погрѣшность не можетъ оказать вліяніе на общіе выводы.

Такимъ образомъ скорость звука, отнесенная къ  $18^\circ$ , будетъ:

$$\frac{a \cdot 101,50}{n} [1 + 0,00184(18-t)].$$

По этой формулѣ найдены числа 4 столбца. Въ 5-мъ столбцѣ помѣщены относительныя скорости, причемъ скорость звука для обыкновеннаго давленія принята за 100. 1-й столбецъ означаетъ число наблюденій.

Таблица 3.

1.	2.	3.	4.	5.
4	2,2	21°,3	82 м.	25
6	5,5	23,0	81 »	25
4	10,3	18,3	98 »	30
4	21,3	18,3	132 »	41
6	31,4	23,3	142 »	44
4	34,8	18,3	171 »	53
12	51,5	18,4	185 »	57
8	74,9	19,0	220 »	68
8	88,2	18,8	241 »	74
8	116,6	18,7	258 »	79
8	202,4	18,4	272 »	84
8	286,2	18,1	296 »	91
8	757,4	21,3	325 »	100

Изъ таблицы видимъ, что, съ возрастаніемъ давленія отъ 2 м., скорость звука быстро увеличивается, но, по мѣрѣ приближенія къ обыкновенному давленію, эти измѣненія становятся меньше. Возрастаніе скорости зависитъ не только отъ увеличенія упругости воздуха, но также отъ вліянія теплопроводности стѣнокъ трубки и

оттого, что въ узкихъ трубкахъ волна испытываетъ относительно большое треніе о стѣнки. Эти вліянія должны уменьшаться съ увеличеніемъ давленія воздуха. Числа предыдущей таблицы были нанесены на разграфленную бумагу, на которой прямыя линіи отстояли одна отъ другой на 1 мм. По оси абсциссъ откладывались давленія, причемъ каждое дѣленіе бумаги принималось за одинъ миллиметръ давленія воздуха. По оси ординатъ отсчитывались скорости звука, принимая одно дѣленіе бумаги за 1 метръ.

Получилась кривая не вполне стройная, но болѣе стройная, чѣмъ можно было ожидать при такой малой длинѣ трубокъ (3 м. и 4 м). Поправивъ кривую отъ руки, я нашелъ, что разности между скоростями, помѣщенными въ таблицѣ, и вымѣренными по кривой не превышали 6%. Этой точности было вполне достаточно, ибо наблюденія, сгруппированныя въ таблицѣ 3, имѣютъ только одну цѣль — вычисленіе поправокъ для широкихъ трубъ, а эти поправки были малы.—Прочія наблюденія теперь не публикуются, потому что не идутъ къ дѣлу и требуютъ поправки.

36. Опыты надъ трубкой 16 мм. были опубликованы въ томъ видѣ, какъ получены; теперь же являются исправленными. Длина трубы была 8,409. Одинъ конецъ ея соединялся съ коммутаторомъ свинцовой трубкой 3 мм. въ діаметрѣ; другой конецъ замыкалъ къ распредѣлителю. Остальные свободныя отверстія коммутатора и распредѣлителя соединялись между собою короткой свинцовой трубкой; общая длина послѣдней вмѣстѣ съ суженной стеклянной трубкой была болѣе длины первой свинцовой трубы на 0,060 мм. Такимъ образомъ, наблюдалась разность временъ, употребляемыхъ звукомъ, чтобы пробѣжать трубку 16 мм. въ діаметрѣ и 8,409 м. длины и трубку 3 мм. въ діаметрѣ и 0,060 м. длины. Обозначивъ чрезъ  $v$ —скорость звука въ трубкѣ 16 мм., а чрезъ  $v_1$ —скорость въ трубкѣ 3 мм., найдемъ уравненіе

$$\frac{8,409}{v} = \frac{0,060}{v_1} + \frac{n}{101,5} [1 - 0,00184(18 - t)]$$

для вычисленія  $v$ . Скорость  $v_1$  опредѣлялась по таблицѣ или по изображающей ее кривой линіи.

Таблица 4 представляетъ результаты наблюденій надъ трубою въ 16 мм., расположенные въ томъ же порядкѣ какъ и въ таблицѣ 3.

Таблица 4.

1.	2.	3.	4.	5.
2	3,8 mm.	19°,1	117 m.	38
2	4,5 »	19,0	133 »	43
2	5,6 »	19,0	142 »	46
2	8,7 »	19,2	163 »	52
2	11,0 »	19,3	171 »	55
8	40,6 »	19,5	215 »	69
6	51,4 »	19,6	239 »	77
6	74,8 »	20,0	268 »	86
8	94,3 »	20,0	284 »	91
6	193,4 »	19,9	296 »	95
6	408,9 »	19,9	308 »	99
10	762,5 »	19,9	311 »	100

Изъ таблицы видно, что скорости звука въ трубѣ 16 mm. возрастаютъ довольно быстро съ давленіемъ, но не столь быстро какъ для трубы 3 mm. Отсюда надо заключить, что вліяніе тренія о стѣнки и потери или полученія отъ нихъ теплоты воздухомъ менѣе въ трубкѣ 16 mm., чѣмъ въ трубкѣ 3 mm. При обыкновенномъ давленіи скорость для первой (311) оказалась менѣе, чѣмъ для второй (325). Это, конечно, не вѣрно и объясняется погрѣшностями. Полезно было бы повторить наблюденія надъ обѣими трубками или сравнить ихъ непосредственно дифференціальнымъ способомъ, что и было дѣйствительно сдѣлано, и о чемъ будетъ сказано далѣе.

Для моей цѣли, наблюденія надъ трубами тонкими не существенны, потому что я имѣлъ въ виду изслѣдовать зависимость скорости звука только отъ упругости воздуха и независимо отъ другихъ условій, а это возможно только при опытахъ надъ трубами широкими.

37. Наибольшее вниманіе, по причинамъ, ниже изложеннымъ, было обращено мною на мѣдную трубу 34 mm. въ діаметрѣ. Она имѣла двѣ металлическія надставки. Одна изъ нихъ есть короткая трубка 6 mm. въ діаметрѣ и примыкаетъ непосредственно къ распредѣлителю. Къ другому концу трубы 34 mm. припаяна воронка, которая своимъ узкимъ отверстіемъ соединялась съ воздушнымъ коммутаторомъ. Она имѣетъ назначеніе собирать энергію волны и сосредоточивать ее на замыкателѣ. Длина ея по оси съ надставками 8,807 m. Соединительная свинцовая трубка 3 mm., вмѣстѣ съ суженной стеклянной трубкой, между распредѣлителемъ и коммутаторомъ, при однихъ опытахъ имѣла длину 0,130 m., при дру-

гихъ — 0,060 м. Скорость опредѣлялась по одному изъ слѣдующихъ уравненій:

$$\frac{8,807}{v} = \frac{0,130}{v_t} + \frac{n}{101,50} [1 - 0,00184 (18 - t)]$$

$$\frac{8,807}{v} = \frac{0,060}{v_t} + \frac{n}{101,50} [1 - 0,00184 (18 - t)]$$

Изъ множества наблюдений съ этой трубой, я избралъ 17 наблюдѣй благонадежныхъ и произведенныхъ при обстоятельствахъ по возможности одинаковыхъ. Выводы сгруппированы въ таблицѣ 5.

Таблица 5.

1.	2.	3.	4.	5.
24	2,6 mm.	17 <sup>o</sup> ,8	171 m.	52
20	3,0 »	17,5	206 »	62
10	3,2 »	18,1	212 »	64
30	6,6 »	17,4	226 »	68
22	13,9 »	17,9	252 »	76
34	16,0 »	15,9	256 »	78
24	34,3 »	17,2	284 »	86
38	85,0 »	17,5	312 »	95
22	282,4 »	17,5	327 »	99
12	292,4 »	17,5	324 »	98
12	394,8 »	17,3	326 »	99
12	489,9 »	17,0	324 »	98
12	761,0 »	17,5	330 »	100
20	761,7 »	17,5	330 »	100
14	764,5 »	16,8	330 »	100
20	766,5 »	18,0	329 »	100
16	780,4 »	17,1	326 »	99

Здѣсь возрастаніа скорости звука съ увеличеніемъ давленія еще менѣе, чѣмъ въ таблицѣ 4; слѣдоват., возрастаніе скорости въ трубѣ 16 mm., при увеличиваніи упругости воздуха, зависитъ въ нѣкоторой степени отъ діаметра трубы.

38. Самая широкая изъ изслѣдованныхъ трубъ была желѣзная, газовая, 67 mm. въ діаметрѣ; она имѣла двѣ надставки: съ одной стороны металлическую трубку, съ другой — воронку. Волны въ этой трубѣ имѣли меньшую напряженность, чѣмъ въ предыдущей, такъ что при слабыхъ давленіяхъ, требовалось впускать болѣе сгущенный воздухъ, чѣмъ 2,5 атм. При моихъ снарядахъ это было невозможно. Самое малое давленіе, при которомъ волна замыкала гальван. цѣпь, было 25 mm. Но при всѣхъ наблюденныхъ давленіяхъ, скорости звука выходили весьма близкими къ тѣмъ,

которыя были найдены для трубы 34 мм. Это меня навело на мысль, что въ обѣихъ трубахъ звуки распространяются съ одной и той же скоростью, независимо отъ ихъ діаметровъ. Чтобы убѣдиться въ этомъ или отвергнуть, я воспользовался дифференціальной методой и подвергнулъ испытанію обѣ трубы разомъ, соединивъ ими распредѣлитель съ коммутаторомъ. Волна, возбужденная ударнымъ снарядомъ или впускомъ сжатого воздуха, раздѣлялась на двѣ волны, которыя, пробѣжавъ трубы — одна 67 мм., другая 34 мм., входили чрезъ коммутаторъ въ замыкатели. Такимъ образомъ опредѣлялась разность временъ пробѣговъ двухъ волнъ. Между трубою 34 мм. и распредѣлителемъ поставлена была суженная стеклянная трубка для уравненія напряженности волнъ. Длина трубы 67 мм. съ надставками равна 9,102 м.; соединительная при ней свинцовая трубка (3 мм.) — 0,108 м. Длина трубы 34 мм. съ надставками 8,807; соединительная свинцовая трубка съ стеклянной суженной трубкой 0,488 м. Пусть  $v$ —скорость звука въ трубѣ 67 мм.,  $v_1$ —скорость въ трубѣ 34 мм. и  $v_2$ —въ трубѣ 3 мм. Время, употребленное звукомъ, чтобы пробѣжать трубу 67 мм. съ ея придатками, будетъ:

$$\frac{9,102}{v} + \frac{0,108}{v_2} \quad (1)$$

Подобная величина для трубы 34 мм.

$$\frac{8,807}{v_1} + \frac{0,488}{v_2} \quad (2)$$

Чтобы выразить наблюденное число  $n$  дрожаній, надо раздѣлить его на 101,5, что, весьма близко, составитъ  $\frac{n}{100}$  ( $1 - 0,015$ ), или просто,  $\frac{n}{100}$ . Будемъ считать  $n$  положительнымъ, если количество (2) болѣе (1); такимъ образомъ, получимъ:

$$\frac{8,807}{v_1} + \frac{0,488}{v_2} - \frac{9,102}{v} - \frac{0,108}{v_2} = \frac{n}{100}$$

Придавъ къ обѣимъ частямъ равенства, для уравненія длины трубъ 67 мм. и 34 мм.,  $\frac{0,295}{v_1}$ , найдемъ

$$\frac{9,102}{v_1} - \frac{9,102}{v} = \frac{n}{100} - \frac{0,380}{v_2} + \frac{0,295}{v_1}$$

Первая часть равенства представляетъ разность временъ, которыя, должна употребить волна, чтобы пробѣжать трубы 67 мм. и 34 мм. въ діаметрѣ и 9,102 м. длины. Во второй части имѣ-

ются всё данные для вычисления этой разности: и наблюдается,  $v_2$  и  $v_1$  находятся по таблицам 3 и 4. Таким образом, составилась таблица 6; первая строка представляет давления в миллиметрах, вторая—разности времени в сотых долях секунды или, что почти все равно, в двойных дрожаниях камертона.

Таблица 6.

25,6	47,1	81,5	275,2	465,4	753,5
0,02	-0,01	-0,02	0,04	0,02	0,02

Числа нижней строки лежат в пределах погрешностей наблюдений. Следовательно, в трубах 34 мм. и 64 мм. в диаметре, звук распространяется, от обыкновенного давления до 25,6 мм., с одинаковыми скоростями <sup>1)</sup>. Дальнейшие опыты с трубой 67 мм. и более широкими я счел ненужными и повторил опыты, возможно тщательно, с трубой 34 мм., результаты которых помещены в таблицу 5.

Реньо нашел, что скорость звука в трубах, которых диаметр изменялся от 0,1 м. до 1,1 м., зависит от толщины трубы и увеличивается с возрастанием диаметра. Это несогласие с моими выводами я считаю только кажущимся и объясняю тем, что воздух труб Реньо был насыщен парами. Поэтому, все найденные Реньо скорости, были более надлежащих; влияние этой причины в узких трубах могло быть больше, чем в широких.

39) Из моих наблюдений я делаю следующие выводы:

Скорость звука в воздухе, заключенном в трубу, уменьшается с упругостью воздуха и тем в большей степени, чем труба тоньше.

Скорость звука в трубах, коих диаметр не менее 34 мм., одна и та же и равна скорости звука в свободном воздухе.

При уменьшении давления от 780,4 мм. до 282,4 мм. скорость остается приблизительно постоянною (табл. 5); при дальнейшем уменьшении давления, скорость уменьшается и тем быстрее, чем меньше давление. Закон этого изменения выражается таблицей 5 и не только для трубы в 34 м., для которой она

<sup>1)</sup> Подобные сравнительные изыскания были сделаны с трубами 16 мм. и 3 мм.; оказалось, что при всех давлениях скорость звука в первой больше, чем во второй.

составлена, но и для трубъ болѣе широкихъ и для открытаго пространства.

Трехчленная формула  $u = a + br + cr^2$  ( $u$ —скорость звука,  $r$ —упругость воздуха,  $a$ ,  $b$  и  $c$ —постоянные коэффициенты) не удовлетворяетъ числамъ таблицы 5.

Такъ какъ вторая часть формулы Лапласа

$$u = \sqrt{k \cdot \frac{p}{d}}$$

зависитъ отъ давленія, то или  $k$ , или  $\frac{p}{d}$ , или то и другое вмѣстѣ также измѣняются съ давленіемъ, и слѣдовательно, воздухъ при давленіяхъ ниже 280 мм. не слѣдуетъ закону Бойль-Мариотта. Въ какую сторону происходятъ эти отступленія, отсюда не видно, но принимая во вниманіе несомнѣнные выводы, полученные проф. Менделѣевымъ, слѣдуетъ заключить, что  $pv$ , съ уменьшеніемъ давленія, уменьшается, но только быстрѣе, чѣмъ слѣдуетъ изъ работы этого ученаго.

То же выходитъ изъ моихъ прежнихъ изслѣдованій.

Если допустить, что въ извѣстныхъ предѣлахъ формулой Лапласа позволительно руководиться, даже если газъ не повируется закону Бойль-Мариотта, то уменьшеніе скорости отъ 330 м. до 141 м., т. е. почти вдвое, нельзя будетъ приписать исключительно уменьшенію величины  $k$ , потому что она не можетъ быть менѣе 1. Если принять ея величину при обыкновенномъ давленіи равной 1,4, то скорость могла бы уменьшиться не болѣе какъ въ отношеніи  $\sqrt{1,4} : 1$ , т. е. въ 1,18 раза, иначе сказать, не могла бы потерять даже 0,2 своей величины. Слѣдовательно, необходимо допустить, что  $\frac{p}{d}$ , съ уменьшеніемъ упругости воздуха, уменьшается, и тѣмъ быстрѣе, чѣмъ менѣе давленіе.

Этими выводами мнѣ слѣдовало бы, можетъ быть, заключить отчетъ о моей работѣ, потому что ближайшая цѣль ея была изслѣдовать измѣненіе скорости звука съ уменьшеніемъ давленія, и цѣль эта была достигнута. Но я не считаю себя вправѣ на этомъ остановиться, хотя все нижеизложенное покажется многимъ сомнительнымъ и даже можетъ бросить тѣнь сомнѣнія на сдѣланные выше выводы. Дѣло въ томъ, что, приступая къ работѣ, я не надѣялся на точное опредѣленіе скорости и предполагалъ ограничиться относительными скоростями, припаявъ скорость при 18° и 760 мм. за 100 (табл. 3, 4 и 5). Но впоследствии, опредѣливъ

въ точности число дрожаній камертона, я вычислилъ абсолютныя величины скоростей; объ нихъ то и намѣренъ сказать нѣсколько словъ.

40. Скорость звука въ воздухѣ при 18° и обыкновенномъ давленіи (отъ 761,0 мм. до 766,5 мм.) оказалась 330 м. Раздѣливъ это число на  $\sqrt{1+0,00368.18}$ , получимъ, что скорость звука при 0° какъ для трубъ, коихъ діаметръ болѣе 34 мм., такъ и для свободнаго воздуха, равна 320 м. Эта скорость менѣе общепринятой на 3%. Какъ ни велики погрѣшности, свойственныя моему методу, но онѣ были случайныя и при большомъ числѣ наблюденій должны были сгладиться, какъ это видно изъ таблицъ 1 и 2. Число же наблюденій, изъ которыхъ выведена скорость около обыкновеннаго давленія (см. табл. 5), между 761,0 и 766,5 мм., равно 66; я могъ бы привести еще столько же наблюденій, произведенныхъ въ разное время надъ трубами 34 мм. и 67 мм., но входящихъ въ другія серіи наблюденій, не доведенныхъ до конца по неблагоприятнымъ случайностямъ, и давшихъ величины скорости, близкія къ 320 м., болѣе или менѣе. Такимъ образомъ, у меня составилось убѣжденіе, что истинная величина скорости звука мало отличается отъ 320 м. Реньо для трубы 0,1 м. въ діаметръ и длиной почти равной моимъ широкимъ трубамъ, именно 8,283 м., получилъ скорость для сухого воздуха еще менѣе: 295,20 м.<sup>1)</sup> Авторъ объясняетъ это запаздываніемъ автоматическихъ, воспринимавшихъ звуки, приборовъ. Не буду разбирать, на сколько такое объясненіе подходяще, замѣчу только, что къ моимъ опытамъ оно не примѣнимо, потому что погрѣшности, происходившія отъ запаздыванія замыкателей и пишущихъ снарядовъ, должны были компенсироваться вслѣдствіе перекрещиванія наблюденій и уравниванія напряженности волнъ. Въ длинныхъ трубахъ, наполненныхъ влажнымъ воздухомъ, Реньо нашелъ для трубы 1 метра въ діаметръ скорость болѣе, именно 330,7 м. Одна изъ причинъ такой большой скорости, какъ не разъ выше сказано, пересыщенный водяными парами воздухъ. Въ моихъ опытахъ надъ трубою въ 67 мм. получилось въ пользу влажнаго воздуха 0,05 двойнаго дрожанія; это составляетъ въ отношеніи всего числа дрожаній 2,85 (табл. 1 и 2) около 2% и было бы еще болѣе, если бы воздухъ содержалъ достаточное количество пара и воды. Если это такъ, то несогласіе между моимъ числомъ 320 и числомъ Реньо 330,7 исче-

---

<sup>1)</sup> Relation, t. III, p. 161.



заетъ. Кромѣ того, по другимъ, вышеупомянутымъ причинамъ, скорость 330,7 болѣе надлежащей.

41. Не только скорость 320 м., но даже 330,7 м. многіе ученые считаютъ слишкомъ малою на томъ основаніи, что это число не удовлетворяетъ другимъ опытнымъ даннымъ, съ которыми скорость звука имѣетъ теоретическую связь.

Одна изъ таковыхъ есть формула Лапласа

$$u = \sqrt{k \cdot \frac{pg}{d}}$$

Назвавъ чрезъ  $u_0$  Ньютонову скорость звука, получимъ

$$u_0 = \sqrt{\frac{pg}{d}}$$

Отсюда

$$k = \frac{u^2}{u_0^2}$$

принявъ по Реньо <sup>1)</sup>  $u_0 = 279,955$  и  $u = 330,6$ , найдемъ, что

$$k = 1,3945.$$

Взявъ на мѣсто 330,6, скорость 320, будемъ имѣть

$$k_1 = 1,3065.$$

Непосредственныя наблюденія дали: Клеманъ и Дезормъ—1,35, Ге-Люссавъ и Вельтеръ—1,37, Массонъ—1,42, Казень—1,41, Жаменъ и Рипаръ—1,41 — числа между собою не довольно согласныя; самыя надежныя изъ нихъ—болѣе 1,3945 и, по большей причинѣ, 1,3065. Мнѣ кажется этотъ критерій для сужденія о величинѣ скорости звука недостаточнымъ, во первыхъ, по тому, что экспериментальныя трудности не даютъ возможности опредѣлить въ точности величину  $k$ ; во вторыхъ, всѣ извѣстныя методы основаны на предположеніи, что воздухъ при обыкновенномъ давленіи вполне повинуется закону Бойль-Мариотта и Ге-Люссака, что не вѣрно. Далѣе, ни формула Ньютона, ни формула Лапласа не применимы къ несовершенному газу; входящая въ послѣднюю формулу величина  $k$  не есть уже отношеніе теплоемкости, а нѣчто другое.

Всѣ эти неточности, вѣроятно, не велики, но въ общей сложности могутъ составить такую величину, что всякое противорѣчіе между опытомъ и теоріею исчезнетъ не только въ отношеніи числа 330,7, но даже и для числа 320.

<sup>1)</sup> т. III, р. 557.

На основаніи тождества между теплотой и работой, можно вывести для идеальнаго газа известное равенство:

$$C - c = A p v \alpha.$$

$C$  и  $c$  — теплоемкости при постоянномъ давленіи и постоянномъ объемѣ,  $A$  — теплородный эквивалентъ работы,  $p$  — давленіе на единицу поверхности,  $v$  — удѣльный объемъ и  $\alpha$  — коэффициентъ расширенія. Отсюда выходитъ:

$$k = \frac{C}{c} = \frac{1}{1 - \frac{A p v \alpha}{C}}.$$

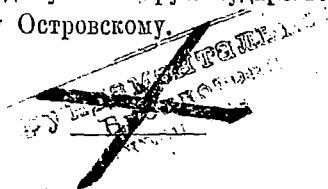
Примѣняя это уравненіе къ воздуху и полагая, что  $C = 0,23741$ ,  $A = \frac{1}{425}$ ,  $p = 10334$ ,  $v = \frac{1}{1,293}$  и  $\alpha = 0,00368$ , найдемъ

$$k = 1,411.$$

Этотъ теоретическій выводъ  $k$ , подобно первому, нельзя признавать основательнымъ, ибо предыдущее уравненіе предполагаетъ, что воздухъ вполне подчиняется законамъ Бойль-Мариотта и Гелюссака, чего въ дѣйствительности нѣтъ. Кроме того, коэффициентъ  $\frac{1}{A}$  въ точности неизвѣстенъ; результаты многочисленныхъ измѣреній содержатся между 345,6 и 488,5<sup>1)</sup>; по самымъ благонадежнымъ наблюденіямъ—между 425 и 433. Гирнъ отдааетъ предпочтеніе 432; наиболѣе же употребительно—425.

Такимъ образомъ, въ наукѣ не существуетъ данныхъ, изъ которыхъ можно было бы съ увѣренностью заключить, что число 330,7 и даже 320 менѣе истинной величины.

Эта работа произведена въ Горномъ Институтѣ, на средства Министерства Государственныхъ Имуществъ; считаю пріятнѣйшимъ долгомъ выразить мою искреннюю благодарность Его Высокопревосходительству, Господину Министру Государственныхъ Имуществъ, Михаилу Николаевичу Островскому.



<sup>1)</sup> Hirn. Théorie mécanique de la chaleur, p. 71.

604

Mc  
15416