

О ГИДРАВЛИЧЕСКОМЪ УДАРѢ  
ВЪ  
ВОДОПРОВОДНЫХЪ ТРУБАХЪ.

---

*Н. Е. Жуковского.*

---



МОСКВА.  
Типо - литографія „Русскаго Товарищества печатнаго и издательскаго дѣла“,  
Чистые пруды, Мыльниковъ пер. соб. домъ.  
1899.



# О ГИДРАВЛИЧЕСКОМЪ УДАРѢ

ВЪ

## ВОДОПРОВОДНЫХЪ ТРУБАХЪ.

*Н. Е. Жуковского.*

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана  
194854  
Жуковского Н.Е. О Гидравл



МОСКВА.

Типо - литографія „Русскаго Товарищества печатнаго и издательскаго дѣла“,  
Чистые пруды, Мыльниковъ пер. соб. домъ.  
1899.



М Г Т У  
им. Н.Э. БАУМАНА  
БИБЛИОТЕКА

О ГИДРАВЛИЧЕСКОМЪ АДЪЛЪ

ВЪР

ВОДОПРОВОДНЫХЪ ТРУБАХЪ

Н. Е. Мерзляковъ

Печатано по распоряженію Совѣта Политехническаго Общества. Вице-предсѣдатель профессоръ А. Гавриленко.



Всероссійское техническое общество  
Трубо-проводныя, Гидравлическія и прочія  
1880



М. П. В.  
АНУАЛЪ

## О гидравлическомъ ударѣ въ водопроводныхъ трубахъ \*).

Н. Е. Жуковского.

(Сообщено въ засѣданіи Политехническаго Общества 1898 г. марта 28).

§ 1. *Вступленіе.* Предлагаемое сочиненіе заключаетъ въ себѣ теоретическую обработку результатовъ наблюдений надъ ударами воды въ водопроводныхъ трубахъ. Эти наблюдения производились въ 1897 и 1898 году, по инициативѣ завідующаго Московскимъ водопроводомъ Н. П. Зимина, на Алексѣевской водокачкѣ инженерами: К. П. Карельскихъ, В. В. Ольденборгеромъ и Н. Н. Березовскимъ; руководство же наблюдениями было поручено мнѣ.

Опыты дѣлались надъ трубами 2,4 и 6 дюймовъ \*\*) въ діаметрѣ, положенными по поверхности земли на дворѣ водокачки и соединенными съ главной магистралію города Москвы, которая имѣетъ 24 дюйма въ діаметрѣ. Наблюдалось измѣненіе гидродинамическаго давленія въ трубѣ и распространеніе этого давленія вдоль трубы при прекращеніи теченія воды посредствомъ весьма быстраго закрытія задвижки при концѣ трубы. Эти опыты дали интересные результаты, которые, насколько мнѣ извѣстно, до сихъ поръ не указаны въ технической литературѣ. Оказалось, что всѣ явленія гидравлическаго удара объясняются возникновеніемъ и распространеніемъ въ трубахъ ударной волны, происходящей отъ сжатія воды и отъ расширенія стѣнокъ трубы.

\*) Эта статья перепечатана изъ Записокъ Императорской Академіи Наукъ.

\*\*) Такъ какъ діаметры трубъ выражаются въ цѣлыхъ числахъ дюймовъ, то за мѣру длины въ нашемъ сочиненіи приняты дюймы, футы и сажени.

§ 2. *Литература, относящаяся къ разсматриваемому вопросу.* Теоретическія изслѣдованія о распространеніи измѣненія гидродинамическаго давленія вдоль трубъ съ упругими стѣнками возникли, главнымъ образомъ, при объясненіи физиологическихъ (распространеніе пульса) и звуковыхъ явленій.

Для объясненія опытовъ, которые дѣлалъ *Marcy* надъ распространеніемъ напора воды вдоль каучуковыхъ трубъ, *Resal* \*) предложилъ весьма простой анализъ, принимая воду за тѣло несжимаемое. Онъ нашелъ, что скорость  $\lambda$  распространенія ударной волны вдоль трубы выражается формулою:

$$\lambda = \sqrt{\frac{Eeg}{2R\delta}},$$

гдѣ  $E$  есть модуль упругости каучука,  $e$ —толщина стѣнокъ трубы,  $g$ —напряженіе тяжести,  $2R$ —діаметръ трубы и  $\delta$ —плотность жидкости.

Болѣе полный анализъ того же явленія при отсутствіи сжатія воды, но принимая во вниманіе вліяніе инерціи стѣнокъ трубы и тренія жидкости, былъ сдѣланъ покойнымъ профессоромъ Громекою \*\*). Онъ далъ биквадратное уравненіе, корни котораго выражаютъ двѣ скорости распространенія волнъ.

\*) *H. Resal*, „Note sur les petits mouvements d'un fluide incompressible dans un tuyau élastique“. *Journal de Mathématiques pures et appliquées*. 1876.

\*\*) *И. Громека*, „О скорости распространенія волнообразнаго движенія жидкостей въ упругихъ трубахъ“. Казань. 1883.

Анализъ явления, принимая во вниманіе сжатіе воды (примѣнительно къ распространенію звука), сдѣлалъ Korteweg\*). Онъ даетъ, между прочимъ, слѣдующую приближенную формулу скорости звука въ упругой трубкѣ, наполненной жидкостью:

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}},$$

гдѣ  $\lambda_1$  есть скорость звука въ рассматриваемой жидкости, а  $\lambda_2$  — скорость волны въ несжимаемой жидкости, наполняющей трубу, опредѣленная по формулѣ, которую далъ Resal. Korteweg рассматриваетъ трубку, какъ упругую перепонку, и не обращаетъ вниманіе на силы упругости, на сгибаніе и срѣзываніе стѣнокъ трубы. Всѣ эти обстоятельства принявъ во вниманіе Lamb\*\*) въ его недавно появившейся работѣ о распространеніи звука въ трубкахъ, наполненныхъ жидкостью. Онъ выводитъ биквадратное уравненіе, изъ котораго можно опредѣлить двѣ скорости волны при рассматриваемомъ явленіи. При этомъ одинъ изъ корней упомянутого уравненія при не-  
большой толщинѣ трубы (не превосходящей  $\frac{1}{10}$  радіуса) близко подходит къ скорости, которую даетъ Korteweg.

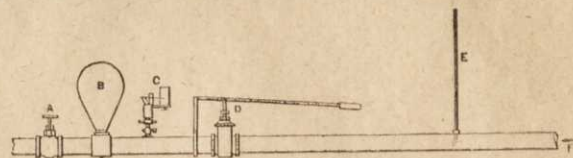
Задача техники объ распространеніи вдоль водопроводной трубы гидравлическаго удара, образующагося вслѣдствіе быстрого прекращенія истеченія воды изъ трубы, обыкновенно не ставилась въ связь съ вышеупомянутыми теоретическими изслѣдованіями.

Инженеры, которые занимались этою задачею, не обратили вниманія на то, что при весьма быстромъ закрытіи задвижки вода останавливается и давленіе поднимается только при задвижкѣ, и это состояніе воды передается по трубѣ по закону распространенія волнообразнаго движенія. Я полагаю, что упомянутое обстоятельство было упущено изъ виду потому, что наблюденія не дѣлались надъ длинными трубами; въ короткихъ же трубкахъ, въ виду громадной скорости распространенія ударной волны (около 4200 футъ), поднятіе давленія представляется происходящимъ вдоль всей трубы одновременно.

Въ 1890 году профессоръ Church\*\*\*) напечаталъ изслѣдованія надъ колебаніемъ напора воды возлѣ закрываемаго крана водопроводной трубы. Изслѣдователь полагаетъ, что наибольшій напоръ, наблюдаемый при этихъ колебаніяхъ, зависитъ отъ времени и способа закрытія крана (мы увидимъ ниже, что въ томъ случаѣ, когда время закрытія крана менѣе времени двойного пробѣга ударной волны отъ крана до магистрали, наибольшій напоръ зависитъ только отъ скорости истеченія воды).

Наиболѣе обстоятельныя изслѣдованія надъ гидравлическимъ ударомъ въ водопроводныхъ трубкахъ были сдѣланы по плану, который предложилъ профессоръ Carpen-

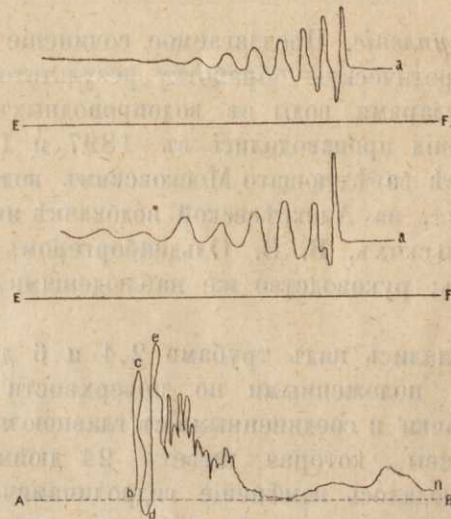
ter\*), студентами Sibley College. Наблюдался ударъ въ трубѣ, имѣющей въ діаметрѣ  $1\frac{1}{2}$  дюйма, при скорости истеченія воды, достигающей до 8,6 фута. Опыты были расположены, какъ представлено на фиг. 1.



Фиг. 1.

Вода подъ напоромъ 2 атмосферъ подавалась въ трубу AF отъ A къ F. Скорость истеченія регулировалась краномъ A и опредѣлялась съ помощію трубки Pitot E. Затворъ производился задвижкой D, которая закрывалась посредствомъ быстрого дѣйствія рукою на рычагъ. Измѣненіе давленія воды опредѣлялось съ помощію индикатора Crosby C, который вычерчивалъ діаграмму, при чемъ стрѣлка, изображенная на нашемъ схематическомъ рисункѣ, замѣнялась карандашомъ, пишущимъ по вращающемуся цилиндру. Передъ задвижкой D помѣщался воздушный колпакъ B, который поворотомъ около оси трубы внизъ могъ быть обращенъ въ водяной колпакъ и могъ быть также совсѣмъ снятъ.

Опыты производились съ воздушнымъ колпакомъ, съ водянымъ колпакомъ и безъ колпака. Этимъ тремъ случаямъ соотвѣтствуютъ виды діаграммъ верхней, средней и нижней, данные на фиг. (2).



Фиг. 2.

Начало первыхъ двухъ діаграммъ обозначено буквою a, начало же послѣдней буквою b. Самая плавная діаграмма есть верхняя, получаемая при воздушномъ колпакѣ; она имѣетъ изохронныя волны, постепенно понижающіяся съ возрастаніемъ времени. При увеличиваніи объема воздуха въ колпакѣ наибольшій напоръ при ударѣ уменьшался, но это уменьшеніе не было пропорціонально объему колпака. Для трубы безъ колпака получалась нижняя неправильная діаграмма. Ударъ въ этомъ случаѣ вызывалъ замѣтное дрожаніе трубы. На діаграм-

\*) Carpenter. „Some experiments on the effect of water hammer“. The Engineering Record. Vol. 30. 1894.

\*) D. Korteweg „Over Voortplanting-snelheid van golven in elastische buizen“. Leiden 1878.

\*\*) H. Lamb „Ueber die Geschwindigkeit des Schalles unter Einfluss der Elasticität der Wände“. Proceedings of the Manchester. Soc. 1898. Краткій отчетъ о работѣ см. въ Wiedemanns Beiblätter, Heft 9. 1898.

\*\*\*) Church. Journal of the Franklin Institute. 1890.

мѣ послѣ быстрого поднятія давленія на высоту *be* замѣчалось его паденіе, идущее ниже линіи атмосфернаго давленія *AB* до точки *d*, потомъ давленіе опять быстро поднималось до точки *e*, которая по большей части была выше точки *c*.

*Carpenter* не даетъ объясненія этихъ, на первый взглядъ, загадочныхъ измѣненій давленія и пользуется полученнымъ имъ метерьяломъ только для опредѣленія наибольшихъ давленій при различныхъ скоростяхъ истечения. Приводимъ здѣсь въ сокращенномъ видѣ таблицу этихъ давленій для трубы безъ колпака, при чемъ мы выражаемъ давленія въ атмосферахъ и вычитаемъ изъ нихъ 2 атм., чтобы получить избытокъ давленія противъ гидростатическаго.

| Скорость <i>v</i> въ футахъ. | Избытокъ давленія <i>P</i> въ атмосферахъ. |
|------------------------------|--------------------------------------------|
| 2,91                         | 4,3                                        |
| 3,35                         | 6,1                                        |
| 4,20                         | 7,7                                        |
| 5,05                         | 9,7                                        |
| 6,02                         | 13,3                                       |
| 7,07                         | 15,7                                       |
| 8,60                         | 17,3                                       |

Мы видимъ, что избытокъ давленія составляетъ приблизительно 2 атмосферы на каждый футъ потерянной при ударѣ скорости. Это число, какъ увидимъ ниже, менѣе того, которое получилось изъ опытовъ при Алексѣевской водокачкѣ. Надо предположить, что *Carpenter* употреблялъ для своихъ наблюденій трубки съ болѣе тонкими стѣнками, нежели мы, или что время затвора его рычажной задвижки было менѣе времени пробѣга ударною волною двойной длины трубы *DA*, считая отъ задвижки до магистралі. Последнее предположеніе мнѣ кажется вѣроятнымъ, такъ какъ всѣ вершины волнъ на діаграммахъ фиг. (2) заострены \*). Опыты, которыми руководилъ *Carpenter*, насколько мнѣ извѣстно, являются главными изслѣдованіями надъ ударомъ въ водопроводныхъ трубахъ.

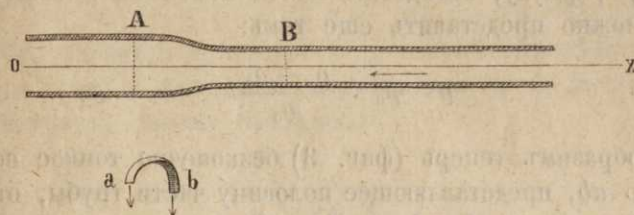
Остальные работы этого рода или относятся непосредственно къ гидравлическому тарану, или представляютъ приближенные теоретическія изслѣдованія, какъ, напримеръ, изслѣдованіе Menabrea \*\*).

\*) *Carpenter* опредѣляетъ изъ діаграммы время 0,03", протекшее отъ точки *b* начала поднятія давленія до его наибольшаго значенія въ точкѣ *e*, и предполагаетъ, что это есть время затвора. Я думаю, что это есть двойное время пробѣга ударною волною отъ задвижки до магистралі. Время же затвора у него, вѣроятно, болѣе 0,03".

\*\*) *Meissner*. Die Hydraulik und die hydraulischen Motoren. Jena 1870. Bd. I, S. 404.

### § 3. Примѣненіе формулы Korteweg'a къ явленію гидравлическаго удара.

Направимъ (фиг. 3) ось *ox* вдоль оси трубы навстрѣчу текущей водѣ, скорость которой будемъ считать положительной въ направленіи, обратномъ оси *ox*.



Фиг. 3.

Предположимъ, что вслѣдствіе быстрого закрытія задвижки при точкѣ *o* вода возлѣ этой задвижки останавливается, и эта остановка постепенно передается по трубѣ, при чемъ вода сжимается, а стѣнки трубы расширяются.

Выдѣлимъ мысленно массу воды *M*, заключенную между двумя смежными перпендикулярными сѣченіями трубы *A* и *B*, и напишемъ для этой массы теорему объ измѣненіи со временемъ количества движенія:

$$\pi R^2 p - \pi R'^2 p' + 2\pi \int_p^R \frac{\partial R}{\partial x} R dx = -M \frac{dv}{dt},$$

гдѣ *R* и *R'* суть внутренніе радіусы трубы въ сѣченіяхъ *A* и *B*, *p* и *p'* — гидродинамическія давленія въ этихъ сѣченіяхъ, а *v* скорость центра тяжести массы *M*. Предположивъ, что сѣченія *A* и *B* бесконечно близки и замѣнивъ массу *M* чрезъ  $\pi R^2 \rho dx$ , гдѣ  $\rho$  плотность жидкости, найдемъ, что

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{dv}{dt}. \quad (1)$$

Здѣсь *v* есть скорость въ разсматриваемомъ сѣченіи жидкости,  $\rho_0$  есть плотность воды до удара, которую мы пишемъ здѣсь вмѣсто  $\rho$  вслѣдствіе весьма малой сжимаемости воды, а полная производная по времени имѣетъ слѣдующее значеніе:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x}.$$

Опредѣлимъ теперь количество жидкости, вошедшей въ продолженіе элемента времени *dt* въ объемъ, заключенный между смежными сѣченіями *A* и *B*, и напишемъ:

$$\pi R'^2 \rho' v' - \pi R^2 \rho v - 2\pi \int \rho \frac{\partial R}{\partial t} R dx = \frac{M}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t},$$

откуда, переходя къ бесконечно близкимъ сѣченіямъ, получаемъ:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dt} + \frac{2}{R_0} \frac{dR}{dt}, \quad (2)$$

гдѣ *R*<sub>0</sub> значеніе *R* до удара.

Назовемъ чрезъ *k* модуль упругости воды (отношеніе увеличиванія давленія къ уменьшенію объема, отнесенное

къ единицѣ объема), чрезъ  $p_0$  — давленіе до удара и напишемъ:

$$p - p_0 = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)k.$$

Эту формулу, вслѣдствіе малой измѣняемости плотности, можно представить еще такъ:

$$p - p_0 = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}k. \quad (3)$$

Вообразимъ теперь (фиг. 3) бесконечно тонкое полукольцо  $ab$ , представляющее половину части трубы, отрѣзаемой нашими сѣченіями  $A$  и  $B$  при ихъ бесконечно близкомъ расположеніи, и выразимъ, что силы упругости, развивающіяся въ сѣченіяхъ  $a$  и  $b$  этого полукольца, равны суммѣ проекцій силъ давленія жидкости на средній радіусъ полукольца:

$$2dx e E \frac{R - R_0}{R_0} = 2R dx (p - p_0),$$

гдѣ  $e$  толщина стѣнокъ трубы, а  $E$  модуль упругости ея вещества. Вслѣдствіе малой измѣняемости  $R$  написанное равенство можетъ быть представлено въ такомъ видѣ:

$$p - p_0 = \frac{eE}{R_0^2} (R - R_0). \quad (4)$$

Опредѣляемъ величины  $\rho$  и  $R$  изъ форм. (3) и (4) и подставляемъ ихъ въ форм. (2):

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \left(1 + \frac{2R_0}{eE}\right) \frac{dp}{dt}.$$

Если для сокращенія письма положимъ, что

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_0}{k} + \frac{2R_0\rho_0}{eE}}}, \quad (5)$$

то написанная выше формула представится въ слѣдующемъ простомъ видѣ:

$$\lambda^2 \rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{dp}{dt}. \quad (6)$$

Формулы (1) и (6) рѣшаютъ вопросъ о распространеніи ударной волны въ трубѣ. Раскрывая въ нихъ полныя производныя по времени, будемъ имѣть:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \rho_0 \left( \frac{\partial v}{\partial t} - v \frac{\partial v}{\partial x} \right), \\ \lambda^2 \rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} &= \frac{\partial p}{\partial t} - v \frac{\partial p}{\partial x}. \end{aligned} \quad (7)$$

Согласно способу изслѣдованія, который предложилъ Riemann \*), умножаемъ первое изъ этихъ уравненій сперва на  $\lambda$ , потомъ на  $-\lambda$ , и оба раза складываемъ со вторымъ. Получаемъ:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (p + \rho_0 \lambda v) &= (\lambda + v) \frac{\partial}{\partial x} (p + \rho_0 \lambda v), \\ \frac{\partial}{\partial t} (p - \rho_0 \lambda v) &= -(\lambda - v) \frac{\partial}{\partial x} (p - \rho_0 \lambda v). \end{aligned} \quad (8)$$

Введемъ для сокращенія письма обозначенія:

$$\begin{aligned} 2s &= p - \rho_0 \lambda v, \\ 2r &= p + \rho_0 \lambda v \end{aligned} \quad (9)$$

и замѣтимъ, что на основаніи форм. (8)

$$\begin{aligned} ds &= \frac{\partial s}{\partial x} dx + \frac{\partial s}{\partial t} dt = \frac{\partial s}{\partial x} [dx - (\lambda - v)dt], \\ dr &= \frac{\partial r}{\partial x} dx + \frac{\partial r}{\partial t} dt = \frac{\partial r}{\partial x} [dx + (\lambda + v)dt]. \end{aligned} \quad (10)$$

Эти уравненія показываютъ, что значеніе функціи  $s$  переносится вдоль трубы въ положительную сторону оси  $ox$  со скоростью волны  $\lambda - v$ , а значеніе функціи  $r$  переносится въ прямо противоположную сторону со скоростью  $\lambda + v$ . Обѣ эти скорости не равны между собою и переменны вслѣдствіе измѣняемости  $v$ ; но въ разсматриваемыхъ нами опытахъ  $v$  не болѣе 10 футовъ, тогда какъ постоянная величина  $\lambda$ , какъ будетъ показано ниже, около 4200 фут. Вслѣдствіе этого мы можемъ, дѣлая очень малую ошибку, сказать, что значенія обѣихъ функцій  $s$  и  $r$  переносятся: одна въ положительную сторону оси  $ox$ , а другая въ отрицательную сторону ея съ постоянною скоростью  $\lambda$ . Эта мысль выражается математически слѣдующими формулами:

$$\begin{aligned} s &= \frac{p_0 + v_0 \rho_0 \lambda}{2} - \rho_0 \lambda F(x - \lambda t), \\ r &= \frac{p_0 + v_0 \rho_0 \lambda}{2} - \rho_0 \lambda F_1(x + \lambda t), \end{aligned} \quad (11)$$

гдѣ  $F$  и  $F_1$  нѣкоторыя произвольныя функціи, а постоянныя величины и множители прибавлены для удобства дальнѣйшихъ выводовъ.

Зная  $s$  и  $r$ , мы можемъ на основаніи форм. (9) опредѣлить во всякой точкѣ трубы и во всякое время  $v$  и  $p$ . Эти функціи будутъ:

$$\begin{aligned} v &= F(x - \lambda t) - F_1(x + \lambda t), \\ p - p_0 &= (v_0 - F(x - \lambda t) - F_1(x + \lambda t)) \rho_0 \lambda. \end{aligned} \quad (12)$$

Входяція сюда произвольныя функціи  $F$  и  $F_1$  должны быть опредѣлены по начальному состоянію теченія жидкости и по граничнымъ условіямъ въ концахъ трубы.

Скорость распространенія ударной волны  $\lambda$  будетъ дана формулою (5). Если бы стѣнки трубы были нерастяжимы, то мы должны бы положить  $E = \infty$  и тогда получили бы для скорости ударной волны величину:

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{k}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{kg}{\delta}}, \quad (13)$$

гдѣ  $\delta$  плотность жидкости, отнесенная къ вѣсу, а  $g$  напряженіе тяжести. Это есть скорость распространенія звука въ свободной жидкости. Если же, наоборотъ, мы бы имѣли несжимаемую жидкость, то надо-бы положить  $k = \infty$ , и мы нашли бы формулу:

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{eE}{2R_0\rho_0}} = \sqrt{\frac{eEg}{2R_0\delta}}, \quad (14)$$

которую вывелъ Resal для скорости распространенія измѣненія давленія несжимаемой жидкости вдоль упругой трубы.

\*) Riemann. „Ueber die Fortpflanzung ebener Luftwellen von endlicher Schwingungsweite“. Gesammelte Werke, 1876, S. 145.

Въ предположеніи сжимаемости жидкости и расширяемости стѣнокъ трубы мы получаемъ форм. (5), которой можно дать слѣдующій простой видъ:

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}} = \lambda_1 : \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Эта есть формула, которую даетъ *Korteweg* для распространения звука; сказанное доказываетъ, что она можетъ быть примѣнена и къ гидравлическому удару.

Замѣтимъ еще, что вошедшая въ нашъ анализъ форм. (4) является приближенною, такъ какъ при выводѣ ея мы не обратили вниманія на силы упругости, развивающіяся въ стѣнкахъ нашего полукольца, перпендикулярныхъ оси трубы, и на силы инерціи вещества полукольца при его движеніи.

Первое обстоятельство не должно оказывать замѣтнаго вліянія при наблюденіяхъ надъ водопроводными трубами, такъ какъ послѣднія стѣкаются изъ большого числа отдѣльных частей, которыя могутъ быть разсматриваемы, какъ упругія кольца конечной длины. Что касается до силъ инерціи вещества трубы, то при имѣющемся въ наблюденіяхъ времени затвора вліяніе этихъ силъ является совершенно ничтожнымъ сравнительно съ эффектомъ силъ упругости трубы. Дѣйствительно, если принять во вниманіе силы инерціи вещества трубы, то форм. (4) должна быть замѣнена слѣдующею:

$$p - p_0 = \frac{eE}{R_0^2} (R - R_0) + e \rho_1 \frac{d^2 R}{dt^2},$$

гдѣ  $\rho_1$  плотность чугуна. Время закрытія задвижки, при всемъ нашемъ стараніи сдѣлать по возможности короткимъ, не могло быть сдѣлано меньше какъ 0,02"; поэтому за наибольшее значеніе ускоренія  $\frac{d^2 R}{dt^2}$  надо считать величину:

$$\frac{2(R - R_0)}{(0,02)^2} = 5000(R - R_0).$$

Подставляя это въ вышеннаписанную формулу, представимъ ее на основаніи форм. (14) въ такомъ видѣ:

$$p - p_0 = 2e_0(R - R_0)R_0 \left\{ \left( \frac{\lambda_2}{R_0} \right)^2 + \frac{e}{2R_0} \frac{\rho_1}{\rho_0} 5000 \right\}.$$

Для трубы въ 2 дюйма въ діаметрѣ  $\lambda_2$ , какъ будетъ показано въ концѣ этого параграфа, около 1834 сажени, такъ что

$$\left( \frac{\lambda_2}{R_0} \right)^2 = (154056)^2,$$

а

$$5000 \cdot \frac{e}{2R_0} \frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{1}{6} \cdot 7,8 \cdot 5000 = 6500.$$

Второе число, выражающее вліяніе инерціи, является совершенно ничтожнымъ сравнительно съ первымъ. Этимъ объясняется то обстоятельство, что при всѣхъ нашихъ наблюденіяхъ индикаторы ни разу не обнаруживали давленій жидкости, передаваемыхъ по трубѣ съ двумя различными скоростями, о которыхъ говоритъ *Lamb* и профессоръ *Громека*.

Величина  $\lambda_1$  представляетъ скорость распространения звука въ свободной жидкости, т. е. въ нашемъ случаѣ въ водѣ. Эта скорость, какъ извѣстно, равна 1435 метра или 673 сажени, поэтому мы будемъ брать:

$$\lambda_1 = 673 \text{ сажени.}$$

Что касается до скорости  $\lambda_2$ , то она опредѣляется по форм. (14) и выходитъ различна для трубъ различныхъ діаметровъ, потому что дробь

$$\frac{e}{2R_0},$$

входящая въ упомянутую формулу, по правиламъ, установленнымъ въ практикѣ, берется тѣмъ меньше, чѣмъ діаметръ трубы болѣе.

Въ таблицахъ, данныхъ на Московскомъ водопроводномъ съѣздѣ, имѣемъ для трубъ, употребляемыхъ въ Россіи, слѣдующія соотношенія между діаметромъ и толщиною:

| $2R_0$<br>въ дюймахъ. | $e$<br>въ дюймахъ. | $\sqrt{\frac{e}{2R_0}}$            |
|-----------------------|--------------------|------------------------------------|
| 2                     | $\frac{10}{32}$    | $\frac{1}{8} \sqrt{10}$            |
| 4                     | $\frac{11}{32}$    | $\frac{1}{8} \sqrt{\frac{11}{2}}$  |
| 6                     | $\frac{13}{32}$    | $\frac{1}{8} \sqrt{\frac{13}{3}}$  |
| 24                    | $\frac{22}{32}$    | $\frac{1}{8} \sqrt{\frac{11}{12}}$ |

Вычислимъ скорость  $\lambda_2$  для трубы діаметромъ въ 2 дюйма и выразимъ эту скорость сначала въ метрахъ. Модуль упругости для чугуна, изъ котораго дѣлаютъ водопроводныя трубы, можно принять около 1000000 килограммовъ на квадратный сантиметръ или  $10^{10}$  килограммовъ на квадратный метръ, такъ что

$$E = 10^{10}.$$

Полагая въ форм. (14)

$$g = 9,8, \quad s = 1000,$$

найдемъ для трубы въ 2 дюйма по приведенной таблицѣ

$$\lambda_2 = \frac{1}{8} \sqrt{\frac{10^{11} \cdot 9,8}{10^3}} = \frac{10000}{8} \sqrt{9,8} = 3913 \text{ метра.}$$

Такимъ образомъ для трубы въ 2 дюйма въ діаметрѣ

$$\lambda_2 = 1834 \text{ сажени.}$$

Если эту величину  $\lambda_2$  умножить соответственно на

$$\sqrt{\frac{11}{20}}, \quad \sqrt{\frac{13}{30}}, \quad \sqrt{\frac{11}{120}},$$

то получим скорости  $\lambda_2$  для трубъ въ 4, 6 и 24 дюйма; пользуясь же формулою (15), опредѣлимъ по  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  величину  $\lambda$ .

Въ нижеслѣдующей таблицѣ даны величины  $\lambda_2$  и  $\lambda$  для трубъ четырехъ рассматриваемыхъ діаметровъ.

| $2R_2$<br>въ дюй-<br>махъ. | $\lambda_2$<br>въ саже-<br>няхъ. | $\lambda$<br>въ саже-<br>няхъ. |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 2                          | 1834                             | 632                            |
| 4                          | 1360                             | 604                            |
| 6                          | 1207                             | 588                            |
| 24                         | 555                              | 428                            |

#### § 4. Теоретическія опредѣленія наибольшаго увеличенія давленія во время гидравлическаго удара.

Послѣ момента закрытія задвижки въ точкѣ  $o$  при концѣ трубы (фиг. 3) вдоль трубы будетъ, какъ явствуетъ изъ сказаннаго въ § 2, передаваться со скоростью  $\lambda$  фаза, соответствующая скорости пуль и наибольшему подъему давленія  $p - p_0$ . Пусть сѣченія  $A$  и  $B$  въ нашей трубѣ расположены въ данный моментъ времени такъ, что въ сѣченіи  $A$  скорость жидкости есть нуль и давленіе есть наибольшее давленіе  $p$ , а въ сѣченіи  $B$  скорость жидкости есть  $v_0$  и давленіе есть давленіе до удара  $p_0$  (мы предполагаемъ сначала для простоты разсужденія, что давленіе до удара одинаково во всей трубѣ).

Количество жидкости, прошедшее чрезъ сѣченіе  $B$  и равное

$$\pi R_0^2 v_0 dt,$$

помѣстится въ пространствѣ между сѣченіями  $B$  и  $A$  потому, что во время  $dt$  точка, съ которой начинается деформация трубы и измѣненіе плотности  $\varrho$ , подвинется вправо на пространство  $\lambda dt$ . Освободившійся отъ этой причины объемъ будетъ:

$$\pi(R^2 - R_0^2)\lambda dt + \pi R_0^2 \left( \frac{\varrho - \varrho_0}{\varrho_0} \right) \lambda dt.$$

Сравнивая между собою оба объема и пользуясь соотношеніями (3) и (4), найдемъ, что

$$v_0 = (p - p_0) \left( \frac{2R_0}{eE} + \frac{1}{k} \right) \lambda.$$

Изъ этой формулы опредѣляется искомая величина  $p - p_0$  приращенія давленія отъ удара, которую мы будемъ обозначать чрезъ  $P$ :

$$P = \frac{v_0}{\lambda \left[ \frac{2R_0}{eE} + \frac{1}{k} \right]}.$$

На основаніи форм. (5) это равенство преобразуется такъ:

$$P = \frac{v\lambda g}{g}. \quad (16)$$

Мы видимъ такимъ образомъ, что приращеніе давленія въ трубѣ отъ гидравлическаго удара прямо пропорціонально скорости, потерянной на ударъ, и скорости распространенія волны въ трубѣ.

Формула (16) можетъ быть точно также выведена и изъ теоремы живыхъ силъ.

Пусть длина трубы есть  $l$ . Вся живая сила воды, наполняющей трубу, будетъ:

$$\pi R_0^2 \varrho_0 l \frac{v^2}{2}.$$

Эта живая сила потратилась на работу расширенія трубы и сжатія воды.

Такъ какъ первоначальное давленіе  $p_0$  уравновѣшено давленіями стѣнокъ трубы и упругости воды, то работу будетъ производить приращеніе давленія, которое измѣняется отъ нуля до  $P$ . Работа на расширеніе стѣнокъ трубы будетъ по форм. (4):

$$2\pi R_0 l \int P d(R - R_0) = \frac{2\pi R_0^3}{eE} l \int P dP = \frac{\pi l R_0^3}{eE} P^2,$$

подобнымъ же образомъ работа на сжатіе воды на основаніи форм. (3) выразится такъ:

$$\frac{\pi R^2 l}{\varrho_0} \int P d(\varrho - \varrho_0) = \frac{\pi R^2 l}{k} \int P dP = \frac{\pi R^2 l}{2k} P^2.$$

Приравнивая сумму этихъ работъ вышенаписанной потерянной живой силѣ, найдемъ:

$$\varrho^2 v^2 = \left[ \frac{2R_0 \varrho}{eE} + \frac{\varrho}{k} \right] P^2,$$

откуда на основаніи форм. (5) сейчасъ же получимъ форм. (16).

Величина

$$\frac{v\lambda}{g},$$

входящая въ форм. (16), выражаетъ намъ высоту столба воды, соответствующую опредѣляемому давленію  $P$ . Если выразимъ эту высоту въ футахъ и раздѣлимъ на 34 (средняя высота атмосфернаго давленія), то найдемъ число атмосферъ  $h$ , на которое прирастаетъ давленіе на каждый футъ потерянной скорости. Полагая что,  $g=32$  футамъ, а скорость  $\lambda$  выражена въ саженьяхъ, получимъ для опредѣленія  $h$  формулу:

$$h = \frac{7\lambda}{1088}. \quad (17).$$

По этой формулѣ составляемъ слѣдующую теоретическую табличку величинъ  $h$ :

| 2R въ<br>дюймахъ. | h въ<br>атмосферахъ. |
|-------------------|----------------------|
| 2                 | 4,066                |
| 4                 | 3,886                |
| 6                 | 3,783                |
| 24                | 2,754                |

Первые три числа этой таблицы близки къ 4, такъ что на основаніи теоретическихъ соображеній слѣдуетъ для трубъ 2, 4, 6 дюймовъ ожидать 4 атмосферы добавочнаго давленія на каждый футъ потерянной скорости.

§ 5. Теоретическое опредѣленіе вида ударной диаграммы въ различныхъ точкахъ трубы.

Задача о видѣ диаграммы, которую вслѣдствіе быстрого прекращенія истеченія воды будетъ вычерчивать карандашъ индикатора, соединеннаго съ трубою въ какой-нибудь ея точкѣ, рѣшается чрезъ опредѣленіе произвольныхъ функцій, входящихъ въ формулу (12). Это опредѣленіе должно быть сдѣлано такъ, чтобы удовлетворить заданнымъ значеніямъ  $v$  и  $p$  во всѣхъ точкахъ трубы въ начальный моментъ времени и условіямъ, которыми стѣснены  $v$  и  $p$  при концѣ и началѣ трубы, за все время послѣ начала закрытія задвижки. Въ начальный моментъ времени вдоль всей трубы  $v$  имѣетъ постоянное значеніе  $v_0$ ; мы будемъ сначала принимать для простоты, что и величина  $p_0$  вдоль всей трубы при этомъ постоянна и мало отличается отъ давленія въ магистральной \*), съ которою труба соединена (это приблизительно имѣетъ мѣсто, когда вода истекаетъ изъ трубы при мало открытой задвижкѣ). Если  $\tau$  будетъ время затвора, то отъ момента закрытія задвижки за время  $\tau$ , скорость  $v$  при концѣ трубы будетъ выражаться нѣкоторою функціею времени:

$$v = f(t),$$

зависящею отъ способа закрыванія задвижки. Эта функція за время  $\tau$  убываетъ отъ  $v_0$  до 0. По истеченіи времени  $\tau$  будемъ для всего дальнѣйшаго времени имѣть при концѣ трубы  $v = 0$ . При началѣ трубы, считая магистраль очень большого діаметра сравнительно съ трубою, будемъ все время имѣть постоянное давленіе  $p = p_0$ . Для большого удобства мы будемъ вмѣсто величины  $p$ , разсматривать величину  $P = p - p_0$  и скажемъ относительно нея, что она въ начальный моментъ равна нулю вдоль всей трубы и все время равна нулю у начала трубы при магистралі.

Будемъ предполагать, что величины  $v$  и  $P$ , данныя форм. (12), слагаются изъ суммы величинъ:

$$\text{гдѣ} \quad v = v_1 + v_2, \quad P = P_1 + P_2,$$

$$v_1 = F(x - \lambda t),$$

$$P_1 = \rho \lambda [(v_0 - F(x - \lambda t))]$$

$$v_2 = -F_1(x + \lambda t),$$

$$P_2 = -\rho \lambda F_1(x + \lambda t) \quad (19).$$

\*) Въ § 11 будетъ показано, какъ отражается на видѣ индикаторной диаграммы то обстоятельство, что гидродинамическое давленіе падаетъ отъ начала къ концу трубы.

Фаза состояній  $v_1$  и  $P_1$  будетъ передаваться по трубѣ вправо съ скоростью  $\lambda$  и будетъ называема нами *правою волною*; а фаза состояній  $v_2$  и  $P_2$  будетъ передаваться по трубѣ со скоростью  $\lambda$  лѣво и будетъ называться нами *лѣвою волною*.

Если длина трубы есть  $l$ , то функція  $F$ , опредѣляющая правую волну, должна быть найдена для всѣхъ значеній аргумента отъ  $l$  до  $-\infty$ , а функція  $F_1$ , опредѣляющая лѣвую волну, должна быть найдена для всѣхъ значеній аргумента отъ 0 до  $+\infty$ .

Дадимъ здѣсь графическое построеніе этихъ функцій, или, что все равно, построимъ диаграммы правой и лѣвой волны.

Пусть

$$cb = \frac{l}{\lambda}$$

представляетъ выраженную во времени пробѣга ударною волною длину трубы (фиг. 4). Примемъ отрѣзокъ  $cb$  за половину основанія прямоугольника  $abde$ , высота котораго будетъ:

$$co = v_0.$$

Построимъ кривую  $cf$ , ординаты которой отсчитываются внизъ отъ горизонтали  $oe$  и выражаютъ скорости воды у задвижки за время затвора

$$v = f(t) = F(-\lambda t),$$

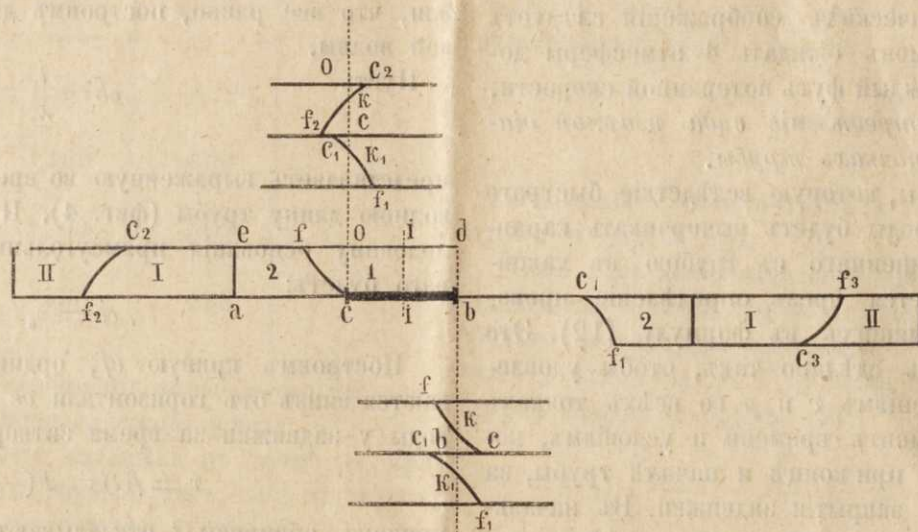
причемъ абсциссы  $t$  откладываются по  $oe$  отъ  $o$  къ  $e$ , такъ что  $of = \tau$ .

Кривая  $cf$  раздѣлитъ нашъ прямоугольникъ  $abde$  на двѣ фигуры (1) и (2).

Изъ этихъ фигуръ и складываются диаграммы, которыя представляютъ правую и лѣвую волну. На чертежѣ (4) римскими цифрами (I) и (II) обозначаются упомянутыя фигуры въ томъ случаѣ, если ихъ пришлось положить на плоскость чертежа стороною, противоположною той, какою онѣ лежатъ на плоскости, составляя прямоугольникъ  $abde$ . Надъ горизонтальною, проходящею чрезъ трубу  $cb$ , помѣщена на фигурѣ (4) диаграмма правой волны, которая составлена послѣдовательно изъ контуровъ: (2), (I), (II), (1),...; подъ упомянутою горизонтальною помѣщена диаграмма лѣвой волны, которая составлена послѣдовательно изъ контуровъ: (2), (I), (II), (1),..., причемъ  $c_1b = cb$ . Величины  $v$  въ правой волнѣ даются вертикальными разстояніями горизонтали  $ed$  отъ точекъ линіи  $befc_1f_2 \dots$ , а давленія  $P$  даются, согласно форм. (18), разстояніями упомянутой линіи отъ горизонтали  $ab$ , умноженными на  $\rho \lambda$ . Величины  $v$  въ лѣвой волнѣ даются отрицательными значеніями разстояній отъ горизонтали  $ab$  точекъ линіи  $cc_1f_1c_2f_3 \dots$ , а давленія  $P$ , согласно форм. (19), даются отрицательными значеніями тѣхъ же разстояній, умноженными на  $\rho \lambda$ .

Легко увидѣть, что построенныя нами диаграммы правой и лѣвой волны удовлетворяютъ всѣмъ вышеупомянутымъ начальнымъ и граничнымъ условіямъ. Дѣйствительно, предположивъ, что эти диаграммы движутся со скоростью, равной единицѣ (единица скорости по горизонталі  $cb$  соотвѣтствуетъ скорости  $\lambda$  по длинѣ трубы) одна направо, другая налѣво, найдемъ для начального

момента времени вдоль всей трубы  $cb$  скорость  $v=0$ , и давление  $P=0$ ; далее, начиная от момента закрытия задвижки, получим при ней скорость, представленную расстояниями точек кривой  $cf$  от горизонтали  $ed$ , т. е. изменяющуюся по заданному закону  $f(t)$ . После полного закрытия задвижки вдоль трубы  $cb$  будет передаваться скорость  $v=0$  и давление  $P=v_0\varrho\lambda$ . В тот момент, когда точка  $c$  правой волны подойдет к началу  $b$  трубы, к этой же точке подойдет и точка  $c_1$  левой волны. С этого момента начнется сложение положительного давления  $\varrho\lambda bk$  (см. фиг. 4 под точкою  $b$ ),



Фиг. 4.

приносимаго правою волною, съ отрицательнымъ давлениемъ —  $\varrho\lambda bk_1$ , приносимымъ лѣвою волною. Такъ какъ  $bk=bk_1$ , то это сложение будетъ давать для значения  $P$  при началѣ трубы величину  $P=0$ ; то же будетъ продолжаться имѣть мѣсто, когда правая волна будетъ приносить къ точкѣ  $b$  значение  $P_1=v_0\varrho\lambda$ , а лѣвая  $P_2=-v_0\varrho\lambda$ . Когда точка  $c_2$  правой волны подойдетъ къ точкѣ  $o$ , а точка  $c_1$  лѣвой волны подойдетъ къ точкѣ  $c$  (см. фиг. 4 надъ точкою  $c$ ), то при концѣ трубы  $c$  начнется сложение положительной скорости  $ok$ , приносимой правой волною, съ отрицательною скоростью  $ck_1$ , приносимою лѣвою волною (см. фиг. 4 надъ точкою  $c$ ). Такъ какъ во всякій моментъ времени  $ok=ck_1$ , то все время при задвижкѣ  $v=0$ ; то же будетъ продолжаться имѣть мѣсто, когда правая волна будетъ приносить къ задвижкѣ скорость  $v_0$ , а лѣвая — скорость  $-v_0$ . Продолжая разсуждать такимъ образомъ, убѣдимся, что за все время послѣ удара при началѣ трубы будемъ имѣть  $P=0$ , а при концѣ  $v=0$ . Построимъ теперь діаграмму индикатора для какой-нибудь точки трубы, отстоящей отъ конца трубы на разстояніи  $\xi$ . Пусть  $ci$  будетъ это разстояніе, выраженное во времени его пробѣга ударной волной:

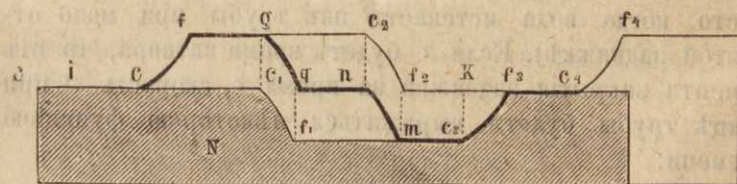
$$ci = \frac{\xi}{\lambda}.$$

Мы должны бы были для желаемой цѣли къ каждой величинѣ  $P$ , взятой (фиг. 4) на діаграммѣ лѣвой волны на разстояніи  $t$  вправо отъ  $i$ , придать алгебраически величину  $P$ , взятую съ діаграммы правой волны на разстояніи  $t$  влѣво отъ  $i$ ; но вмѣсто этого мы можемъ просто вообразить,

что чертежъ (4) перегнуть около вертикали  $ii$  и лѣвая его половина наложена на правую. При этомъ симметричныя относительно оси  $ii$  точки прямой  $if_3$  и прямой  $if_2$  совпадутъ, какъ это представлено на фиг. (5), на которой контуры діаграммъ лѣвой и правой волны обозначены тѣми же буквами, какими они обозначены на фиг. (4).

Мы видимъ, что діаграмма индикатора будетъ имѣть видъ зачерненной линіи  $cf g q n m c_3 f_3 c_4$ . Можно дать удобный практическій способъ построения такихъ діаграммъ для различныхъ точекъ трубы. Надо сдѣлать

линейку  $N$  и обрѣзать ее сверху по контуру  $cc_1 f_1 c_3 f_3 c_4$  лѣвой волны; потомъ начертить на бумагѣ повернутую



Фиг. 5.

слѣва направо правую волну  $cf c_2 f_2 c_4 f_4$  и приложить къ ней линейку, какъ показано на фигурѣ, при чемъ

$$cc = 2\frac{\xi}{\lambda}.$$

Соображая послѣ этого алгебраическую сумму  $P_1 + P_2$  въ соответственныхъ точкахъ, мы сейчасъ же вычертимъ контуръ  $cf g q n m c_3 f_3 c_4$ , представляющій діаграмму индикатора (ординаты контура надо умножить на  $\varrho\lambda$ ). Длина этого контура по направленію прямой  $P=0$  будетъ:

$$cc_4 = \frac{4l}{\lambda},$$

т. е. представить учетверенное время пробѣга ударною волною всей трубы, при чемъ изъ даннаго построения видно, что съ теченіемъ времени указанная діаграмма будетъ періодически повторяться.

Замѣтивъ, что проекціи кривыхъ  $cf, c_1 f_1, \dots$  на направление  $cc$  равны времени затвора  $\tau$ , найдемъ для различныхъ частей нашей діаграммы слѣдующія величины:

$$\begin{aligned}
 cc_1 &= nk = \frac{2(l-\xi)}{\lambda}, \\
 fg &= mc_2 = \frac{2(l-\xi)}{\lambda} - \tau, \\
 c_1n &= kc_4 = \frac{2\xi}{\lambda}, \\
 qn &= f_3c_4 = \frac{2\xi}{\lambda} - \tau.
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Изъ первой формулы слѣдуетъ, что время, протекающее отъ начала поднятія давленія  $P$  до начала его паденія, равно двойному времени пробѣга ударною волною разстоянія отъ индикатора до магистралі.

Это положеніе принято нами въ основаніе метода опредѣленія  $\lambda$ , при чемъ діаграммы снимались по большей части у задвижки, и  $\lambda$  получалась чрезъ раздѣленіе двойной длины трубы на упомянутое время.

Когда индикаторъ поставленъ настолько близко къ концу трубы, что

$$\frac{2\xi}{\lambda} < \tau,$$

тогда на діаграммѣ не получается прямыхъ  $qn$  и  $f_3c_4$  нулевого значенія  $P$ ; равнымъ образомъ, когда онъ поставленъ настолько близко къ началу трубы, что

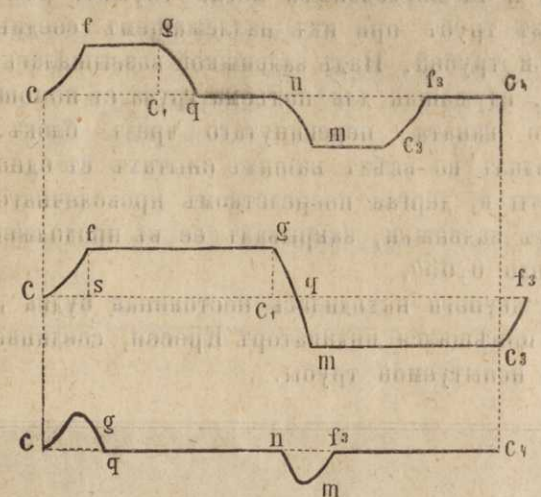
$$\frac{2(l-\xi)}{\lambda} < \tau,$$

то не получается прямыхъ  $fg$  и  $mc_2$  наибольшаго положительнаго и отрицательнаго  $P$ .

Такимъ образомъ въ разсматриваемой задачѣ могутъ существовать три вида діаграммъ, изображенныхъ на фиг. (6).

Діаграммы, снимаемая при задвижкѣ, имѣютъ всегда второй видъ, при этомъ слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что въ этомъ случаѣ первая діаграмма не вполне симметрична съ послѣдующими періодически повторяемыми діаграммами, такъ какъ проекція на прямую  $P=0$  кривой  $cf$  есть  $\tau$ , проекции же на эту прямую  $gq$ ,  $mq$  и

$c_3f_3$  есть  $\frac{\tau}{2}$ ; въ послѣдующихъ же діаграммахъ проекція всѣхъ четырехъ упомянутыхъ боковъ суть  $\frac{\tau}{2}$ . На третьей діаграммѣ выступъ и впадина уменьшаются съ приближе-



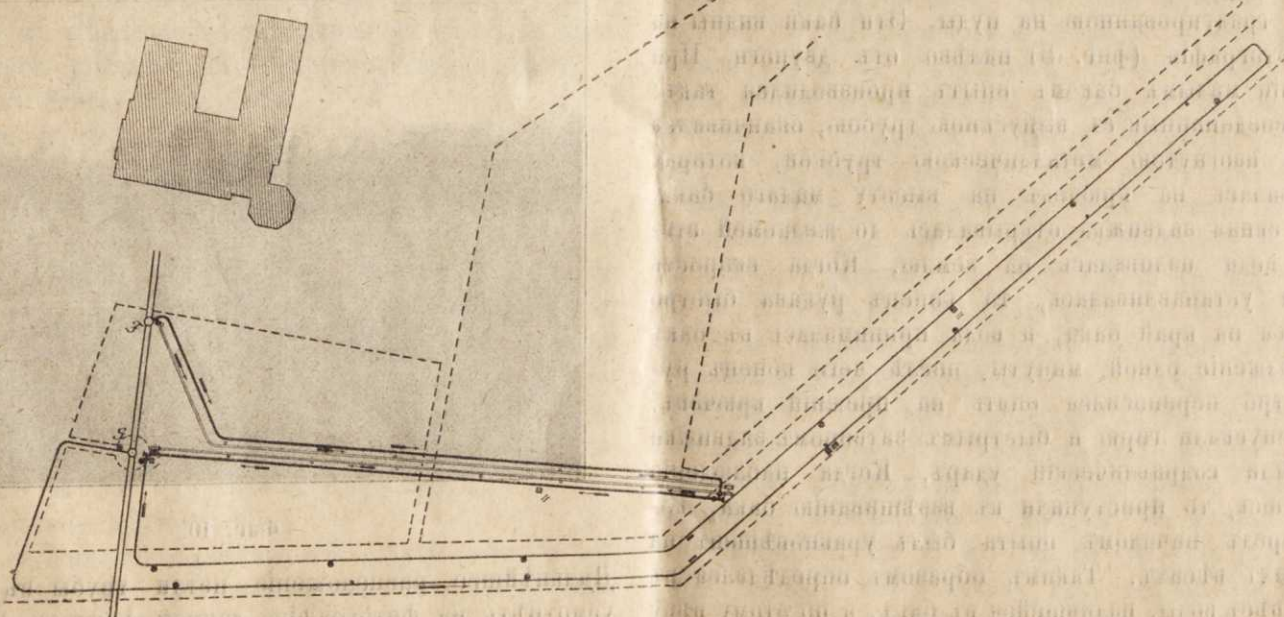
Фиг. 6.

ніемъ къ началу трубы, и при самомъ началѣ индикаторъ долженъ намъ дать прямую  $P=0$ .

§ 6. Расположеніе наблюдений надъ гидравлическимъ ударомъ при Алексѣевской водокачкѣ.

Три системы трубъ, діаметрами въ 4, 6 и 2 дюймовъ, изъ которыхъ первая имѣла длину 150,0 сажень, вторая—длину 152,3, а третья—длину 356, 3 сажени, были заложены по двору Алексѣевской водокачки, какъ это показано на фигурѣ (7).

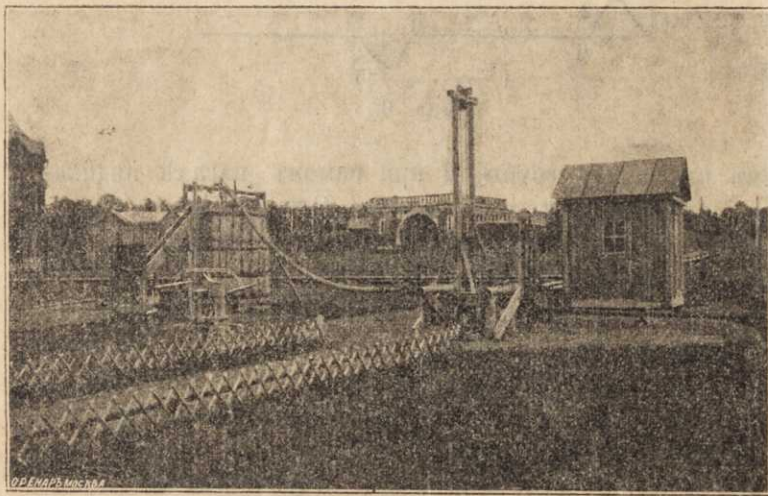
Трубы въ 4" и 6" брали свое начало отъ колодца  $F$  главной магистралі, въ 24" въ діаметрѣ, и имѣли выпускную задвижку около колодца  $G$ ; онѣ располагались въ видѣ двухъ рядомъ идущихъ петель. На фиг. 7 внутренняя, незачерченная труба есть труба въ 4", а наружная, представленная черною чертою, есть труба въ 6". Труба въ 2" примыкала къ магистралі въ 24" у



Фиг. 7.

колодца *G* и, сдѣлавъ длинную петлю, идущую около забора двора водокачки, представленнаго крайнимъ пунктиромъ, возвращалась назадъ къ выпускной задвижкѣ, расположенной около того же колодца. Выпускной конецъ для всѣхъ трехъ трубъ былъ сдѣланъ общій, такъ что одна и та же задвижка могла служить для затвора любой изъ трубъ при ихъ надлежащемъ соединеніи съ выпускной трубой. Надъ задвижкой возвышалась двунога (фиг. 8), служащая для подъема груза съ помощью проволочнаго каната, перекинутаго чрезъ блокъ. Этотъ грузъ падалъ во всѣхъ нашихъ опытахъ съ одной и той же высоты и, дергая посредствомъ проволочнаго каната за рычагъ задвижки, закрывала ее въ продолженіе времени около 0,03".

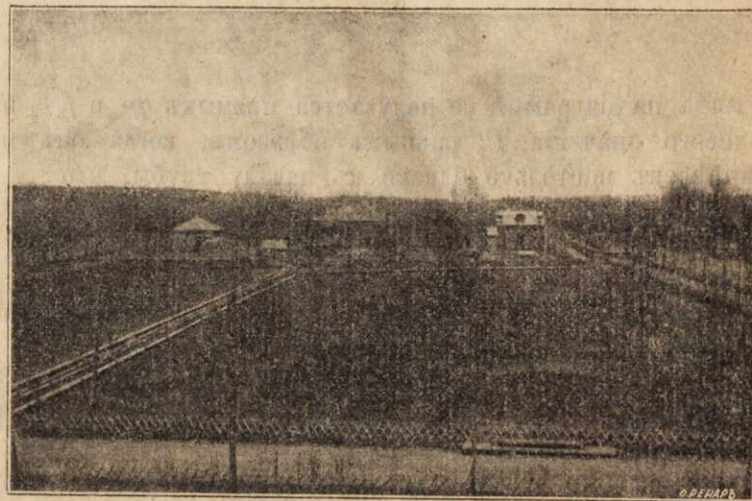
Около двуноги находилась постоянная будка № 1, въ которой помѣщался индикаторъ Кросби, соединяемый съ концомъ испытуемой трубы.



Фиг. 8.

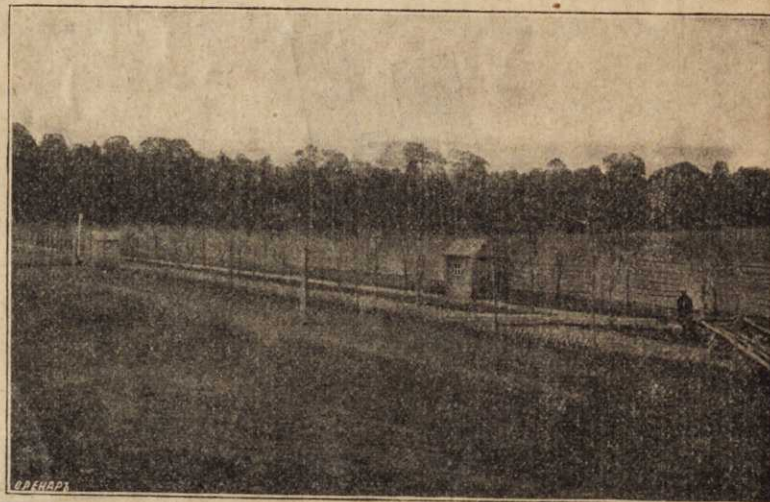
Количество вытекающей воды при наблюденіяхъ надъ трубою 2" опредѣлялось въ фунтахъ съ помощью малаго металлическаго бака, поставленнаго прямо на десятичные вѣсы, а при наблюденіяхъ надъ трубами 4" и 6" это количество опредѣлялось въ пудахъ съ помощью большаго деревяннаго бака, снабженнаго водомѣрною трубкою, градуированною на пуды. Эти баки видны на нашей фотографіи (фиг. 8) налѣво отъ двуноги. При пользованіи малымъ бакомъ опытъ производился такъ: рукавъ, соединенный съ выпускной трубой, оканчивался короткою изогнутою металлическою трубкой, которая подвѣшивалась на крючекъ на высоту малаго бака. Водовыпускная задвижка открывалась до желаемой степени и вода изливалась на землю. Когда скорость истечения устанавливалась, то конецъ рукава быстро нацѣплялся на край бака, и вода принималась въ бакъ въ продолженіе одной минуты, послѣ чего конецъ рукава быстро переносился опять на прежній крючекъ. Затѣмъ спускали гирю и быстрымъ затворомъ задвижки производили гидравлическій ударъ. Когда наблюденіе оканчивалось, то приступали къ взвѣшиванію бака, который передъ началомъ опыта былъ уравновѣшенъ на десятичныхъ вѣсахъ. Такимъ образомъ опредѣлялся въ фунтахъ вѣсъ воды, излившейся въ бакъ, а по этому вѣсу

опредѣлялась скорость движенія воды въ трубѣ въ 2". При пользованіи большимъ бакомъ опытъ располагался такъ: конецъ рукава укрѣплялся неподвижно надъ большимъ бакомъ; задвижка открывалась до желаемой степени и теченіе воды устанавливалось; послѣ этого при продолжающемся теченіи воды опредѣлялось, насколько поднимается вода въ водомѣрной трубкѣ въ одну минуту. Когда это наблюденіе было сдѣлано, тогда производился гидравлическій ударъ. Такъ какъ на каждый футъ скорости (въ секунду) изъ трубы въ 4" изливается въ одну минуту 9,05 пуда воды, а при трубѣ 6" изливается 20,35 пуда, то скорости въ футахъ при опытахъ надъ этими трубами могутъ быть получены чрезъ раздѣленіе числа найденныхъ пудовъ въ минуту на упомянутыя числа. Скорость воды въ трубѣ въ 2" получается чрезъ раздѣленіе числа излившихся въ минуту фунтовъ на 90,51. На фиг. (9) имѣется фотографія петель трубъ въ 4" и 6", снятая отъ начала петель.



Фиг. 9.

Въ срединѣ фигуры видна будка № 1; направо отъ нея трубы 4" и 6" поворачиваютъ къ колодцу *F*, а налѣво отъ нея видно начало и конецъ трубы въ 2".



Фиг. 10.

Дальнѣйшее расположеніе петли трубы въ 2" можно усмотрѣть на фотографіи, данной фигуною (10).

Петля трубы идет около забора, ограничивающего дворь водокачки, на этой петлѣ поставлены передвижныя будки № II и № III, изъ которыхъ первая видна на фотографіи съ лѣвой стороны (см. фиг. 7). Человѣкъ, изображенный на фотографіи, стоитъ у конца петли трубъ въ 4" и 6".

§ 7. *Определение наибольшихъ давленій въ различныхъ точкахъ трубы съ помощью манометровъ.* Первоначальныя наблюденія на Алексѣевской водокачкѣ были направлены къ тому, чтобы показать, что максимальное

(сверхъ атм. давленія). Потомъ задвижка открывалась до желаемой степени и происходило истеченіе воды, скорость которой опредѣлялась съ помощію большого бака. Когда это опредѣленіе было сдѣлано, гиря, поднятая на двуногу, спускалась, и производился гидравлическій ударъ. По окончаніи удара показанія всѣхъ фрикціонныхъ стрѣлокъ осматривались и записывались.

Результаты опытовъ, произведенныхъ надъ трубою въ 4" въ 1897 году іюня 23 и 24, помѣщены въ приложенной ниже таблицѣ.

Наблюденія 23 и 24 іюня 1897 года надъ наибольшими давленіями при гидравлическомъ ударѣ въ трубѣ 4" посредствомъ манометровъ.

| Нумеръ<br>наблѣ-<br>ній. | Скорость<br>воды въ<br>футахъ. | Показанія манометровъ въ атмосферахъ. |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     | Среднее<br>изъ десяти<br>ман. | Среднее $P$ . | $P = 4 \text{ в.}$ |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-------------------------------|---------------|--------------------|
|                          |                                | 1                                     | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11  |                               |               |                    |
| 1                        | 7,0                            | 40                                    | 37 | 48 | 37 | 36 | 48 | 38 | 38 | 45 | 38 | 8   | 40,5                          | 36,0          | 28,0               |
| 2                        | 7,0                            | 40                                    | 40 | 53 | 38 | 42 | 48 | 38 | 38 | 47 | 38 | 8   | 42,2                          | 37,7          | 28,0               |
| 3                        | 4,7                            | 28                                    | 28 | 29 | 26 | 26 | 38 | 27 | 30 | 27 | 27 | 7   | 28,6                          | 24,1          | 18,8               |
| 4                        | 6,4                            | 28                                    | 26 | 25 | 25 | 25 | 34 | 27 | 27 | 28 | 26 | 7   | 27,1                          | 22,6          | 26,6               |
| 5                        | 2,8                            | 18                                    | 15 | 15 | 15 | 15 | 18 | 16 | 17 | 17 | 16 | 5,5 | 16,2                          | 11,7          | 11,2               |
| 6                        | 2,6                            | 18                                    | 14 | 14 | 12 | 13 | 18 | 15 | 15 | 15 | 14 | 5,5 | 14,8                          | 10,3          | 10,4               |
| 7                        | 9,9                            | 50                                    | 50 | 68 | 50 | 52 | 50 | 37 | 44 | 53 | 34 | 7   | 48,8                          | 44,3          | 39,6               |
| 8                        | 3,5                            | 29                                    | 27 | 29 | 25 | 25 | 37 | 25 | 27 | 27 | 26 | 7   | 27,7                          | 23,2          | 15                 |
| 9                        | 4,0                            | 22                                    | 23 | 23 | 20 | 22 | 29 | 21 | 24 | 23 | 22 | 6   | 22,9                          | 18,4          | 16                 |
| 10                       | 4,0                            | 25                                    | 23 | 22 | 20 | 23 | 27 | 21 | 23 | 23 | 22 | 6   | 22,9                          | 18,4          | 16                 |

давленіе при гидравлическомъ ударѣ во всѣхъ точкахъ трубы одинаково и распространяется отъ задвижки къ магистрали съ нѣкоторою постоянною скоростью. Опыты производились сначала надъ системою трубъ въ 4", а потомъ надъ системою трубъ въ 2".

Вдоль линіи трубы въ 4" было поставлено 11 манометровъ Бурдона, снабженныхъ фрикціонными стрѣлками для отмѣтки наибольшихъ показаній манометровъ. Манометры № 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 были расположены по правой сторонѣ петли (если смотрѣть отъ задвижки) на разстояніяхъ другъ отъ друга 10 сажень, при чемъ манометръ № 1 былъ около самой задвижки; манометры же № 8, 9, 10, 11 были расположены по лѣвой сторонѣ петли на разстояніяхъ около 20 сажень, при чемъ манометръ № 11 отстоялъ около сажени отъ начала трубы. На фиг. (8) упомянутые манометры изображены маленькими кружочками.

Сначала, до открытія задвижки, всѣ фрикціонныя стрѣлки подвигались къ стрѣлкамъ манометровъ, которыя показывали давленіе главной магистрали, равное 4,5 атмосферы

Разсматривая на этой таблицѣ давленія въ различныхъ точкахъ трубы, видимъ, что они довольно близки къ постоянству. Показанія манометра № 10, отстоящаго отъ начала трубы на 21 сажень, въ нѣкоторыхъ наблюденіяхъ почти совпадаетъ съ показаніемъ манометра № 1, стоящаго у задвижки. Такимъ образомъ ударъ передается безъ ослабленія вдоль всей трубы. Манометръ 11, стоящій почти у конца трубы, показываетъ, какъ это и слѣдуетъ изъ § 5, давленіе, приближающееся къ давленію магистрали; поэтому при составленіи средняго давленія мы не пользовались этимъ показаніемъ. Нѣкоторое непостоянство показаній манометровъ Бурдона можетъ быть объяснено неприспособленностью этихъ приборовъ къ опредѣленію ударнаго давленія (вліяніе инерціи разгибающейся трубки) и тѣмъ обстоятельствомъ, что при большихъ скоростяхъ воды фрикціонная стрѣлка показываетъ максимальное давленіе не первой волны, а иногда второй (см. § 9). Эти же обстоятельства должны вліять на то, что величина  $P$ , опредѣленная изъ средняго показанія манометровъ и данная въ предпослѣдней

колоннѣ, выходить болѣе теоретической величины  $P=4v$ .

При опытахъ съ трубою 2" было поставлено вдоль линіи трубы одиннадцать манометровъ. Манометры № 1, 2, 3, 4, 5, 6 шли на лѣвой сторонѣ трубы (при взглядѣ отъ задвижки), при чемъ манометръ № 1 былъ у самой задвижки, манометры же № 7, 8, 9, 10, 11 шли по правой сторонѣ (около забора), при чемъ манометръ № 11 былъ у самаго начала трубы. На фиг. 7 изображены черными точками мѣста, на которыхъ можно было привинчивать манометры; начиная отъ задвижки, шли манометры № 1, 2, 3, на разстояніяхъ другъ отъ друга около 20 саженъ, потомъ на разстояніяхъ около 40 саженъ манометры № 5 и № 6. Последняя черная точка на лѣвой сторонѣ трубы не была занята манометромъ; первая же точка съ правой стороны занималась манометромъ № 7, за ней манометры № 8, 9, 10 и 11 были поставлены чрезъ одно мѣсто на разстояніяхъ около 40, 60 и 40 саженъ.

Въ нижепомѣщенной таблицѣ даны результаты опытовъ надъ наибольшимъ давленіемъ при гидравлическихъ ударахъ въ трубѣ 2", сдѣланные 1 и 23 сентября 1897 года.

для того, чтобы съ возможною полнотою оправдать излагаемую мною теорію, я счелъ полезнымъ заняться сначала непосредственнымъ опредѣленіемъ времени пробѣга ударною волною между двумя точками трубы. Для этого, какъ показано на фотографіи, данной на фиг. 11, въ двухъ точкахъ трубы въ 4', отстоящихъ другъ отъ друга на 100 саженъ, были ввинчены двѣ манометрическія дугообразныя трубки, которыя раскрывались при увеличеніи давленія и выдавливали мѣдныя стержни, замыкающіе токъ. При этомъ стержень, разъ выдвинутый, удерживался треніемъ объ особую пружинку и назадъ не возвращался. Дѣйствіе стержня перваго манометра (по направленію теченія) замыкало нѣкоторый токъ, отсылаемый въ машинное зданіе водокачки, въ которомъ стоялъ хронографъ Марей; этотъ токъ поднималъ якорь хронографа, который двигалъ перо, чертящее по записочной бумагѣ барабана. Сдвинутое перо возвращалось на прежнее мѣсто въ тотъ моментъ, когда ударная волна подбѣгала ко второму манометру, и онъ, выдвинувъ стержень, дѣлалъ курцшлюсъ тока, посылаемаго въ машинное зданіе водокачки.

Наблюденія 1 и 23 сентября 1897 года надъ наибольшими давленіями при гидравлическихъ ударахъ въ трубѣ 2" посредствомъ манометровъ.

| Нумеръ<br>наблюд. | Скорость<br>въ футахъ. | Показанія манометровъ въ атмосферахъ. |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Среднее<br>изъ десяти<br>ман. | Среднее $P$ . | $P=4v$ . |
|-------------------|------------------------|---------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------------------------|---------------|----------|
|                   |                        | 1                                     | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |                               |               |          |
| 1                 | 4,4                    | 27                                    | 23 | 25 | 24 | 30 | 30 | 33 | 32 | 30 | 28 | 5  | 28,2                          | 23,7          | 17,6     |
| 2                 | 4,4                    | 30                                    | 24 | 25 | 22 | 34 | 30 | 32 | 30 | 32 | 30 | 5  | 28,9                          | 24,4          | 17,6     |
| 3                 | 3,3                    | 20                                    | 18 | 18 | 20 | 25 | 23 | 28 | 30 | 22 | 24 | 5  | 22,8                          | 18,3          | 13,2     |
| 4                 | 3,2                    | 20                                    | 18 | 18 | 20 | 20 | 26 | 30 | 32 | 23 | 24 | 5  | 23,1                          | 18,6          | 12,8     |
| 5                 | 4,5                    | 30                                    | 30 | 20 | 23 | 23 | 20 | 27 | 25 | 35 | 29 | 5  | 26,2                          | 21,7          | 18,0     |
| 6                 | 4,4                    | 25                                    | 30 | 20 | 25 | 35 | 25 | 27 | 26 | 27 | 30 | 5  | 27,0                          | 22,5          | 17,6     |
| 7                 | 4,4                    | 29                                    | 30 | 20 | 25 | 35 | 20 | 27 | 26 | 27 | 30 | 5  | 26,9                          | 22,4          | 17,6     |

Изъ этой таблицы мы усматриваемъ тоже, что показаніе манометра передается безъ потери вдоль всей трубы, при чемъ въ нѣкоторыхъ наблюденіяхъ показаніе манометра № 10 даже болѣе показанія манометра № 1. Полнаго постоянства въ показаніяхъ мы и здѣсь не замѣчаемъ по причинѣ, объясненной выше, при этомъ средняя величина  $P$ , вычисленная изъ наблюденій еще болѣе превышаетъ теоретическую величину  $4v$ , нежели въ наблюденіяхъ съ трубою 4".

§ 8. *Опредѣленіе скорости распространенія ударной волны  $\lambda$  съ помощью хронографа Марей.*

Согласно теоріи, изложенной въ § 5, скорость распространенія ударной волны по трубамъ можетъ быть опредѣлена посредствомъ измѣреній ударной диаграммы. Но

Такимъ образомъ перо хронографа вычерчивало зубецъ, длина котораго, выраженная во времени, давала время пробѣга ударною волною 100 саженъ. Время, соответствующее длинѣ зубца, опредѣлялось въ сотыхъ доляхъ секунды съ помощью показаній, наносимыхъ на тотъ же барабанъ перомъ. Это перо приводилось въ движеніе особымъ небольшимъ токомъ, прерываемымъ камертономъ, дѣлающимъ 100 колебаній въ секунду.

На фиг. 12 дана фотографія употребляемаго нами хронографа и камертона. Полусекундный маятникъ, видный на этой фотографіи, прерывалъ и замыкалъ особый токъ, посылаемый въ наблюдательныя будки съ индикаторами Кросби, о которыхъ будетъ изложено въ § 10.

Къ сожалѣнію, при указанномъ способѣ опредѣленія  $\lambda$  не получалось вполне постоянныхъ чиселъ, что происходило, по моему мнѣнію, отъ вліянія остаточнаго магнетизма въ электромагнитѣ пера и отъ зависимости мо-

ставлены другъ отъ друга на 178 сажень, въ мѣстахъ, обозначенныхъ на фиг. 7 маленькими черточками. При этомъ получились времена пробѣга, написанныя въ нижеслѣдующей таблицѣ.



Фиг. 11.

мента отскакиванія якоря отъ установки [оттягивающей его пружинки.

Приводимая здѣсь таблица даетъ результаты наблюденій 22 и 24 іюня 1897 года.

Наблюденія 22 и 24 іюня 1897 г. для опредѣленія  $\lambda$  въ трубѣ 4" съ помощью хронографа.

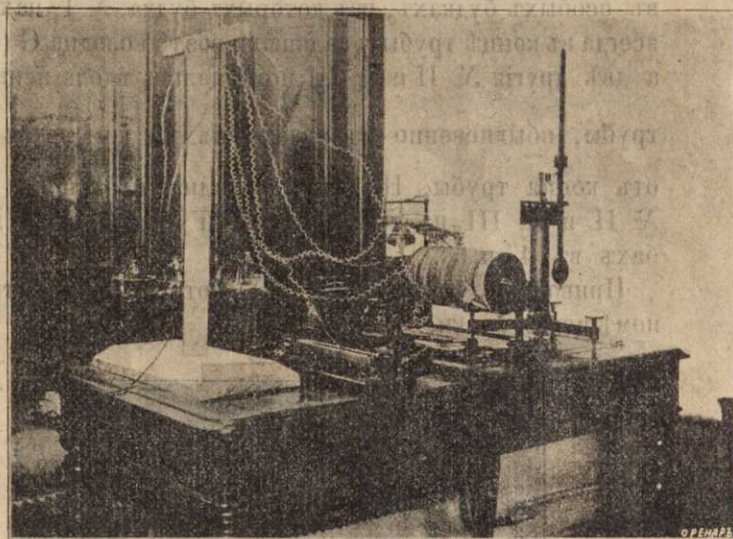
| Нумеръ опыта. | Скорость волны въ футахъ. | Время пробѣга 100 сажень въ секунду. |
|---------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 1             | 10,8                      | 0,170"                               |
| 2             | 4,6                       | 0,160                                |
| 3             | 3,1                       | 0,140                                |
| 4             | 3,5                       | 0,180                                |
| 5             | 4,0                       | 0,140                                |
| 6             | 3,9                       | 0,160                                |
| 7             | 4,1                       | 0,165                                |
| 8             | 7,1                       | 0,190                                |
| 9             | 9,1                       | 0,180                                |

Изъ этой таблицы заключаемъ въ среднемъ, что время пробѣга ударною волною 100 сажень есть 0,165". Этому времени соответствуетъ скорость

$$\lambda = 606 \text{ сажень},$$

весьма близкая къ теоретической скорости, данной въ § 3.

Подобныя же наблюденія были произведены надъ трубою въ 2", при чемъ манометрическіе аппараты были по-



Фиг. 12.

Наблюденія 23 сентября 1897 г. для опредѣленія  $\lambda$  въ трубѣ 2" съ помощью хронографа.

| Нумеръ опыта. | Скорость волны въ футахъ. | Время пробѣга 178 сажень. |
|---------------|---------------------------|---------------------------|
| 1             | 3,07                      | 0,306"                    |
| 2             | 1,80                      | 0,302                     |
| 3             | 1,80                      | 0,297                     |
| 4             | 0,80                      | 0,297                     |
| 5             | 1,54                      | 0,300                     |

Среднее время пробѣга выходитъ здѣсь 0,300", что даетъ намъ скорость

$$\lambda = 593,$$

меньшую теоретической, которая, какъ было показано въ § 3, должна быть болѣе нежели скорость для трубы 4".

Впослѣдствіи будутъ даны многочисленныя наблюденія надъ скоростью волны въ трубѣ 2" другими болѣе точными методами. Эти наблюденія покажутъ, что скорость  $\lambda$  для трубы въ 2" нѣсколько болѣе скорости  $\lambda$  для трубы въ 4"

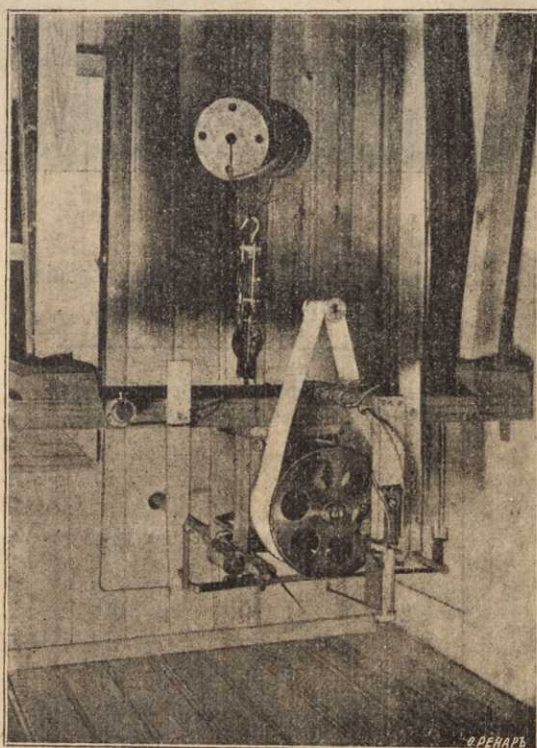
Я думаю, что употребленный нами хронографическій методъ давалъ нѣсколько большія времена пробѣга противъ дѣйствительныхъ, такъ какъ на отнятіе якоря хронографа упругостью пружинки требуется, вслѣдствіе

остаточного магнетизма, болѣе времени нежели на его притяженіе.

§ 9. Ударныя діаграммы, снимаемыя съ помощью индикаторовъ Кросби въ различныхъ мѣстахъ трубы.

Индикаторы Кросби помѣщались при нашихъ опытахъ въ особыхъ будкахъ, изъ которыхъ будка № 1 находилась всегда въ концѣ трубы у задвижки возлѣ колодца G (фиг. 7), а двѣ другія № II и № III помѣщались вдоль испытуемой трубы, обыкновенно на разстояніяхъ  $\frac{1}{3}$  и  $\frac{2}{3}$  ея длины отъ конца трубы. На фиг. 7 видна постановка будокъ № II и № III на трубѣ въ 2" и будки № II на трубахъ въ 4" и 6".

Приводимъ здѣсь (фиг. 13) фотографію внутренняго помѣщенія будки.



Фиг. 13.

На этой фотографіи виденъ индикаторъ Кросби съ приподнятымъ рычагомъ карандаша. Цилиндръ индикатора соединенъ желѣзною трубою, проходящею сквозь стѣнку будки, съ водопроводною трубою. Карандашъ, будучи опущенъ на бумажную ленту вращающейся катушки, чертилъ по ней при измѣненіи давленія въ трубѣ діаграмму давленія. Катушка вращалась механизмомъ, приводимымъ въ движеніе грузомъ, и двигалась довольно равномерно, хотя къ ней и не было присоединено регулятора. На ленту наносились отмѣтки полусекундъ ударами острія (остріе ударяло по зачерненной неподвижной бумажкѣ, которая отъ удара прижималась къ лентѣ и давала на ней точку), приводимаго въ колебанія электромагнитомъ, токъ котораго регистрировался полусекунднымъ маятникомъ, стоящимъ въ машинномъ отдѣленіи водокачки (см. фиг. 12). Ленты были устроены, какъ изображено на фиг. 13. Онѣ имѣли большую длину, нежели окружность катушки, и держались въ натянутомъ состояніи съ по-

мощью тяжелаго мѣднаго цилиндрика съ закраинами, который клался на нижнюю часть ленты.

Это приспособленіе, сдѣланное инженеромъ В. В. Ольденборгеромъ, оказалось весьма практичнымъ и позволяло безъ всякой задержки замѣнять исписанную ленту новой.

При первыхъ нашихъ наблюденіяхъ выступы діаграммъ получались съ рѣзкими зигзагами; но потомъ выяснилось, что зигзаги могутъ быть ослаблены и почти совершенно уничтожены употребленіемъ весьма тугихъ пружинъ въ индикаторѣ (мы остановились на пружинахъ, дающихъ на  $\frac{3}{4}$  mm. показанія карандаша одну атмосферу давленія)

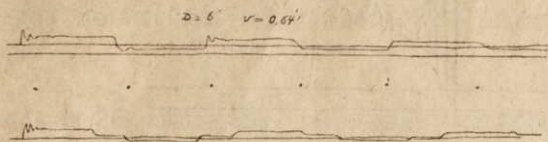
и малымъ открытіемъ крана, соединяющаго индикаторъ съ трубкой, идущей къ испытуемой водопроводной трубѣ.

Укажемъ здѣсь употребляемый нами порядокъ снятія діаграммъ. Наблюдатель въ будкѣ № 1 давалъ электрическій сигналъ двумъ наблюдателямъ въ будкахъ № II и № III для снятія линіи атмосфернаго давленія. При этомъ кранъ, соединяющій цилиндръ индикатора съ водопроводной трубою, закрывался, а другой кранъ, соединяющій этотъ цилиндръ съ воздухомъ, открывался; катушка пускалась въ ходъ; карандашъ опускался на бумагу и чертилъ на ней желаемую прямую. Послѣ этого карандашъ поднимался; воздушный кранъ закрывался; водопроводный кранъ открывался; карандашъ опускался на катушку и вычерчивалъ прямую гидростатическаго давленія. Когда эти прямые были начерчены, то наблюдатель изъ будки № 1 давалъ команду лицамъ, стоящимъ при задвижкѣ и измѣрительномъ бакѣ, чтобы задвижка была открыта и количество истекающей воды измѣрено, какъ объяснено въ § 6. Въ продолженіе этого измѣренія наблюдатель будки № 1 и, по данному имъ электрическому сигналу, наблюдатели въ двухъ другихъ будкахъ снимали прямую динамическаго давленія. Получивъ извѣщеніе о томъ, что количество воды измѣрено, наблюдатель будки № 1 дѣлалъ контактъ, приводившій въ движеніе рычаги, отбивающіе полусекунды сразу во всѣхъ трехъ будкахъ, и давалъ команду о спускѣ гири. Съ этого времени карандаши индикаторовъ во всѣхъ трехъ будкахъ вычерчивали ударныя діаграммы, и черченіе это прекращалось посредствомъ поднятія карандаша и остановки отбѣтокъ секунды только тогда, когда была уже пройдена большая часть ленты.

Когда скорость  $v$  движенія воды въ трубѣ не велика, тогда ударная діаграмма представляетъ намъ надъ линіею динамическаго давленія (которое почти совпадаетъ со статическимъ) рядъ выступовъ и впадинъ, какъ это изображено на фиг. (14), дающей фотографіи ударныхъ діаграммъ, снятыхъ съ трубы въ 6" при скорости  $v=0,64'$ , при чемъ давленіе было  $P=3$  ат. Первая діаграмма была начерчена въ будкѣ № 1, а вторая—въ будкѣ № II.

Подъ каждой изъ діаграммъ помѣщены отмѣтки полусекундъ. Эти отмѣтки наносились ударами острія надъ діаграммою и были потомъ для компактности фигуры перенесены внизъ. Такимъ же образомъ помѣщены полусекунды на всѣхъ фотографіяхъ, приводимыхъ ниже.

Сравнивая действительныя діаграммы фиг. (14) съ двумя теоретическими діаграммами въ верхней части фиг. (6), мы замѣчаемъ въ тѣхъ и другихъ полное сходство. Для будки № 1 діаграмма образована выступомъ и впадиной; для будки № II она образована выступомъ, чертой (мы будемъ называть такъ прямую, слѣдующую за выступомъ или впадиною) впадиной и чертой. При этомъ упомянутый контуръ періодически повторяется. На нашихъ діаграммахъ получалось около 12 полныхъ волнъ, съ постепеннымъ уменьшеніемъ высоты выступовъ и впадинъ, которое происходитъ отъ потери энергіи на треніе и отъ ухода ея въ магистраль.

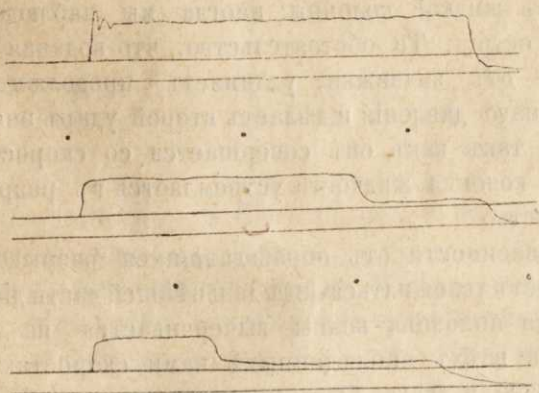


Фиг. 14.

Когда ударное давленіе  $P$  превосходитъ давленіе въ магистральной (въ нашихъ опытахъ давленіе въ магистральной 4,5) болѣе, нежели на одну атмосферу, тогда построенная, согласно теоріи § 5, впадина діаграммы соответствовала бы отрицательному давленію въ трубѣ. Наблюденія показываютъ, что въ этомъ случаѣ первый выступъ для діаграммы въ будкѣ № I и первый выступъ съ первою чертою для діаграммъ въ будкахъ № II и № III вычерчиваются вполне согласно теоріи; что же касается до впадины, то глубина ея опускается ниже атмосферной прямой не болѣе, какъ на одну атмосферу (обыкновенно менѣе этого).

На фигурѣ (15), даны фотографіи ударныхъ діаграммъ, снятыхъ въ будкахъ № 1, II, III съ трубы 2" при скорости истеченія  $v = 1,8$  и ударномъ давленіи  $P = 7$  атм.

$$d = 2" \quad v = 1,8$$



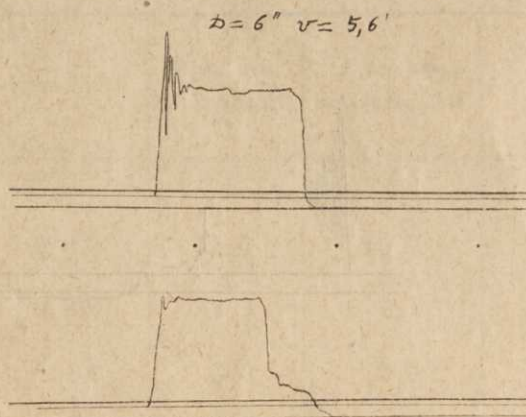
Фиг. 15.

Мы видимъ, что первая діаграмма состоитъ только изъ выступа, вторая изъ выступа и короткой черты, третья изъ короткаго выступа и длинной черты.

Выраженныя во времени разстоянія отъ начала поднятія кривой каждой діаграммы до начала ея паденія должны равняться двойнымъ временамъ пробѣга отъ разсматриваемой будки до начала трубы (до магистрали). Эти разстоянія на нашемъ опытѣ находились въ отношеніи

3:2:1; въ такомъ же отношеніи находятся, опредѣленные по фиг. (15), вышеупомянутыя времена пробѣга. Мы видимъ на фиг. (15), что черта, входящая въ составъ діаграммы, не совпадаетъ съ прямою гидростатическаго давленія, а нѣсколько выше ея. Это происходитъ отъ того, что ударъ, перейдя на магистраль, останавливаетъ воду въ послѣдней и немного поднимаетъ гидростатическое давленіе магистрали.

На фигурѣ (16) даны фотографіи ударныхъ діаграммъ, снятыхъ въ будкахъ № 1 и № II при скорости истеченія  $v = 5,6$  и ударномъ давленіи 25 атм. Мы видимъ, что по этимъ діаграммамъ удобно измѣрять время, протекающее отъ начала поднятія давленія до начала его паденія, а также и величину ударнаго давленія  $P$ , которую мы опредѣляемъ разстояніемъ отъ динамической прямой (средняя прямая на фиг.) горизонтальной части выступа.



Фиг. 16.

Что касается зигзаговъ, которые начинаютъ выступъ, то они, по моему мнѣнію, происходятъ отъ удара воды въ трубкѣ, соединяющей индикаторъ Кросби съ водопроводной трубой. При этомъ то обстоятельство, что эти зигзаги показываютъ давленіе иногда въ 2 раза болѣе  $P$ , объясняется эффектомъ тупиковъ, о которомъ будетъ сказано въ § 13. Мы видѣли, что діаграмма будки № II, представленная въ нижней части фиг. (16), даетъ намъ почти ту же величину  $P$ , какъ діаграмма будки № 1. Это обстоятельство имѣло мѣсто при всѣхъ нашихъ наблюденіяхъ. На діаграммѣ будки № II мы замѣчаемъ замѣну короткой черты, которая должна бы слѣдовать за выступомъ, нѣкоторою линіею, расположенной выше линіи гидростатическаго давленія. Это происходитъ, какъ было сказано, отъ подъема давленія въ магистральной.

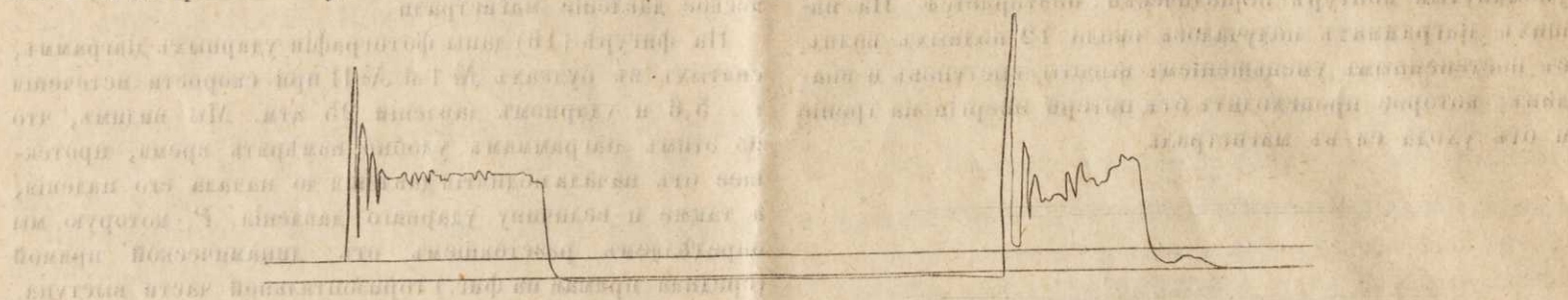
Такъ какъ первая половина діаграммы при малыхъ и при большихъ скоростяхъ (4  $v$  болѣе 5,5) выходитъ согласными съ теоріею, то по нимъ можно для различныхъ скоростей опредѣлять величины  $\lambda$  и  $P$ . Дадимъ теперь изображеніе второй половины діаграммы, получаемой при большихъ скоростяхъ.

На фиг. (17), снятой въ будкѣ № 1, съ трубы 6" при скорости 3,8 ф., при чемъ ударное давленіе было около 15,3 атм., впадина значительно растянута и ниспадаетъ ниже прямой атмосфернаго давленія.

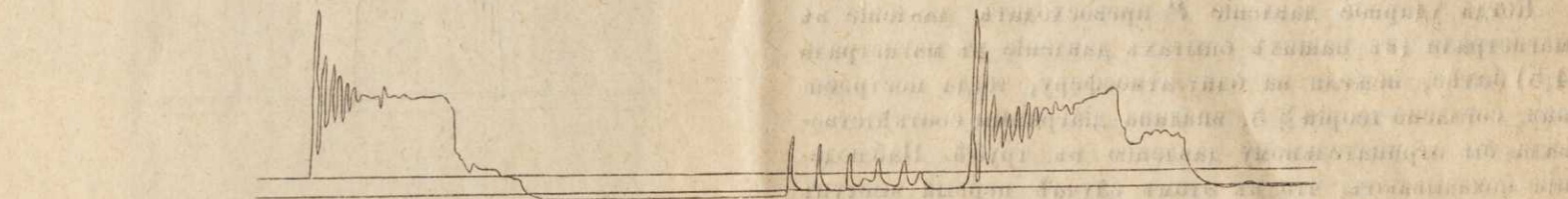
Выступъ, слѣдующій за этою впадиною, начинался рѣзкимъ зигзагомъ, превосходящимъ зигзагъ, соответ-

ствуюцій началу пераго виступа. Для того же опыта на діаграммѣ будки № II, которая изображена на фиг. (18), впадина тоже растягивается, но на томъ мѣстѣ, гдѣ должна бы появиться вторая черта статическаго давленія, появляются отдѣльныя острія. Такія острія на пространствахъ пониженнаго давленія никогда не наблюдались нами на діаграммахъ будки № 1, при задвижкѣ.

отъ послѣдней подается назадъ давленіе магистрали и движеніе жидкости по направленію къ задвижкѣ. При этомъ возможно соудареніе между колоннами жидкости движущимися къ задвижкѣ и отъ задвижки. Подобное соудареніе вызоветъ быстрое поднятіе давленія и потомъ быстрое его паденіе, когда ударная волна добѣжитъ до конца ударенной колонны жидкости и принесетъ отъ этого конца



Фиг. 17.



Фиг. 18.

Изложу здѣсь представляющее мнѣ объясненіе вида второй половины діаграммы при большихъ скоростяхъ истеченія. Начиная съ момента закрытія задвижки, вода вдоль трубы постепенно останавливается, при чемъ она сжимается, труба расширяется и давленіе увеличивается на  $P$ . Когда это состояніе добѣгаетъ со скоростью  $\lambda$  до магистрали, тогда отъ послѣдней подается назадъ по трубѣ давленіе магистрали (нѣсколько повышенное ударомъ въ самой магистрали) и скорость воды  $v$  по направленію къ магистрали. Эта фаза пробѣгаетъ сперва передъ будкой № III и № II, вслѣдствіе чего давленіе въ ихъ индикаторахъ падаетъ до давленія въ магистрали. Когда же упомянутая фаза дойдетъ до задвижки то, вслѣдствіе того, что скорость воды направлена отъ задвижки, произойдетъ сразу пониженіе давленія у задвижки. Если при этомъ скорость  $v$  настолько велика, что по теоріи пониженное давленіе должно бы быть отрицательнымъ, то происходитъ разрывъ колонны жидкости. Эта колонна отстаетъ отъ задвижки, передъ которою образуется небольшое разрѣженное пространство. Подобные же разрывы могутъ образоваться и въ нѣкоторыхъ другихъ частяхъ жидкой колонны, на которыя распространилось пониженное давленіе. Образовавшіяся разрѣженныя пространства наполняются парами воды и разрѣженнымъ воздухомъ, при чемъ возможно вхожденіе нѣкотораго количества воздуха чрезъ задвижку и поршни индикаторовъ. Освободившаяся отъ задвижки масса жидкости сохраняетъ нѣкоторую скорость по направленію отъ задвижки, а пониженное давленіе передается вдоль неразрывной колонны жидкости со скоростью  $\lambda$  къ магистрали,

назадъ пониженное давленіе. Это быстрое повышеніе давленія, а затѣмъ его паденіе почти до атмосферной черты можетъ быть отмѣчено только индикаторомъ будки, стоящей передъ концомъ ударенной колонны, на примѣръ индикаторомъ будки № II, но не можетъ отразиться на показаніи индикатора въ будкѣ № 1. Число острій на мѣстѣ черты нулевого давленія зависитъ отъ характера разрывовъ жидкой колонны; иногда мы наблюдали одно или два острія. То обстоятельство, что водяная колонна отстаетъ отъ задвижки, удлинняетъ продолжительность пониженнаго давленія и дѣлаетъ второй ударъ энергичнѣе пераго, такъ какъ онъ совершается со скоростью, съ которою колонна жидкости устремляется въ разрѣженное пространство.

Въ зависимости отъ образовавшихся разрывовъ жидкости будетъ усложняться видъ дальнѣйшей части діаграммы, но первая половина волны вычерчивается на діаграммахъ при всѣхъ наблюденныхъ нами скоростяхъ всегда однообразно и, какъ было упомянуто, вполне согласно съ изложенною въ § 5 теоріею явленія. Эта часть діаграммы и служила намъ для опредѣленія  $\lambda$  и  $P$ . Здѣсь слѣдуетъ упомянуть объ одной предосторожности, которую слѣдуетъ имѣть въ виду при наблюденіяхъ явленія гидравлическаго удара.

Когда мы приступили къ нашимъ опытамъ при Алексѣевской водокачкѣ, то пускали сначала въ испытываемыя трубы воду изъ магистрали при работѣ нагнетательныхъ насосовъ въ машинномъ зданіи. При этихъ насосахъ для смягченія ударовъ при ихъ работѣ имѣются маленькія всасывающія воздухъ отверстія. Всасы-

аемый воздух вгоняется въ магистраль и растворяется водою. Такого рода вода, содержащая маленькіе воздушные пузырьки, давала намъ при ударахъ въ нашихъ трубахъ сравнительно меньшую скорость распространения волны (около 500 сажень) и болѣе слабый ударъ, обозначаемый непостоянными, размытыми диаграммами. Чтобы наблюдать явленіе въ чистотѣ, мы рѣшили останавливать работу насосовъ, питающихъ городъ Москву, предварительно накачавъ полными баки Алексѣевской водокачки, и пользоваться напорной водою, идущей отъ этихъ баковъ. Эта вода уже не показывала присутствіе воздушныхъ массъ, и явленія гидравлическаго удара могли быть наблюдаемы съ полною отчетливостію.

раммѣ. Такъ какъ діаграмма начиналась обыкновенно зигзагомъ (см. фиг. 16), то мы пользовались вторымъ способомъ опредѣленія. Ударное давленіе въ опытахъ надъ трубами 4" и 6" опредѣлялось нами высотой гребня выступа надъ прямой динамическаго давленія. (Параллельность гребня къ этой прямой, какъ увидимъ въ слѣдующемъ параграфѣ, только приближенная). Это давленіе опредѣлялось нами одновременно въ будкахъ № 1 и № II и выходило близко между собою изъ обѣихъ діаграммъ.

Приводимъ таблицу наблюденій, сдѣланныхъ 20 ноября 1897 года надъ трубой 6", длина которой, какъ было сказано въ § 6, была 152,3 сажени.

Наблюденія 20 ноября 1897 года надъ гидравлическими ударами въ трубѣ 6", сдѣланныя посредствомъ индикаторовъ.

| Нумеръ опыта. | Скорость<br>голы въ фу-<br>тахъ. | Время $t''$ изъ<br>будки № I. | Время $t''$ изъ<br>будки № II. | Время $t''$ по<br>многимъ вол-<br>намъ. | Время $\tau''$ . | $P$ въ атм.<br>изъ будки № I. | $P$ въ атм.<br>изъ будки № II. | $P=4v$ |
|---------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|
| 1             | 3,3                              | 0,52                          | —                              | 0,52                                    | 0,03             | 15,7                          | 15,7                           | 13,2   |
| 2             | 1,9                              | 0,52                          | 0,52                           | 0,52                                    | 0,03             | 7,3                           | 7,1                            | 7,6    |
| 3             | 0,6                              | 0,52                          | 0,52                           | 0,52                                    | 0,04             | 3,0                           | 3,0                            | 2,4    |
| 4             | 1,4                              | 0,51                          | 0,52                           | 0,52                                    | 0,04             | 6,0                           | 6,1                            | 5,6    |
| 5             | 3,0                              | 0,52                          | —                              | 0,52                                    | 0,03             | 12,1                          | 11,44                          | 12,0   |
| 6             | 4,0                              | 0,51                          | 0,51                           | 0,52                                    | 0,03             | 15,6                          | 15,2                           | 16,0   |
| 7             | 5,6                              | 0,52                          | 0,52                           | 0,51                                    | 0,04             | 25,2                          | 25,2                           | 22,4   |
| 8             | 7,5                              | 0,51                          | —                              | 0,53                                    | 0,04             | 29,0                          | 29,0                           | 30     |
| 9             | 7,5                              | 0,51                          | Произошелъ разрывъ трубы.      |                                         |                  | 11,7                          | 11,3                           | 30     |

§ 10. *Опредѣленіе  $\lambda$  и  $P$  изъ діаграммы индикатора при наблюденіяхъ надъ трубами 4" и 6".*

Время  $t$ , соответствующее пробѣгу ударною волною двойной длины трубы, опредѣлялось нами преимущественно по діаграммамъ будки № 1, выражая во времени разстояніе по прямой динамическаго давленія отъ начала поднятія давленія до начала его паденія. вмѣстѣ съ этимъ мы опредѣляли это время еще изъ діаграммъ будки № II, выражая во времени разстояніе по прямой динамическаго давленія отъ начала поднятія давленія до конца такъ называемой черты; кромѣ этого, мы выражали во времени длину многихъ полныхъ волнъ и дѣлили его на удвоенное число волнъ. Время затвора  $\tau$  можно опредѣлять согласно сказанному въ § 5—или съ помощію разстоянія  $cs=\tau$  діаграммы будки № 1, изображенной на фиг. (6), или съ помощію разстоянія  $c_1q=\frac{\tau}{2}$ , даннаго на той же діа-

Время пробѣга двойной длины трубы, т. е. 304,6 сажень, выходитъ на основаніи данныхъ этой таблицы заключеннымъ между числами 0,52" и 0,51". Такъ какъ первое число повторяется гораздо чаще и соответствуетъ почти всѣмъ опредѣленіямъ изъ многихъ волнъ (опредѣлялись, взявши число волнъ отъ 5 до 8), то его и слѣдуетъ принять для опредѣленія  $\lambda$ . По этому времени нахо-

$$\lambda = 586 \text{ сажень.}$$

Число, близко совпадающее съ теоретическимъ.

Что касается до времени затвора, то оно выходитъ при нашихъ опытахъ между 0,03" и 0,04". Раньше сдѣланныя наблюденія надъ тѣмъ же затворомъ съ помощію электрическихъ контактовъ и хронографа дали намъ:

| номеръ опыта | время $\tau''$ |
|--------------|----------------|
| 1            | 0,003          |
| 2            | 0,003          |
| 3            | 0,002          |
| 4            | 0,003          |
| 5            | 0,025          |

Къ сожалѣнію, при этихъ опытахъ не опредѣлялась скорость истекающей воды и по нимъ нельзя судить о измѣненіи времени затвора съ увеличеніемъ открытія задвижки. Величина ударнаго давления  $P$ , какъ видно изъ колоннъ 7, 8 и 9, приблизительно выражается формулою  $P=4v$ . Если бы мы взяли данную въ § 4 формулу  $P=3,78v$ , то получили бы величины ударныхъ давленій нѣсколько меньшія дѣйствительныхъ.

Переходимъ къ наблюденіямъ гидравлическаго удара въ трубѣ 4", имѣвшей длину 150 сажень. Эти наблюденія велись въ томъ же порядкѣ, какъ вышеописанныя наблюденія съ трубой 6". Помѣщаемъ здѣсь соотвѣтствующую имъ таблицу.

Наблюденія 4 ноября 1897 года надъ гидравлическими ударами въ трубѣ 4", сдѣланныя посредствомъ индикаторовъ.

| Номеръ опыта | Скорость воды въ фут. тахъ. | Время $t''$ , опредѣленное изъ буд. № 1. | Время $t''$ , опредѣленное изъ буд. № 2. | Время $t''$ по многимъ волнамъ. | Время $\tau''$ | $P$ въ атм. изъ будки № 1. | $P$ въ атм. изъ будки № 2. | $P=4v$ . |
|--------------|-----------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|----------|
| 1            | 3,3                         | 0,49                                     | 0,51                                     | —                               | 0,04"          | 13,3                       | 13,3                       | 13,2     |
| 2            | 1,9                         | 0,50                                     | 0,50                                     | —                               | 0,04           | 7,8                        | 7,8                        | 7,6      |
| 3            | 4,1                         | 0,49                                     | 0,50                                     | —                               | 0,03           | 15,8                       | 15,9                       | 16,4     |
| 4            | 9,2                         | 0,49                                     | 0,50                                     | —                               | 0,04           | 35,0                       | 35,9                       | 36,8     |
| 5            | 2,9                         | 0,49                                     | 0,50                                     | —                               | 0,05           | 11,3                       | 11,3                       | 11,6     |
| 6            | 0,5                         | 0,50                                     | 0,50                                     | 0,50                            | 0,04           | 2,0                        | 2,5                        | 2,0      |
| 7            | 1,1                         | 0,50                                     | 0,49                                     | 0,51                            | 0,04           | 4,4                        | 4,3                        | 4,4      |

Здѣсь время  $t$  пробѣга двойной длины трубы получается между 0,49" и 0,51", при чемъ наиболѣе преобладаетъ число 0,50, которое мы и примемъ за время пробѣга 300 сажень. Это даетъ намъ для трубы 4"

$$\lambda = 600,$$

что довольно близко подходитъ къ величинѣ, вычисленной въ § 3.

Величины ударнаго давления, выраженные по форм.  $P=4v$ , весьма хорошо удовлетворяютъ дѣйствительнымъ наблюденіямъ, хотя и болѣе близкая къ § 4 фор.  $P=3,90v$  даетъ вполне удовлетворительные результаты.

§ 11. *Определение  $\lambda$  и  $P$  изъ диаграммъ индикатора при наблюденіяхъ надъ трубой 2".*

Длина трубы въ 2" была взята нами въ 356,3 сажени, вслѣдствіе этого при большихъ скоростяхъ истечения получалась вдоль трубы довольно значительная потеря напора, которая отмѣчалась тѣмъ, что прямая ди-

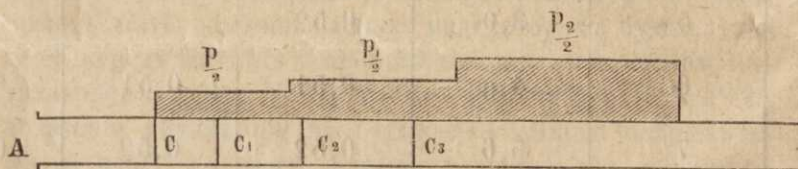
намического давленія въ будкахъ № III, № II и № I все болѣе и болѣе отдалялась отъ прямой гидростатическаго давленія. То обстоятельство, что на протяженіи всей трубы гидродинамическій напоръ постепенно падалъ, отразилось при большихъ скоростяхъ (болѣе 3 футъ) на видѣ ударныхъ диаграммъ. Выступы диаграммъ уже не имѣли гребня, почти параллельнаго динамической прямой, а этотъ гребень шелъ возвышаясь, какъ это видно на фиг. (19), дающей фотографію ударной диаграммы у будки № I при скорости воды 3,67 ф.



Фиг. 19.

Время  $t$  пробѣга ударной волной двойной длины трубы будетъ здѣсь, какъ и во всѣхъ случаяхъ, измѣряться выраженнымъ во времени двойнымъ разстояніемъ, считая по динамической прямой, отъ начала поднятія давленія до начала его паденія; что же касается опредѣленія  $P$ , то чтобы сдѣлать его правильно, слѣдуетъ глубже вникнуть въ теорію изслѣдуемаго явленія.

Разсмотримъ сначала одинъ идеальный случай гидравлическаго удара. Вообразимъ (фиг. 20) трубу  $AB$ , наполненную водою и раздѣленную задвижками  $C, C_1, C_2, C_3, \dots$  на нѣсколько полостей  $AC, CC_1, \dots$ , въ которыхъ вода находится подъ различными давленіями.



Фиг. 20.

Предположимъ, что эти давленія идутъ, возрастая въ правую сторону, и будемъ измѣрять ихъ избыткомъ надъ давленіемъ въ полости  $CA$  (давленіе которой будемъ считать за нуль); обозначимъ ихъ послѣдовательно бувами  $p, p_1, p_2, \dots$ . Пусть теперь задвижка  $C$  быстро открывается, и происходитъ гидравлическій ударъ между соприкоснувшимися колоннами воды подъ различными давленіями. Отъ этого удара частицы воды при сѣченіи  $C$  получаютъ скорость  $v$  по направленію къ концу  $A$ . Вслѣдствіе образованія этой скорости, согласно § 4, давленіе справа отъ  $C$  упадетъ на  $vh$ , а давленіе слѣва отъ  $C$  возрастетъ на ту же величину. Мы будемъ имѣть:

$$p - vh = vh,$$

$$v = \frac{p}{2h}.$$

Фаза, охарактеризованная давленіемъ  $\frac{p}{2}$  и скоростью  $\frac{p}{2h}$ , побѣжитъ вправо и влево отъ слоя  $C$  со скоростью  $\lambda$ . Предположимъ, что въ тотъ моментъ, когда эта фаза побѣгаетъ къ задвижкѣ  $C_1$ , послѣдняя открывается и про-

пеходить ударъ между двумя соприкоснувшимися колоннами въ слоѣ  $C_1$ . Отъ этого удара въ слоѣ  $C_1$  зарождается новая скорость  $\frac{p_1 - p}{2h}$  по направленію къ  $A$ , и новое давленіе  $\frac{p_1 - p}{2}$ , которыя прибавятся къ скорости и давлению, принесеннымъ отъ  $C$ , такъ что полное давленіе будутъ  $\frac{p_1}{2}$  и полныя скорости будутъ  $\frac{p_1}{2h}$ . Фаза,

охарактеризованная давленіемъ  $\frac{p_1}{2}$  и скоростью влѣво  $\frac{p_1}{2h}$ , будутъ уноситься со скоростью  $\lambda$  вправо и влѣво отъ сѣченія  $C_1$ . Когда эта фаза дойдетъ до задвижки  $C_2$ , то послѣдняя сразу открывается и т. д.

Состояніе жидкости влѣво отъ послѣдовательно открывающихся задвижекъ на основаніи всего сказаннаго можетъ быть дано такимъ построеніемъ. Вычерчиваемъ (фиг. 20) надъ трубою ступенчатый контуръ, высоты котораго равны половинамъ давленій въ соответственныхъ полостяхъ трубы, а основанія ступеней равны двойнымъ длинамъ полостей; потомъ воображаемъ, что вычерченный контуръ бѣжитъ со скоростью  $\lambda$  налѣво, а сама вершина ударной волны выдвигается направо съ тою же скоростью  $\lambda$ . Тогда ординаты контура будутъ выражать давленія во всѣхъ точкахъ трубы, лежащихъ налѣво отъ подвижной вершины волны, а величины этихъ ординатъ, раздѣленные на  $h$ , будутъ давать скорости жидкости въ соответственныхъ мѣстахъ. Число задвижекъ мы можемъ въ предѣлѣ принять безконечно большимъ и рассматривать непрерывно измѣняющееся давленіе жидкости, которое начинаетъ производить свое дѣйствіе только тогда, когда въ данное мѣсто прибѣгаетъ ударная волна. Съ подобнымъ идеальнымъ случаемъ совпадаетъ близко рассматриваемая нами задача объ ударѣ воды въ трубѣ, въ которой при истеченіи съ довольно значительной скоростью (около 3 и 4 футовъ) напоръ рѣзко падаетъ вдоль трубы. Начиная съ момента закрытія задвижки, вода въ трубѣ постепенно останавливается и этимъ освобождаются напоры, которые удерживались треніемъ текущей воды. Эти освобождающіеся напоры передаются по трубѣ совершенно такъ, какъ объяснено въ предыдущей задачѣ, и вся неточность разсужденія заключается только въ томъ, что не принято во вниманіе треніе въ трубѣ для скоростей, остающихся въ ней послѣ удара. Такъ какъ эти скорости не велики сравнительно со скоростью истеченія воды (напримѣръ, освободившійся напоръ въ 3 атмосферы даетъ по § 4 скорость 0,75 фута), то упомянутая неправильность можетъ быть допущена. Посмотримъ, какое вліяніе на ударную діаграмму произведутъ освобождающіеся напоры. Давленіе въ магистральной у насъ было 4,5 атм. выше атмосфернаго, а при концѣ трубы при скорости 3,5 фута, напр., это давленіе было 1 атм. Вся потеря напора 3,5 атм., распределенная на длину 356 саженъ трубы, даетъ около 0,01 атм. потери на погонную саженъ (трубы были новыя и давали нѣсколько меньшую потерю, нежели слѣдуетъ по Дарси и Базену; по таблицамъ Бихеле надо бы

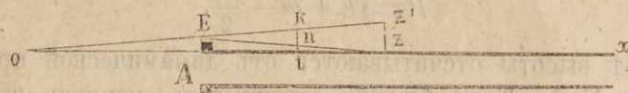
имѣть потерю около 0,014. Наибольшая скорость, которую мы получали, теряя весь напоръ, была 4,5—4,3 ф.). Назовемъ потерю напора на единицу длины трубы чрезъ  $a$  и построимъ (фиг. 21) контуръ  $ozz'$ , ордината котораго  $y$  по абсциссѣ  $x$ , отсчитываемой отъ точки  $o$ , выражается уравненіемъ:

$$y = \frac{a}{4} x.$$

Этотъ контуръ, по сказанному выше, движется со скоростью  $\lambda$  влѣво, а вершина  $zz'$  ударной волны движется вправо съ тою же скоростью  $\lambda$ .

Такъ какъ, подходя къ закрытой задвижкѣ  $A$ , фаза, выражаемая ординатами контура  $zz'o$ , приноситъ скорость  $\frac{AE}{h}$ ,

направленную къ задвижкѣ, то у задвижки зарождается другая волна, идущая направо и развивающая у задвижки такую же скорость воды съ направленіемъ къ магистральной. Легко усмотрѣть, что это будетъ волна  $AEz$ , представляющая отраженіе волны  $AEo$ .



Фиг. 21.

Ударное давленіе  $P$  во всякомъ сѣченіи  $i$ , отсчитываемое отъ динамическаго давленія въ концѣ трубы, будетъ теперь складываться изъ ударнаго давленія  $vh$  и изъ суммъ давленій  $ik$  и  $in$ .

Такимъ образомъ находимъ:

$$P = vh + (\xi + \eta) \frac{a}{4} + (\xi - \eta) \frac{a}{4},$$

гдѣ  $\xi$  — разстояніе отъ задвижки вершины ударной волны ( $\frac{\xi}{\lambda}$  — время, протекшее отъ момента закрытія задвижки), а  $\eta$  — разстояніе отъ задвижки рассматриваемаго сѣченія. Наша формула получаетъ видъ:

$$P = vh + \frac{a\xi}{2} \quad (21)$$

и показываетъ, что все измѣненіе, внесенное въ формулу выступа ударной діаграммы потерей напора при теченіи воды въ трубѣ до удара, состоитъ въ томъ, что къ гребню ударной діаграммы присоединяется соответственный отрѣзокъ линіи потеряннаго давленія, въ которомъ масштабъ абсциссъ удвоенъ и выраженъ во времени.

Если продолжимъ влѣво гребень діаграммы (19), снятой въ будкѣ № 1 чрезъ зигзаги, и проведемъ чрезъ полученное такимъ образомъ начало гребня линію, параллельную динамической прямой (динамическая прямая на нашей фиг. 19 есть средняя прямая), то разстоянія точекъ гребня отъ этой параллели дадутъ намъ соответственные напоры, потерянные на треніе при истеченіи воды до удара. На приведенной фотографіи видно, что разстояніе конца гребня отъ упомянутой параллели равно разстоянію между гидростатической и гидродинамической прямой.

Это вполне согласно съ форм. (21), которая, будучи примѣнена къ будкѣ № 1, даетъ при  $\xi = 2l$

$$P = vh + la.$$

Такъ какъ въ томъ же предположеніи имѣемъ при  $\xi = 0$

$$P = vh,$$

то можно установить слѣдующее правило опредѣленія  $vh$  по діаграммѣ въ будкѣ № 1.

Величина  $vh$  по діаграммѣ у задвижки опредѣляется высотой начала выступа надъ динамической прямой (пропуска зигзаги) или высотой конца выступа надъ прямой гидростатическаго давления.

Если примѣнимъ форм. (21) къ діаграммѣ, снятой въ какомъ нибудь сѣченіи на разстояніи  $\eta$  отъ задвижки, то для полученія высоты начала выступа мы должны положить  $\xi = \eta$ , что даетъ:

$$P = vh + \frac{a\eta}{2};$$

для полученія же высоты конца первого выступа надо положить  $\xi = \eta + 2(l - \eta)$ , что даетъ:

$$P = vh + al - \frac{a\eta}{2}.$$

Обѣ высоты отсчитываются отъ динамической прямой будки № 1. Если будемъ отсчитывать первую высоту отъ динамической прямой для сѣченія  $i$ , то найдемъ:

$$P = vh - \frac{a\eta}{2},$$

а если вторую высоту будемъ отсчитывать отъ гидростатической кривой, то получимъ:

$$P = vh - \frac{a\eta}{2}.$$

Такимъ образомъ величина  $vh$  по діаграммамъ, снятымъ въ какомъ нибудь сѣченіи, равна высотѣ начала выступа надъ динамической, или высотѣ конца выступа надъ гидростатической прямой съ прибавкой  $\frac{a\eta}{2}$ .

Въ нижеприведенной таблицѣ помѣщены наблюденія надъ гидравлическими ударами въ трубѣ 2", произведенныя 23 сент. 1897 г. Діаграммы снимались въ трехъ будкахъ: № I, № II и № III (см. фиг. 7), расположенныхъ отъ начала трубы на разстояніяхъ: 356,34 сажени, 234,33 сажени и 117,43 сажени, отношеніе которыхъ близко къ 3:2:1. Время  $t''$  двойного пробѣга ударною волною двойного разстоянія всей трубы опредѣлялось изъ всѣхъ трехъ діаграммъ, какъ было объяснено въ § 10; величина ударнаго давления  $P = vh$  опредѣлялась изъ высотъ конца выступовъ надъ статическою прямою и для діаграммъ будокъ № II и № III поправлялась прибавкою  $\frac{a\eta}{2}$ . Такъ какъ будка № II отстояла на  $\frac{2}{3}$  длины трубы отъ конца, а будка № III на  $\frac{1}{3}$ , то это сводилось къ тому, что въ будкѣ № II измѣрялась высота конца выступа надъ прямою, лежащею ниже статической на  $\frac{1}{4}$  ея разстоянія отъ динамической прямой, а въ будкѣ № III измѣрялось разстояніе отъ динамической прямой. При этомъ величины, найденныя изъ высотъ конца выступовъ, выходили близкими тѣмъ, которыя получались изъ высотъ начала гребней. Время затвора опредѣлялось по концу первого выступа на діаграммахъ № II. Давленіе въ магистрали было 4,5 атм.

Наблюденія 23 сентября 1897 г. надъ гидравлическими ударами въ трубѣ 2", сдѣланныя посредствомъ индикаторовъ.

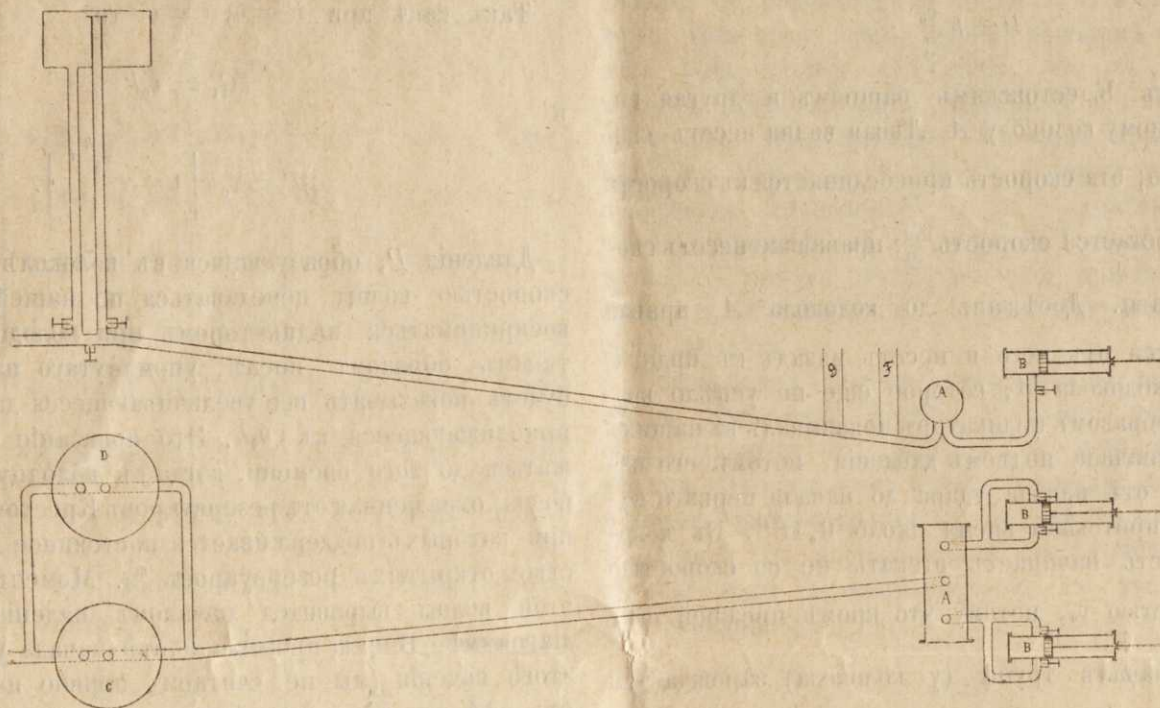
| Нумеръ опыта. | Скорость въ трубѣ въ фут. | Время $t''$ изъ будки № I. | Время $t''$ изъ будки № II. | Время $t''$ изъ будки № III. | Двойное время пробѣга отъ будки № II до нач. | Двойное время пробѣга отъ будки № III до нач. | Время $\tau''$ | $P$ въ атм. изъ № I. | $P$ въ атм. изъ № II. | $P$ въ атм. изъ № III. | $P = 4v$ . |
|---------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|------------------------|------------|
| 1             | 4,52                      | 1,16                       | 1,15                        | 1,15                         | 0,77                                         | 0,38                                          | 0,08           | 18,5                 | 18,0                  | 18,0                   | 18,1       |
| 2             | 4,30                      | 1,13                       | 1,15                        | 1,15                         | 0,78                                         | 0,39                                          | 0,06           | 17,8                 | 17,5                  | 16,7                   | 17,2       |
| 3             | 4,16                      | 1,14                       | 1,13                        | 1,13                         | 0,78                                         | 0,40                                          | 0,06           | 17,0                 | 16,6                  | 16,0                   | 16,6       |
| 4             | 3,67                      | 1,15                       | 1,13                        | 1,13                         | 0,76                                         | 0,37                                          | 0,06           | 15,1                 | 15,0                  | 14,5                   | 14,7       |
| 5             | 3,67                      | 1,14                       | 1,13                        | 1,14                         | 0,75                                         | 0,40                                          | 0,05           | 14,5                 | 14,4                  | 14,6                   | 14,7       |
| 6             | 3,66                      | 1,14                       | 1,13                        | 1,13                         | 0,76                                         | 0,39                                          | 0,06           | 14,6                 | 14,6                  | 15                     | 14,6       |
| 7             | 1,79                      | 1,14                       | 1,14                        | 1,13                         | 0,76                                         | 0,39                                          | 0,05           | 6,3                  | 5,9                   | 6,3                    | 7,2        |
| 8             | 1,76                      | 1,14                       | 1,14                        | 1,13                         | 0,76                                         | 0,39                                          | 0,06           | 7,3                  | 7,3                   | 7,2                    | 7,0        |
| 9             | 0,64                      | 1,14                       | 1,15                        | 1,14                         | 0,75                                         | 0,39                                          | 0,06           | 2,8                  | 2,8                   | 2,5                    | 2,6        |
| 10            | 1,52                      | 1,14                       | —                           | 1,15                         | —                                            | 0,39                                          | 0,05           | 6,3                  | 6,3                   | 6,3                    | 6,1        |
| 11            | 1,52                      | 1,13                       | 1,13                        | 1,13                         | 0,75                                         | 0,38                                          | 0,06           | 6,3                  | 6,3                   | 6,1                    | 6,1        |
| 12            | 4,23                      | 1,14                       | 1,13                        | 1,13                         | 0,76                                         | 0,39                                          | 0,07           | 17,3                 | 16,7                  | 16,1                   | 16,9       |

Среднее время пробѣга двойной длины трубы, т. е. 712,68 сажени 1,14". Этому времени соответствует скорость ударной волны

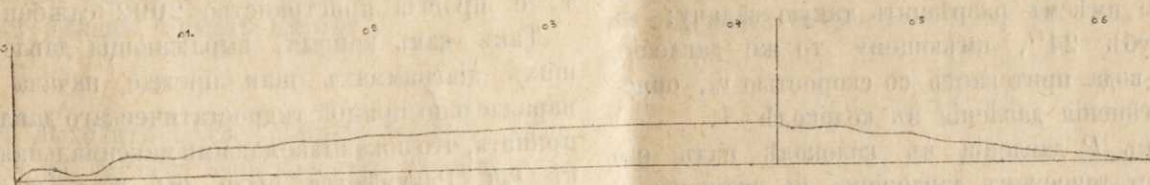
$$\lambda = 625.$$

Если бы мы воспользовались числами шестой или седьмой колонны, дающими время пробѣга ударною волною разстояній 468,66 и 234,86 сажень, то должны бы взять среднія величины этихъ чиселъ 0,76 и 0,39. Это дало бы намъ нѣсколько меньшія значенія скорости ударной волны:  $\lambda = 617$  и  $\lambda = 602$ .

водою (было обращено существенное вниманіе, чтобы въ немъ не осталось нисколько воздуха). Вода выпускалась изъ колодца *G* чрезъ ту же задвижку, которую мы употребляли при ударѣ въ трубахъ 6". Индикаторъ былъ соединенъ съ магистралію чрезъ колодезь *G* и былъ помѣщенъ въ будкѣ № 1; на немъ ставились сравнительно слабыя пружины (8 мм.—одна атмосфера) и на его катушку помѣщалась удлинненная бумажная лента (см. фиг. 13). Маятникъ для нанесенія отмѣтокъ на лентѣ употреблялся при этихъ опытахъ не полусекундный, какъ прежде, а секундный.



Фиг. 22.



Фиг. 23.

Ударное давленіе хорошо согласуется съ форм. § 4. Время  $\tau$  увеличилось отъ перемѣны задвижки.

§ 12. *Опредѣленіе  $\lambda$  и  $P$  изъ діаграммъ индикатора при наблюденіяхъ надъ трубою 24".*

Труба въ 24", надъ которою мы дѣлали наблюденія, была главная магистраль города Москвы, идущая отъ Алексѣвской водокачки къ Крестовскимъ банямъ. На протяженіи отъ мѣста удара при колодезѣ *G* (фиг. 22) до Крестовскихъ башенъ она имѣла 1001 сажень; разстояніе же отъ колодца *G* до воздушнаго колокола было 30 сажень. При наблюденіи насосы были отдѣлены отъ трубы задвижкою и весь колодезь *A* былъ наполненъ

По прошествіи нѣкотораго времени, съ момента паденія гири и закрытія задвижки, ударная волна добѣгала до воздушнаго колпака, въ которомъ происходило сжатіе воды и давленіе передавалось постепенно по трубѣ 24", вдоль которой происходила постепенная остановка воды. При такомъ условіи удара не наблюдалось быстрого подъема давленія на діаграммѣ, какъ въ нашихъ прежнихъ опытахъ, и видъ діаграммы вслѣдствіе эффекта водяного колпака былъ таковъ, какъ будто задвижка закрывалась медленно. При этомъ начало діаграммы имѣло волнистый видъ, какъ это видно на фиг. (23), дающей въ уменьшенномъ видѣ діаграмму при потерянной ско-

рости въ трубѣ 0,48 ф. и ударномъ давленіи 1,6 атм. Эта волнистость, объясненіе которой будетъ дано ниже, позволяла намъ хорошо опредѣлять начало паденія давленія на діаграммѣ и вычислить время, протекшее отъ начала удара до начала этого паденія.

Упомянутое время, какъ сейчасъ увидимъ, равно времени пробѣга ударною волною по трубѣ 24" двойного пространства отъ колодца *G* до Крестовскихъ башенъ. Если  $v_0$  будетъ скорость въ трубѣ 24" при истеченіи воды отъ задвижки, то въ моментъ закрытія задвижки побѣгутъ отъ мѣста удара двѣ волны съ ударнымъ давленіемъ

$$P = h \frac{v_0}{2}$$

одна налѣво къ Крестовскимъ башнямъ и другая направо къ водяному колоколу *A*. Лѣвая волна несетъ скорость  $\frac{v_0}{2}$  налѣво; эта скорость присоединяется къ скорости направо  $v_0$  и остается скорость  $\frac{v_0}{2}$ ; правая же несетъ скорость  $\frac{v_0}{2}$  направо. Добѣжавъ до колокола *A*, правая волна отражается отъ него и несетъ назадъ къ индикатору давленіе колокола *A*, которое еще не успѣло возрасти. Такимъ образомъ индикаторъ показывалъ въ нашихъ наблюденіяхъ сначала подъемъ давленія, потомъ его паденіе, причемъ отъ начала удара до начала первого паденія давленія протекало время около 0,18". Въ колоколѣ *A* жидкость начинаетъ втекать не со скоростью  $\frac{v_0}{2}$ , а со скоростью  $v_0$ , потому что кромѣ прежней скорости  $\frac{v_0}{2}$  при началѣ трубы (у колокола) зарождается еще направленная къ колоколу скорость  $\frac{v_0}{2}$  вслѣдствіе паденія давленія. Послѣ этого, для объясненія дальнѣйшаго хода явленія, мы имѣемъ разрѣшить такую задачу: къ колоколу, по трубѣ 24", имѣющему то же давленіе, какъ въ трубѣ, вода притекаетъ со скоростью  $v_0$ , опредѣлить ходъ измѣненія давленія въ колоколѣ *A*.

Пусть избытокъ  $P$  давленія въ колоколѣ надъ его прежнимъ гидростатическимъ давленіемъ по скорости  $v$ , вталкиваемой въ него жидкости, опредѣляется формулою:

$$\frac{dP}{dt} = kv,$$

гдѣ  $k$  есть постоянное, зависящее отъ объема воды въ колоколѣ и толщины его стѣнокъ. Беремъ производную отъ обѣихъ частей этой формулы по времени и пользуемся соотношеніемъ:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{h} \frac{dP}{dt}$$

гдѣ  $h$  есть величина, опредѣляемая по § 4 для трубы 24". Получаемъ:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{dP}{dt} + \frac{k}{h} P \right] = 0.$$

Такимъ образомъ

$$\frac{dP}{dt} + \frac{k}{h} P = C.$$

Въ начальный моментъ

$$P = 0, \frac{dP}{dt} = kv_0;$$

поэтому постоянное  $C$  есть  $kv_0$  и

$$\frac{dP}{hv_0 - P} = \frac{k}{h} dt.$$

Интегрируя это уравненіе, находимъ:

$$v_0 h - P = C_1 e^{-\frac{k}{h} t}.$$

Такъ какъ при  $P = 0, t = 0$ , то

$$C_1 = v_0 h$$

и

$$P = v_0 h \left[ 1 - e^{-\frac{k}{h} t} \right]. \quad (22)$$

Давленія  $P$ , образующіяся въ колоколѣ *A*, должны со скоростью волны передаваться по нашей трубѣ 24" и восприниматься индикаторомъ при колодцѣ *G*, который такимъ образомъ послѣ упомянутого паденія давленія будетъ показывать все увеличивающееся давленіе, быстро приближающееся къ  $v_0 h$ . Это показаніе будетъ продолжаться до того времени, когда къ колодцу *G* подбѣжитъ волна, отраженная отъ резервуаровъ Крестовскихъ башенъ, при которыхъ поддерживается постоянное давленіе вслѣдствіе открытых резервуаровъ \*). Моментъ подхожденія этой волны выразится началомъ паденія давленія на діаграммѣ. Время, протекшее отъ начала удара до начала этого паденія (мы не считаемъ первое паденіе давленія отъ эффекта колокола), будетъ равно времени, въ которое ударная волна отъ колодца *G* дошла до Крестовскихъ башенъ и потомъ возвратилась назадъ къ колодцу *G*, т. е. припла пространство 2002 сажени.

Такъ какъ кривыя, выражающія давленіе  $P$ , на нашихъ діаграммахъ шли прежде начала паденія почти параллельно прямой гидростатическаго давленія, то можно принять, что показываемая ими максимальная высота близка къ  $v_0 h$ . Разумѣется, было бы желательно произвести опыты надъ ударомъ съ трубами большихъ диаметровъ, неосложненные присоединеніемъ воздушнаго колокола, но въ нашихъ наблюденіяхъ встрѣчалось практическое затрудненіе — отдѣлить отъ главной магистрали города Москвы воздушный колоколъ. Выступъ, представленный на фиг. (22), смѣнялся на дальнѣйшей части діаграммы впадиной и, такимъ образомъ, получалось на лентѣ до 5 волнъ, но эти выступы и впадины вслѣдствіе эффекта колокола не были вполнѣ тождественны, что можно объяснить на основаніи вышеизложенной теоріи. Во всякомъ случаѣ для опредѣленія величинъ  $\lambda$  и  $P$  было вполнѣ достаточно перваго выступа. Ниже приводится таблица наблюденій, сдѣланныхъ 25 іюля 1898 года.

\*) Мы употребляемъ слово отраженная волна въ болѣе широкомъ смыслѣ, нежели принято обыкновенно: всякую новую волну, зародившуюся при границахъ, мы называемъ волною, отраженною отъ этихъ границъ.

Въ этой таблицѣ дана скорость воды до сотыхъ долей фута, которая получалась, для минутное количество воды въ пудахъ на 325,76. Величину  $h$ , которая по § 4 должна бы быть 2,7, мы принимаемъ равной 3. (Это число соотвѣтствуетъ наблюденному  $\lambda = 473$ ).

Наблюденія 25 июля 1897 года надъ гидравлическими ударами въ трубѣ 24", сдѣланныя посредствомъ индикатора.

| Нумеръ опыта. | Скорость въ трубѣ въ футахъ. | Время двойного пробѣга Кр. баш. | Длина первого выст. во времени. | Длина второго выст. во времени. | Время двойного пробѣга до кол. | Наблюденное давленіе въ атм. | $P = 3v$ . |
|---------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------|
| 1             | 0,18                         | —                               | 6,44"                           | 7,02"                           | —                              | 0,45                         | 0,54       |
| 2             | 0,56                         | 4,24                            | 6,43                            | 7,00                            | 0,19'                          | 1,81                         | 1,68       |
| 3             | 0,55                         | 4,39                            | 6,30                            | 6,85                            | 0,16                           | 1,66                         | 1,65       |
| 4             | 0,54                         | 4,20                            | 6,24                            | 6,96                            | 0,20                           | 1,77                         | 1,62       |
| 5             | 0,55                         | 4,18                            | 6,20                            | 6,89                            | 0,18                           | 1,80                         | 1,65       |
| 6             | 0,41                         | 4,20                            | 6,40                            | 7,00                            | 0,18                           | 1,23                         | 1,23       |
| 7             | 0,40                         | 4,18                            | 6,32                            | 6,70                            | 0,16                           | 1,27                         | 1,20       |
| 8             | 0,16                         | —                               | 6,24                            | 7,18                            | —                              | 0,42                         | 0,48       |
| 9             | 0,16                         | —                               | 6,44                            | 6,68                            | —                              | 0,42                         | 0,48       |
| 10            | 0,09                         | —                               | 6,70                            | 6,60                            | —                              | 0,29                         | 0,27       |

Среднее изъ временъ, записанныхъ въ третьей колоннѣ этой таблицы, будетъ 4,23'; раздѣляя на это число разстояніе 2002 сажень, будемъ имѣть:

$$\lambda = 473.$$

Эта скорость выходитъ болѣе данной въ § 3. Если же остановиться на числахъ 6-ой колонны, дающихъ для время пробѣга отъ колодца  $G$  до воздушнаго колокола, т. е. 60 сажень, среднюю величину 0,18", то получимъ скорость волны  $\lambda = 333$ ; но точность этого послѣдняго результата не велика, такъ какъ моментъ начала опущенія перваго возвышенія діаграммы было затруднительно измѣрять (см. фиг. 22). Что касается до формулы  $P = 3v$ , принятой нами для опредѣленія ударнаго давленія, то она, какъ видно изъ сравненія колоннъ 7-ой и 8-ой, довольно удовлетворительна.

§ 13. *Возрастаніе величины гидравлическаго удара при переходѣ ударной волны въ тупики.*

Установивъ основныя данныя о гидравлическомъ ударѣ въ водопроводныхъ трубахъ различныхъ діаметровъ, мы перешли къ изслѣдованію обстоятельствъ, могущихъ увеличить силу удара. Особенно значительное возрастаніе силы гидравлическаго удара происходитъ при переходѣ ударной волны отъ толстыхъ трубъ на тонкія и проявляется

въ тупикахъ тонкихъ трубъ. Наблюденія производились нами надъ переходомъ ударной волны, образовавшейся въ трубѣ 4" на трубу въ 2". Для этой цѣли труба въ 2" была разобрана и оставлена только ея вѣтка въ 73,82 сажени, идущая отъ постоянной будки № I (фиг. 7) до будки № II. Эта вѣтка была соединена возлѣ будки № I съ концомъ трубы въ 4", которая была оставлена въ своемъ прежнемъ видѣ, и соединялась съ выпускной задвижкой и индикаторомъ будки № I, при чемъ трубка, идущая къ индикатору была прикрѣплена къ трубѣ 4" нѣсколько дальше точки ея соединенія съ вѣткою трубы въ 2". Конецъ вѣтки въ 2" соединялся съ индикаторомъ будки № II и оканчивался краномъ. Изъ этого крана передъ началомъ опыта выпускалась вода, чтобы убѣдиться, что въ трубѣ 2" нѣтъ воздуха. Потомъ кранъ закрывался и вѣтка обращалась въ тупикъ. Производилось обычнымъ образомъ истеченіе воды изъ трубы въ 4" чрезъ задвижку съ опредѣленіемъ количества вытекающей воды и записью гидродинамическихъ прямыхъ въ будкахъ № I и № II (при концѣ трубы 2"); потомъ спускалась гири, производящая затворъ задвижки, и снимались ударныя діаграммы въ упомянутыхъ будкахъ.

Постараемся сначала теоретически опредѣлить видъ этихъ діаграммъ. Пусть  $P$  будетъ ударное давленіе, образовавшееся въ трубѣ 4" въ моментъ закрытія задвижки. Это давленіе будетъ передано на трубу въ 2" и будетъ распространяться въ ней со скоростью волны  $\lambda'$  вмѣстѣ съ зародившеюся въ трубѣ 2" скоростью теченія воды  $u$ , направленною къ тупику, при чемъ на основаніи § 4

$$u = \frac{P}{\rho \lambda'}.$$

Такъ какъ вслѣдствіе этого теченія изъ трубы въ 4" въ трубу въ 2" въ первой будетъ оставаться по направленію къ задвижкѣ скорость

$$\frac{P}{\rho \lambda'} - \frac{v^2}{R^2},$$

гдѣ  $r = 1$  и  $R = 2$ , то ударное давленіе въ трубѣ 4" должно будетъ уничтожить только скорость

$$v - \frac{P}{\rho \lambda'} - \frac{v^2}{R^2},$$

гдѣ  $v$  скорость воды въ трубѣ 4" во время истеченія.

Называя чрезъ  $\lambda$  скорость волны въ трубѣ 4", можемъ теперь по § 4 написать, что

$$P = \rho \lambda v - P \frac{\lambda}{\lambda'} \frac{v^2}{R^2},$$

откуда

$$P = \frac{\rho \lambda v}{1 + \frac{\lambda}{\lambda'} \frac{v^2}{R^2}}. \quad (23)$$

Такимъ образомъ присоединеніе тупика уменьшаетъ ударное давленіе въ трубѣ 4". Это уменьшеніе вслѣдствіе близости  $\lambda$  и  $\lambda'$  между собою будетъ для нашего

случай  $\left(\frac{r^2}{R^2} = \frac{1}{4}\right)$  составлять потерю  $\frac{1}{5}$  всего ударного давления, такъ что, принимая  $\rho\lambda = 4$  атм., будемъ имѣть:

$$P = \frac{16}{5} v. \quad (24)$$

Въ моментъ подхода ударной волны къ концу тупика должна быть уничтожена скорость  $u$ , направленная къ его закрытому концу. Это разовьетъ новое ударное давление, равное  $P$ , которое присоединится къ прежнему давлению  $P$ , и манометръ въ будкѣ № II покажетъ давление

$$P_1 = 2P. \quad (25)$$

Фаза съ давленіемъ  $2P$  и скоростью нуль побѣжитъ назадъ по трубѣ 2" и достигнетъ до конца трубы 4" прежде, нежели ударная волна, отраженная отъ магистрали, подойдетъ по трубѣ 4" къ задвижкѣ. Произойдетъ подъемъ давленія въ концѣ трубы 4" до величины  $P'$ , заключенной между  $P$  и  $2P$ . Эту величину  $P'$  слѣдуетъ опредѣлить. Отъ паденія давленія при началѣ трубы 2" на  $2P - P$  въ ней зародится скорость, направленная къ трубѣ 4" и равная

$$\frac{2P - P'}{\rho\lambda'}$$

Эта скорость дастъ въ трубѣ 4" по направленію къ магистрали скорость

$$\frac{2P - P'}{\rho\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2,$$

но такъ какъ въ трубѣ имѣлась скорость

$$\frac{P}{\rho\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2,$$

направленная къ задвижкѣ, то добавочная сила удара  $P' - P$  должна будетъ прибавить къ этой скорости по направленію къ задвижкѣ скорость

$$\frac{3P - P'}{\rho\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2.$$

Мы получаемъ соотношеніе:

$$P' - P = \frac{\lambda}{\lambda'} (3P - P') \left(\frac{r}{R}\right)^2,$$

откуда слѣдуетъ, что

$$P' = \frac{P \left[ 3 \frac{\lambda}{\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 1 \right]}{1 + \frac{\lambda}{\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2}. \quad (26)$$

Для разсматриваемаго случая можно будетъ написать:

$$P' = \frac{7}{5} P \quad (27)$$

На основаніи фор. (26) скорость въ тр. 2" будетъ:

$$\frac{2P - P'}{\rho\lambda'} = \frac{P \left[ 1 - \frac{\lambda}{\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right]}{\rho\lambda' \left[ 1 + \frac{\lambda}{\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right]}.$$

Фаза, несущая эту скорость, направленную къ трубѣ 4", и давленіе  $P'$  побѣжитъ по трубѣ 2" и, достигнувъ конца тупика, произведетъ, такъ сказать, отрицательный ударъ. Для того, чтобы уничтожилась вышеупомянутая скорость, направленная отъ конца тупика, при этомъ концѣ должно развиваться добавочное отрицательное ударное давленіе

$$- \frac{P \left[ 1 - \frac{\lambda}{\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right]}{1 + \frac{\lambda}{\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2},$$

которое, соединившись съ принесеннымъ положительнымъ давленіемъ  $P'$ , заставитъ индикаторъ при будкѣ № II показывать давленіе

$$P_1 = \frac{4P \frac{\lambda}{\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2}{1 + \frac{\lambda}{\lambda'} \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad (28)$$

что для нашего случая даетъ:

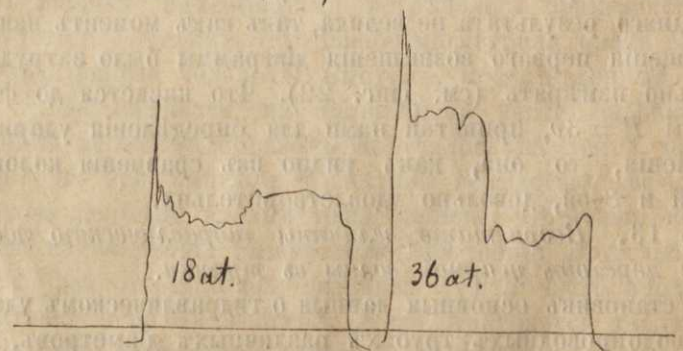
$$P_1 = \frac{4}{5} P. \quad (29)$$

Такъ какъ въ нашихъ наблюденіяхъ длина тупика въ 2" была 73, 82 сажени, а длина трубы 4" отъ задвижки до магистрали была 150 сажень, то ударная волна успѣвала пробѣжать вдоль трубы 2" четыре раза прежде, нежели при задвижкѣ трубы 4" происходилъ отрицательный ударъ вслѣдствіе отрицательной скорости, поданной отъ магистрали. Когда этотъ ударъ наступалъ, то происходило паденіе давленія при задвижкѣ до нулевой черты, которое передавалось по трубѣ 2" и вызывало по прошествіи времени пробѣга ударною волною длины этой трубы подобное же паденіе давленія въ концѣ тупика.

На основаніи всего сказаннаго ударныя діаграммы въ будкахъ № I и № II имѣли каждая видъ двухъ ступеней, почти равныхъ по длинѣ (по времени). Ступени на діаграммѣ № I шли возвышаясь и, согласно форм. (27),

были  $P$  и  $\frac{7}{5} P$ ; ступени же на діаграммѣ № II шли понижаясь и, согласно формуламъ (25) и (29), были  $2P$  и  $\frac{4}{5} P$ .

$$v = 5,88 \text{ ф.}$$



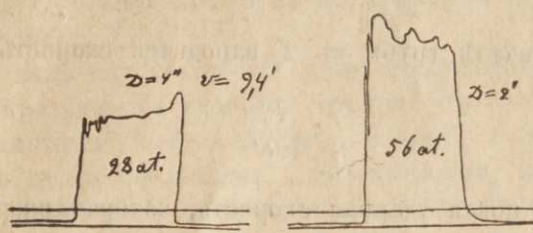
Фиг. 24.

На фиг. (24) даны фотографіи подобныхъ діаграммъ при скорости въ трубѣ 4", равной 5, 9 ф., при чемъ пра-

вая діаграмма соотвѣтствуетъ будкѣ № II, а лѣвая будкѣ № I.

Мы видимъ, что видъ этихъ діаграммъ вполне согласенъ съ изложенной теоріею, при этомъ высота первой ступени, считая отъ динамической прямой, на правой діаграммѣ есть 36 атмосферъ и ровно въ два раза болѣе наибольшей высоты первой ступени лѣвой діаграммы, которая равна 18 атм.

На фиг. (25) даны діаграммы, наблюденныя при скорости въ трубѣ 4", равной 9,4 фута. Здѣсь давление въ тупикѣ 56 атмосферъ правой діаграммы тоже въ два раза болѣе давления въ 28 атмосферъ лѣвой діаграммы, но вторыхъ ступеней нѣтъ. Это произошло оттого, что въ тотъ моментъ, когда ударная волна съ двойнымъ давлениемъ пришла отъ тупика къ трубѣ 4", произошелъ разрывъ въ колѣнѣ, соединяющемъ трубу 4" съ задвижкой, причемъ изъ этого колѣна вырвало большой кусокъ трубы.



Фиг. 25.

Нижѣ помѣщается таблица нашихъ наблюденій надъ ударами въ трубѣ 4", соединенной съ тупикомъ 2", которыя производились 4 ноября 1897 года.

Въ этой таблицѣ, между прочимъ, записано и время двойного пробѣга ударною волною двойной длины тупика, т.е. 147, 64 саж.

Это время опредѣлялось, какъ средняя величина между шириною первыхъ ступеней на діаграммахъ № I и № II, при чемъ показанія изъ обѣихъ діаграммъ были или одинаковы или разнились на 0,01".

Наблюденія 4 ноября 1897 года надъ передачею ударной волны изъ трубы 4" на тупикъ въ 2".

| Нумеръ опыта. | Скорость $v$ въ трубѣ 4" въ фут. | Двойное время пробѣга тупика. | $P$ въ атм. изъ будки № I. | $P = \frac{16}{5} v$ . | $P'$ въ атм. изъ будки № I. | $P' = \frac{7}{5} P$ . | $P_1$ въ атм. изъ будки № II. | $P_1 = 2P$ . | $P_1'$ въ атм. изъ будки № II. | $P_1' = \frac{4}{5} P$ . |
|---------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1             | 8,6                              | 0,240"                        | 27,5                       | 27,5                   | 38,6                        | 38,5                   | 54,6                          | 55,0         | 23,3                           | 22,0                     |
| 2             | 7,3                              | 0,235                         | 23,5                       | 23,4                   | 32,0                        | 32,8                   | 46,6                          | 46,8         | 20,0                           | 18,7                     |
| 3             | 5,7                              | 0,246                         | 18,6                       | 18,2                   | 25,3                        | 25,5                   | 37,3                          | 36,4         | 16,0                           | 14,6                     |
| 4             | 9,8                              | 0,240                         | 30,7                       | 31,4                   | 42,7                        | 43,9                   | 60,6                          | 62,8         | 26,6                           | 25,1                     |
| 5             | 10,2                             | 0,250                         | 33,3                       | 32,6                   | 44,0                        | 45,6                   | 61,3                          | 65,2         | 26,6                           | 26,1                     |
| 6             | 1,6                              | 0,230                         | 5,3                        | 5,1                    | 7,0                         | 7,1                    | 10,6                          | 10,2         | 4,1                            | 4,1                      |
| 7             | 1,9                              | 0,240                         | 5,9                        | 6,1                    | 8,3                         | 8,5                    | 12,0                          | 12,2         | 4,7                            | 4,9                      |

Въ этой таблицѣ колонны 7, 9 и 11 составлены по формуламъ (27), (25) и (29), принимая въ нихъ за  $P$  его теоретическую величину, взятую изъ колонны (5). Разсматривая таблицу, видимъ, что теорія, изложенная въ этомъ параграфѣ, весьма удовлетворительно подтверждается наблюденіями. Мы сочли интереснымъ опредѣлить время пробѣга ударною волною двойной длины тупика, такъ какъ здѣсь явленіе нѣсколько отличается отъ предыдущихъ и ударъ въ тупикѣ производится не оставкою текущей въ немъ воды, а быстрымъ поднятіемъ давления у его начала. Среднее время пробѣга выходитъ 0,24", что даетъ намъ

$$\lambda = 615.$$

Это число близко съ тѣми, которыя были найдены въ § 11.

Кромѣ наблюденій надъ переходомъ ударной волны изъ трубы 4" на тупикъ въ 2", были еще сдѣланы нами аналогичныя наблюденія, соединивъ вышеупомянутый тупикъ 2" съ трубою 6", которая была оставлена безъ измѣненія, какъ показано на фиг. (7) (наружная черная петля въ 152,3 сажени). Форм. (23), (26), (25) и

(28) для случая  $\left(\frac{r}{R}\right)^2 = \frac{1}{9}$  даютъ:

$$P = 0,9\lambda v = 3,6v,$$

$$P' = \frac{6}{5} P,$$

$$P_1 = 2P, \quad (30)$$

$$P_1' = \frac{2}{5} P.$$

Приводимъ здѣсь результаты 3-хъ наблюденій, сдѣланныхъ 8 декабря 1897 г.

## Наблюдения 8 декабря 1897 года надъ передачею ударной волны изъ трубы 6" на тупикъ въ 2".

| Нумеръ<br>опыта. | Скорость $v$<br>въ трубѣ 6"<br>въ ф. | $P$ въ атм.<br>изъ будки<br>№ I. | $P = 3,6v$ . | $P_1$ въ атм.<br>изъ будки<br>№ I. | $P' = \frac{6}{5} P$ . | $P'$ въ атм.<br>изъ будки<br>№ II. | $P_1 = 2P$ . | $P_1'$ въ атм.<br>изъ будки<br>№ II. | $P_1' = \frac{2}{5} P$ . |
|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|--------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1                | 3,0                                  | 9,7                              | 10,8         | 12,3                               | 12,9                   | 20,2                               | 21,6         | 5,5                                  | 4,3                      |
| 2                | 5,0                                  | 16,5                             | 18,0         | 20,3                               | 21,6                   | 33,3                               | 36           | 8,5                                  | 7,2                      |
| 3                | 8,0                                  | 27,5                             | 28,8         | 32,6                               | 34,6                   | 52,6                               | 57,6         | 14,3                                 | 11,5                     |

§ 14. Отраженіе ударной волны отъ открытаго конца трубы, изъ котораго вытекаетъ вода.

Мы воспользовались присоединеніемъ трубы въ 2" къ трубѣ въ 6", чтобы изслѣдовать отраженіе ударной волны отъ струи истекающей воды. Эти опыты имѣли интересъ, какъ подтвержденіе той мысли, что ударъ распространяется по текущей водѣ по тѣмъ же законамъ, какъ вдоль покойной воды, и опредѣляется только по потеряннѣмъ скоростямъ. Опытъ располагался такъ: кранъ при концѣ тупика открывался и вода изъ трубы 2" изливалась; потомъ открывалась задвижка въ концѣ трубы 6" и опредѣлялось количество воды, истекающей изъ-подъ поднятой задвижки; послѣ чего производилось быстрое закрытіе задвижки и снималась ударная діаграмма въ будкѣ № I.

Опредѣлимъ теоретически, каковъ долженъ быть видъ этой діаграммы. Въ моментъ закрытія задвижки при основаніи трубы 2" развивается давленіе  $P_1$ , опредѣляемое по форм. (23), гдѣ скорость  $v$  находится только по скорости воды, истекающей изъ-подъ задвижки, скорость же въ трубѣ 6", происходящая отъ истечения воды въ трубу 2", остается въ трубѣ 6" безъ перемѣны и не оказываетъ вліянія на ударъ.

Отъ момента закрытія задвижки по трубѣ 2" побѣжитъ ударное давленіе  $P$  и добавочная скорость

$$\frac{P}{\rho \lambda'},$$

направленная къ концу трубы 2".

Когда эта волна дойдетъ до открытаго конца трубы, тогда отъ послѣдняго побѣжитъ къ трубѣ 6" фаза, опредѣленная давленіемъ 0 и скоростью

$$2 \frac{P}{\rho \lambda'},$$

направленною къ концу трубы въ 2".

Когда эта волна дойдетъ до трубы 6", то въ ней давленіе повысится сразу до  $P'$ . Отъ поднятія давленія на

$P'$  при началѣ трубы въ 2" зародится скорость

$$\frac{P'}{\rho \lambda'},$$

такъ что новая ударная скорость, которая разовьется у начала трубы 2" по направленію къ ея концу (мы не

считаемъ прежнюю скорость  $\frac{P}{\rho \lambda'}$ ), будетъ:

$$\frac{P + P'}{\rho \lambda'}.$$

Эта скорость разовьется при началѣ трубы по направленію къ задвижкѣ скорость

$$\frac{(P + P')v^2}{\rho \lambda' R^2},$$

что вызоветъ уменьшеніе давленія на

$$\frac{\lambda}{\lambda'} \frac{v^2}{R^2} (P + P').$$

Такимъ образомъ

$$P - \frac{\lambda}{\lambda'} \frac{v^2}{R^2} (P + P') = P',$$

откуда

$$P' = \frac{P}{1 + \frac{\lambda}{\lambda'} \frac{v^2}{R^2}} \left( 1 - \frac{\lambda}{\lambda'} \frac{v^2}{R^2} \right). \quad (31).$$

Примѣнительно къ разсматриваемому случаю, въ которомъ приблизительно  $\lambda = \lambda'$  и

$$\frac{v^2}{R^2} = \frac{1}{9},$$

будемъ имѣть:

$$P = 0,9 \rho \lambda v = 3,6v,$$

$$P' = 0,8P.$$

Приводимъ здѣсь результаты трехъ наблюдений, произведенныхъ 3 декабря 1897 г.

Наблюдения 3 декабря 1897 года надъ отраженіемъ удара, принесеннаго изъ трубы 6" въ трубу 2" съ открытымъ концомъ.

| Нумеръ опыта. | Скорость въ трубѣ 6", со- отвѣт. ист. въ бакъ. | Давленіе $P$ по діагр. № I. | $P=3,6v$ . | Давленіе $P$ по діагр. № I. | $P'=0,8P$ . |
|---------------|------------------------------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|-------------|
| 1             | 5,7                                            | 21,7                        | 20,5       | 19,5                        | 16,4        |
| 2             | 8,0                                            | 27,1                        | 28,8       | 24,0                        | 23,0        |
| 3             | 7,4                                            | 26,3                        | 26,6       | 23,5                        | 21,3        |

§ 15. О безопасномъ времени закрытія водовыпускныхъ крановъ.

Такъ какъ гидравлическій ударъ происходитъ отъ быстрого прекращенія скорости теченія воды въ трубахъ, то онъ можетъ быть ослабленъ и почти совсѣмъ уничтоженъ приспособленіями, допускающими только медленное запираніе водовыпускныхъ крановъ и задвижекъ. Опредѣлимъ время  $t$  этого запиранія подъ условіемъ, чтобы ударное давленіе не превосходило данной величины  $P$ . Предполагая для простоты, что во время запиранія крана количество изливашейся жидкости уменьшается пропорціонально времени, найдемъ, что скорость въ трубѣ  $v$  уменьшится на

$$\frac{v}{t} \frac{2l}{\lambda}$$

въ то время, какъ ударная волна, отразившись отъ магистрали или вообще отъ того мѣста, гдѣ имѣется постоянное давленіе, возвратится назадъ къ крану и принесетъ къ нему это постоянное давленіе; при этомъ  $l$  есть длина трубы до магистрали, а  $\lambda$  — скорость ударной волны. Указанному уменьшенію скорости соотвѣтствуетъ под-

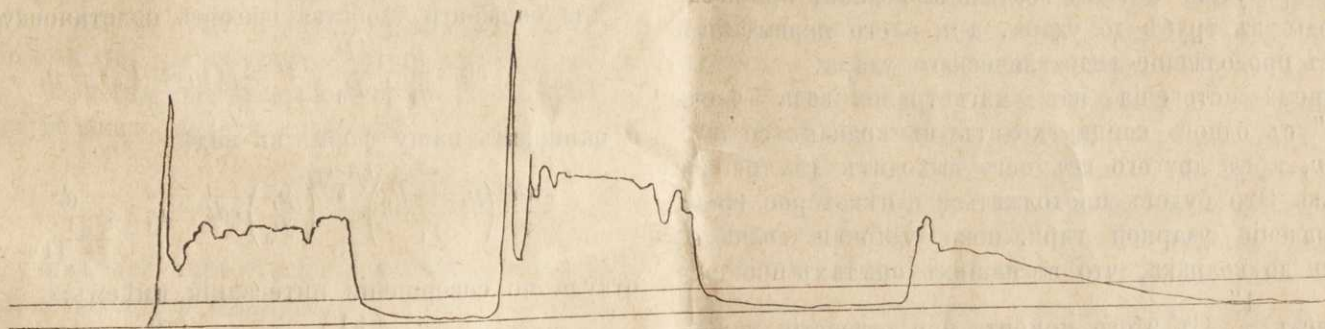
здѣсь  $vh$  есть ударное давленіе при мгновенномъ закрытіи задвижки,  $P$  — наибольшій допустимый приростъ давленія противъ гидродинамическаго и  $\frac{2l}{\lambda}$  — время двойного пробѣга ударною волною длины трубы. Положимъ, на примѣръ, что въ опытѣ 12-мъ съ трубою 2", изложенномъ въ таблицѣ § 11, мы бы желали при той же скорости 4,23 ф. получить ударное давленіе не въ 17,3 атм., а только въ 1 ам., тогда мы должны бы сдѣлать затворъ во время

$$t = \frac{17,3}{1} \cdot 1,14 = 19,72''.$$

Форм. (32) показываетъ, что время затвора, при которомъ ударъ имѣетъ данную величину, возрастаетъ пропорціонально скорости и длинѣ трубы. Если время затвора болѣе времени двойного пробѣга ударною волною длины трубы, то форм. (32) перестаетъ имѣть мѣсто и получается максимальный ударъ.

§ 16. Воздушные колпаки. Мы видѣли при изслѣдованіи удара въ трубѣ 24" эффектъ большого водяного колпака, поставленнаго при основаніи трубы. Эффектъ этотъ аналогиченъ замедленію времени затвора. Подобнымъ же образомъ дѣйствуетъ и воздушный колпакъ. Мы занялись изслѣдованіемъ дѣйствія колпаковъ, поставленныхъ на самой линіи трубъ, по которымъ распространяется ударъ. Воздушные колпаки малыхъ и большихъ размѣровъ помѣщались на нашей петли трубы въ 2" (см. фиг. 7) на разстояніи 152,87 сажени (близко концу петли съ ея лѣвой стороны, считая отъ задвижки), такъ что они приходились между будками № II и № III. Ударъ производился нашимъ обыкновеннымъ способомъ. Диаграммы снимались во всѣхъ трехъ будкахъ, но для нашихъ изслѣдованій были нужны только диаграммы № I и № III.

Для воздушнаго колпака малыхъ размѣровъ (около 60 куб. дюймовъ) диаграммы эти имѣли видъ, изображенный на фиг. (26) и (27), которая соотвѣтствуетъ скорости истеченія 4,4 ф.



Фиг. 26.

нятіе давленія на величину:

$$P = \frac{v}{t} \frac{2l}{\lambda} h,$$

гдѣ  $h$  опредѣляется по § 4. Изъ написанной форм. получаемъ:

$$t = \frac{vh}{P} \frac{2l}{\lambda}. \quad (32).$$

Мы видимъ, что дѣйствіе колпака указанныхъ размѣровъ нисколько не уменьшаетъ высоту перваго выступа диаграммы, снятой передъ колпакомъ, который даетъ давленіе 17,3, довольно согласною съ теоретическимъ  $4 \cdot v = 17,6$ . Что касается высоты втораго выступа, то она, благодаря эффекту колпака, возрастаетъ почти въ 1,3 раза противъ высоты перваго

выступа. Третий и последующие выступы резко ослабляются.

На диаграммѣ, снятой за колпакомъ въ будкѣ № III, мы имѣемъ незначительное ослабление наибольшаго удара до 14,6 атмосферы; при этомъ выступы закругляются и быстро потухаютъ.

Мы видимъ, что воздушный колпакъ указанныхъ размѣровъ, поставленный на линіи трубы, является безо-

водить уменьшеніе скорости втекающей въ колпакъ воды до

$$\frac{P}{h}.$$

Это соображеніе позволяет намъ написать уравненіе:

$$-du = 2 \left( v - \frac{P}{h} \right) \frac{\pi d^2}{4} dt. \quad (33)$$



Фиг. 27.



Фиг. 28.

лезнымъ для ослабленія передачи удара. Совершенно иной эффектъ получается при увеличеніи размѣровъ колпака. На фиг. (28) дана диаграмма въ будкѣ № I при колпакѣ 548 дюймовъ и скорости воды 1,8 ф.

Эта диаграмма очень похожа на обыкновенную ударную диаграмму при отраженіи удара отъ магистрали. Ударное давленіе здѣсь 7,1 атм. довольно согласно съ теоретическимъ  $4v = 7,2$ . Что касается до диаграммы въ будкѣ № III, то она представляетъ прямую, сливающуюся со статическою прямою.

Такимъ образомъ можно сказать, что колпакъ взятыхъ размѣровъ совсѣмъ не пропускаетъ чрезъ себя гидравлическій ударъ разсматриваемой величины.

Укажемъ на нѣкоторыя теоретическія соображенія, позволяющія опредѣлить размѣры воздушныхъ колпаковъ, не пропускающихъ ударную волну.

Пусть  $u_1$  будетъ объемъ воздуха въ колпакѣ при истеченіи воды въ трубѣ до удара, а  $u$  — его переменный объемъ въ продолженіе гидравлическаго удара.

Во время истеченія изъ магистрали вода чрезъ трубу 2" съ одного конца входитъ въ колпакъ со скоростью  $v$ , а съ другого изъ него выходитъ съ тою же скоростью. Это будетъ продолжаться и нѣкоторое время послѣ паденія ударной гири, пока ударная волна не добѣжитъ до колпака, что въ нашихъ опытахъ происходитъ чрезъ  $\frac{1}{4}$ . Съ этого момента при отверстіи трубы,

принесшей фазу  $P = P_0$  и  $v = 0$ , ударное давленіе падаетъ до нуля (мы говоримъ о добавочномъ давленіи къ гидродинамическому), и жидкость начинаетъ истекать въ колпакъ со скоростью  $v$ , такъ что въ колпакъ съ обоихъ концовъ трубы будетъ изліяніе воды со скоростью  $v$ . Давленіе въ колпакѣ отъ уменьшенія объема начинаетъ возрастать, и это возрастаніе по закону передачи волны передается вдоль обоихъ концовъ трубы. При этомъ возрастаніе давленія до величины  $P$  произ-

Такъ какъ вслѣдствіе быстроты удара процессъ измѣненія воздуха въ колпакѣ долженъ быть принятъ адиабатный, то

$$u^k (P + p_1) = u_1^k p_1,$$

гдѣ  $k = 1,4$  есть отношеніе теплоемкости воздуха съ постояннымъ давленіемъ къ его теплоемкости съ постояннымъ объемомъ, а  $p_1$  есть начальное гидродинамическое давленіе въ колпакѣ. Отсюда имѣемъ:

$$du = -\frac{1}{k} \frac{u_1 p_1^{\frac{1}{k}} dP}{(P + p_1)^{\frac{k+1}{k}}},$$

такъ что

$$k \frac{\pi d^2}{2} \frac{dt}{p_1^{\frac{1}{k}} h} = u_1 \frac{dP}{(p_1 + P)^{\frac{k+1}{k}} (P_0 - P)}.$$

Мы замѣнили здѣсь  $hv$  на  $P_0$ .

Для большаго удобства введемъ подстановку:

$$z = \frac{p_1 + P}{p_1 + P_0}, \quad P = z(p_1 + P_0) - p_1 \quad (34)$$

и напишемъ нашу форм. въ видѣ:

$$\frac{k \pi d^2}{2} \left( \frac{p_1 + P_0}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \left( \frac{p_1}{P_0} \right) v dt = u_1 \frac{dz}{z^{\frac{k+1}{k}} (1-z)},$$

откуда по совершеніи интеграціи имѣемъ:

$$\frac{k \pi d^2}{2} \left( \frac{p_1 + P_0}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \left( \frac{p_1}{P_0} \right) v t = u_1 \int_{z_1}^z \frac{dz}{z^{\frac{k+1}{k}} (1-z)},$$

гдѣ

$$z_1 = \frac{p_1}{p_1 + P_0}.$$

Положимъ для сокращенія письма, что

$$\psi(z) = \int_{z_1}^z \frac{dz}{z^{\frac{k+1}{k}} (1-z)} \quad (35)$$

и введемъ вмѣсто  $u_1$  величину объема колпака  $u_0$  при гидростатическомъ давлении  $P_0$ , положивъ

$$u_1 = \frac{p_0 u_0}{p_1};$$

тогда искомый объемъ колпака  $u_0$  выразится формулою:

$$u_0 = \frac{k\pi d^2}{2\psi(z)} \left( \frac{p_1 + P_0}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \frac{p_1^2}{P_0 p_0} vt. \quad (36)$$

Въ этой формулѣ за  $t$  надо принять время, въ которое ударная волна, отразившись отъ задвижки или магистрала, вернется назадъ къ колпаку (т.е., которое меньше).

Въ нашихъ опытахъ это время есть  $\frac{1''}{2}$ . Величина  $z$

въ интегралѣ форм. (35)  $k=1$ , получимъ величину  $\psi_1 > \psi$ , а положивъ  $k=2$ , найдемъ величину  $\psi_2 \wedge \psi$ . Эти функции  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , служащія намъ предѣлами функции  $\psi$ , суть:

$$\psi_1 = \frac{1}{z_1} - \frac{1}{z} + \lg \left( \frac{1}{z_1} - 1 \right) - \lg \left( \frac{1}{z} - 1 \right),$$

$$\psi_2 = 2 \left( \frac{1}{y_1} - \frac{1}{y} \right) + \lg \left[ \frac{\frac{1}{y_1} - 1}{\frac{1}{y_1} + 1} \right] - \lg \left[ \frac{\frac{1}{y} - 1}{\frac{1}{y} + 1} \right], \quad (38)$$

гдѣ  $\lg$  знакъ логарифма Непера, а  $y = \sqrt{z}$

Прилагаемъ здѣсь таблицу шести наблюдений, произведенныхъ надъ воздушными колпаками 9 октября 1897 г.

Наблюдения 9 октября 1897 г. надъ гидравлическими ударами въ трубѣ 2", передаваемыми чрезъ воздушные колпаны.

| Нумеръ опыта. | Скорость $v$ въ фут. | Время $t''$ двойного пробѣга до колп. | $P_0$ по диагр. № I. | $P_0 = 4v$ | Гидрост. давл. $P_0$ | Гидродинам. давл. $p_1$ | $P$ max. въ колп. | $u_0$ въ куб. д. | $u_0$ въ куб. д. по форм. | Отношеніе давл. въ первомъ и второмъ выст. д. № I. | Отношеніе длины выст. и вш. д. № I. |
|---------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------|------------|----------------------|-------------------------|-------------------|------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1,2,3         | 4,4                  | 0,50                                  | 17,3                 | 17,6       | 5,4                  | 2,7                     | 14,6              | 60               | 55—69                     | 1,3                                                | 1,5                                 |
| 4             | 3,7                  | 0,50                                  | 14,8                 | 14,8       | 5,3                  | 2,5                     | 13,4              | 40               | 41—66                     | 1,5                                                | 2,0                                 |
| 5             | 3,9                  | 0,50                                  | 15,7                 | 15,6       | 5,4                  | 3,1                     | 0,7               | 548              | 523                       | 1,1                                                | 0,4                                 |
| 6             | 1,8                  | 0,50                                  | 7,1                  | 7,2        | 5,4                  | 4,6                     | 0,7               | 548              | 532                       | 1,1                                                | 0,4                                 |

опредѣляется по наибольшему удару, который мы позволяемъ пропустить чрезъ колпакъ.

Если рѣчь идетъ о ничтожномъ ударномъ давленіи, которое позволяютъ перепустить чрезъ колпакъ, то въ форм. (35) разность предѣловъ интеграціи  $z - z_1$  будетъ очень мала и можно будетъ положить:

$$\psi(z) = \frac{z - z_1}{z_1^{\frac{k+1}{k}} (1 - z_1)} = \left( \frac{P_0 + p_1}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \frac{P}{P_0}.$$

Мы получимъ для опредѣленія искомаго объема слѣдующую приближенную формулу:

$$u_0 = \frac{k\pi d^2}{2} vt \frac{p_1^2}{p_0 P}. \quad (37)$$

Эта простая формула, собственно говоря, и имѣетъ главный интересъ въ практическомъ отношеніи, такъ какъ колпаны ставятся съ цѣлью получить  $P$  возможно меньшее.

Для пользованія формулою (36) надо бы составить таблицы функции  $\psi$ ; но мы при примѣненіи ея пользовались двумя предѣлами, между которыми заключена функция  $\psi$ . Такъ какъ по форм. (34)  $z < 1$ , то, положивъ

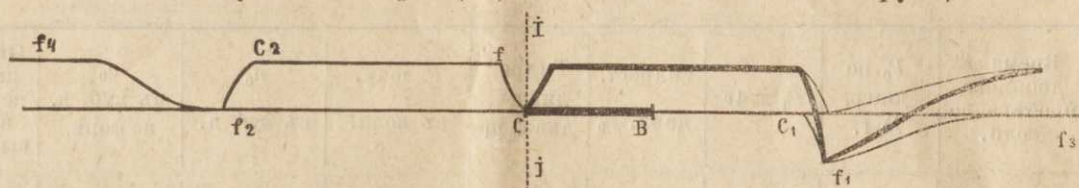
Здѣсь въ первомъ горизонтальномъ ряду таблицы дано среднее трехъ наблюдений, которыя были сдѣланы при одной и той же скорости истеченія 4,4 ф. и при одномъ и томъ же объемѣ колпака 60 куб. д. Числа  $p_1$  шестой колонны опредѣлялись нами по диаграммѣ № II, снимаемой близко отъ воздушнаго колпака (къ сожалѣнію, не снималась диаграмма давленія въ самомъ колпакѣ, какъ это было бы нужно для пользованія нашими форм.). Первые два теоретическіе объема колпака, написанные въ колоннѣ 10, вычислялись по форм. (36) съ двумя предѣльными значеніями  $\psi$  изъ форм. (38), а объемы для опытовъ 5 и 6, въ которыхъ верхній предѣлъ  $z - z_1$  есть небольшая величина, опредѣлялись по форм. (36). Мы видимъ, что теоретическіе объемы довольно близки съ дѣйствительно имѣвшимися, и потому рекомендуемъ для примѣненія къ практикѣ наши форм. (36) и (37).

Колонна (11) даетъ для диаграммы № I отношеніе высоты второго выступа къ высотѣ перваго. Мы видимъ, что это отношеніе болѣе единицы и при малыхъ размахѣхъ колпака и большихъ скоростяхъ доходитъ до 1,5.

Объяснение этому обстоятельству мы находимъ въ сказанномъ въ концѣ § 9 о разрывѣ жидкости. При отстаиваніи колонны жидкости отъ задвижки эта колонна будетъ отброшена назадъ къ задвижкѣ подѣ действиемъ повышеннаго давления въ колпакѣ и произведетъ второй ударъ, болѣе сильный нежели первый.

Достоинство вниманія еще то обстоятельство, что отношенія длины перваго выступа къ длинѣ первой впадины, которыя даны въ 12-й колоннѣ нашей таблицы, для малыхъ размѣровъ колпака значительно больше единицы, тогда какъ для колпаковъ большихъ размѣровъ оно выходитъ, согласно со сказаннымъ въ § 9, менѣе единицы.

Причина уменьшенія длины впадины при малыхъ размѣрахъ колпака можетъ быть разъяснена при разсмотрѣніи правой и лѣвой волны, которыя характеризуютъ явленія удара въ разсматриваемомъ случаѣ. Аналогично фиг. (4) мы будемъ для нашего случая имѣть фиг. (29).



Фиг. 29.

На этой фигурѣ  $cB$  будетъ выраженная во времени пробѣга ударною волною длина трубы отъ задвижки до колпака, т. е.  $cB = \frac{l}{\lambda}$ . Часть правой волны  $cfc_2$  строится по закону затвора задвижки, при чемъ

$$fc_2 = \frac{2l}{\lambda} - \tau.$$

Когда точка  $c$  правой волны подойдетъ къ колпаку, то въ послѣднемъ избытокъ  $P$  давления надъ гидродинамическимъ будетъ сначала 0, а потомъ  $P$  начнетъ возрастать. Мы примемъ, что за время  $\tau$  это возрастаніе не велико и ограничимъ начало лѣвой волны кривою  $c_1f_1$ , симметричною относительно  $B$  кривой  $cf$ . Затѣмъ условіе при колпакѣ будетъ состоять въ томъ, чтобы положительное давление, приносимое въ точку  $B$  правою волною, вмѣстѣ съ отрицательнымъ давленіемъ, приносимымъ въ эту точку лѣвою волною, давали величину  $P$ , опредѣляемую по значенію  $z$  изъ форм. (36). Чтобы выполнить это условіе, надо ограничить лѣвую волну контуромъ  $f_1f_3$ , разстоянія котораго отъ горизонтали чрезъ  $f_1$  дадутъ соотвѣтственныя величины  $\frac{1}{\rho\lambda} P$ . Этотъ контуръ при колпакѣ малыхъ размѣровъ будетъ быстро приближаться къ продолженію прямой  $cB$ . Продолжимъ его на пространство

$$c_1f_3 = \frac{2l}{\lambda} + \tau.$$

Когда точка  $c_1$  лѣвой волны подойдетъ къ задвижкѣ  $c$ , тогда къ этой точкѣ подойдетъ точка  $c_2$  правой волны. Для того, чтобы скорость  $v$  у задвижки была нуль, необходимо, чтобы контуръ  $c_2f_3f_4$  правой волны былъ бы одинаковъ съ контуромъ  $c_1f_1f_3$  лѣвой волны. Разсуждая

подобнымъ образомъ и обращая одновременно съ этимъ вниманіе на законъ измѣненія давления въ колпакѣ, мы можемъ построить дальнѣйшія очертанія лѣвой и правой волны. Но для нашей цѣли достаточно сказаннаго. Повернувъ, какъ это объяснено въ § (5), правую волну около вертикали  $ii$ , проходящей чрезъ задвижку, и, сложивъ совмѣщенные при этомъ величины давленій правой и лѣвой волны, мы получимъ очертаніе ударной диаграммы при будкѣ № I. Это очертаніе представлено на фиг. (29) зачерненной линіею. Мы видимъ, что эффектъ колпака можетъ суживать впадину. Это суженіе при колпакахъ чрезвычайно малыхъ размѣровъ, вслѣдствіе быстрого приближенія линіи  $f_1f_3$  къ  $c_1f_3$ , можетъ обратить всю впадину въ узкую щель, начертанную на диаграммѣ трубы безъ колпака, какъ будетъ показано въ § 18.

Мы изслѣдовали эффектъ воздушныхъ колпаковъ, поставленныхъ на линіи трубы, но выведенныя нами форм.

(36) и (37) могутъ быть примѣнены и къ расчету колпаковъ, поставленныхъ при водовыпускной задвижкѣ, при этомъ намъ пришлось бы только замѣнить въ этихъ двухъ формулахъ  $\frac{k\pi d^2}{2}$  на  $\frac{k\pi d^2}{4}$ . Это пришлось бы сдѣлать потому, что вода вливается въ колпакъ съ одного конца, и въ исходной форм. (33) не надо писать множитель 2. Такимъ образомъ, при тѣхъ же условіяхъ размѣры воздушнаго колпака, поставленнаго при концѣ трубы, выходятъ въ два раза менѣе размѣровъ колпака, поставленнаго на линіи трубы.

Воздушные колпаки надлежащихъ размѣровъ вполне могутъ предохранить слѣдующую за колпакомъ (по направленію распространенія ударной волны) часть трубы отъ гидравлическаго удара, эти надлежащіе размѣры выходятъ довольно большіе. Если бы мы, напримѣръ, въ опытѣ (8) съ трубой въ 6", изложеннымъ въ таблицѣ параграфа (10), желали ударъ 29 атмосферъ свести до одной атмосферы, то нашли бы по форм. (37) для воздушнаго колпака, поставленнаго при задвижкѣ, принимая приближенно ( $p_0 = p_1 = 5,4$ ) объемъ:

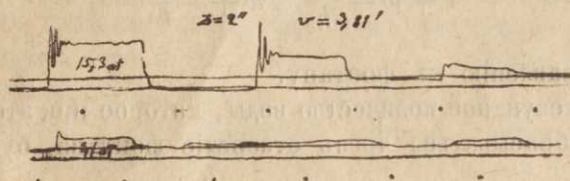
$$u_0 = 9810 \text{ к. д.} = 5,68 \text{ к. ф.}$$

Но главное практическое неудобство при примѣненіи колпаковъ состоитъ въ томъ, что трудно сохранять постоянный объемъ воздуха въ колпакѣ. При вышеописанныхъ наблюденіяхъ 9 октября 1897 года мы замѣтили, что объемы 60 и 40, бывшіе до опытовъ, послѣ опытовъ обратились въ 50 и 37. Эта измѣнчивость объемовъ заставляетъ употреблять механическія приспособленія для пополненія объемовъ воздуха, уносимаго водою во время ударовъ, что затрудняетъ примѣненіе воздушныхъ колпаковъ и дѣлаетъ предпочтительнѣе употребленіе предохранительныхъ клапановъ.

§ 17. *Предохранительные клапаны.* Мы дѣлали опыты съ предохранительными клапанами на той же линіи трубы 2", о которой говорили въ предыдущемъ параграфѣ. Пружинные коническіе клапаны помѣщались почти въ томъ же мѣстѣ, гдѣ раньше помѣщались колпаки на разстояніи 153,84 с. отъ задвижки.

По прошествіи  $\frac{1}{4}$  послѣ паденія гири ударная волна подбѣгала къ предохранительному клапану и, открывъ его, разбрасывала воду коническимъ фонтаномъ, который длился въ продолженіе  $\frac{1}{2}$ ", пока къ клапану отъ задвижки не подходила волна пониженнаго давленія; тогда клапанъ закрывался. Такое закрытіе и открытіе клапана періодически повторялось нѣсколько разъ, вслѣдствіе послѣдовательныхъ отраженій ударной волны отъ задвижки и отъ открытаго клапана, до тѣхъ поръ, пока ударное давленіе настолько ослабѣвало, что клапанъ переставалъ открываться.

Ударныя діаграммы снимались въ будкѣ № I при задвижкѣ и въ будкѣ № III за предохранительнымъ клапаномъ. Подобныя діаграммы для скорости въ трубѣ  $v = 3,81$  ф. представлена на фиг. 30.



Фиг. 30.

Верхняя діаграмма соотвѣтствуетъ будкѣ № I и даетъ въ первомъ выступѣ ударное давленіе 15,3, близкое къ теоретической величинѣ  $4v = 15,2$ , а нижняя діаграмма соотвѣтствуетъ будкѣ № III и даетъ давленіе первого выступа на 3,1 атм. выше гидростатическаго, согласное съ упругостью пружины предохранительнаго клапана. Приводимъ здѣсь результаты 6 наблюденій, сдѣланныхъ надъ предохранительными клапанами 9 октября 1897 г.

Наблюденія 9 октября 1897 года надъ предохранительными клапанами на трубѣ 2".

| Нумеръ опыта. | Скорость $v$ футахъ. | Двойное время пробѣга до клапана. | Давленіе $P$ по діагр. № I. | $P = 4v$ . | Давленіе по діаграммѣ № III надъ гидрост. | Отношеніе высоты первого и второго выступ. въ діагр. № I. |
|---------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1             | 4,39                 | 0,50"                             | 17,3                        | 17,6       | 3,5                                       | 1,4                                                       |
| 2             | 4,39                 | 0,50"                             | 17,3                        | 17,6       | 3,5                                       | 1,5                                                       |
| 3             | 3,79                 | 0,50                              | 15,5                        | 15,2       | 3,1                                       | 1,5                                                       |
| 4             | 3,81                 | 0,50                              | 15,5                        | 15,2       | 3,6                                       | 1,5                                                       |
| 5             | 3,81                 | 0,50                              | 15,3                        | 15,2       | 3,1                                       | 1,5                                                       |
| 6             | 2,58                 | 0,49                              | 10,3                        | 10,3       | 3,5                                       | 1,4                                                       |

Числа четвертой колонны даютъ ударное давленіе передъ предохранительнымъ клапаномъ, вполне согласное съ формулою  $4v$ , что же касается до давленія за предохранительнымъ клапаномъ, то оно выходитъ одинаковымъ на опытахъ 1 и 6 съ различными скоростями и зависитъ только отъ силы пружины клапана. Колонна 7-я, дающая отношеніе высотъ первого и второго выступа діаграммы № I, свидѣтельствуетъ о быстромъ затуханіи ударнаго давленія. Какъ результатъ опытовъ можетъ быть выставлено положеніе, что предохранительный клапанъ перепускаетъ чрезъ себя только такую силу удара, которая равна упругости его пружины. Разумѣется, такой результатъ и слѣдовало ожидать.

§ 18. *Отысканіе мѣстъ на линіи трубы, въ которыхъ произошло скопленіе воздуха.*

На фигурѣ (31) изображена ударная діаграмма, снятая при будкѣ № I съ нашей трубы 2" (см. фиг. 7) при образовавшихся въ нѣкоторыхъ мѣстахъ трубы небольшихъ скопленіяхъ воздуха.

Такой видъ получили діаграммы цѣлой серіи нашихъ опытовъ, произведенныхъ 1 сентября 1897 Эода надъ трубою 2" съ цѣлью оправданія форм. § 4. мти опыты были признаны негодными, такъ какъ діаграммы прорѣзывались тремя щелями, которыя съ удивительнымъ постоянствомъ появлялись на однихъ и тѣхъ же мѣстахъ.

По осмотрѣ линіи трубы было обнаружено, что на разстояніяхъ 193,86 саж., 295,14 саж. и 335,81 саж. отъ задвижки образовались скопленія воздуха. Эти скопленія образовались въ трубкахъ, которыя остались отъ снятыхъ съ трубы манометровъ. Принимая во вниманіе, согласно сказанному въ концѣ § 15, что щели являются вслѣдствіе присутствія малыхъ воздушныхъ колпаковъ, постараемся употребить упомянутую серію діаграммъ для отысканія мѣста въ трубѣ этихъ колпаковъ. Такъ какъ щель на діаграммѣ № I образуется въ тотъ моментъ, когда ударная волна подбѣгаетъ къ воздушному колпаку, то выраженный во времени разстоянія щелей діаграммы отъ ея начала даютъ двойное время пробѣга ударной волны до искомаго воздушнаго колпака. Помѣщаемъ здѣсь таблицу, составленную по 7 діаграммамъ, снятымъ въ будкѣ № I.

Опредѣленіе мѣстъ скопленія воздуха въ трубѣ 2" изъ наблюденій, произведенныхъ 1 сентября 1897 года.

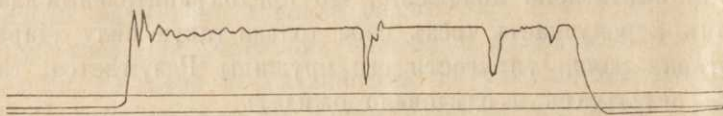
| Нумеръ опыта. | Скорость воды $v$ въ фут. | Разстояніе во времени отъ первой щели. | Разстояніе отъ второй щели. | Разстояніе отъ третьей щели. |
|---------------|---------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 1             | 4,42                      | 0,64                                   | 1,00"                       | 1,15"                        |
| 2             | 4,42                      | 0,65                                   | 1,00                        | 1,13                         |
| 3             | 4,37                      | 0,64                                   | 1,00                        | 1,14                         |
| 4             | 4,34                      | 0,65                                   | 1,00                        | 1,14                         |
| 5             | 3,29                      | 0,64                                   | 1,00                        | 1,14                         |
| 6             | 3,17                      | 0,63                                   | 0,96                        | 1,13                         |
| 7             | 3,18                      | 0,65                                   | 0,99                        | 1,15                         |

Средняя величина двойного времени пробѣга ударной волны до искомымъ колпаковъ будетъ 0,64, 0,99 и 1,14.

Принимая для разсматриваемаго случая  $\lambda = 600$  сажень (это показывало прямое наблюдение скорости въ данномъ случаѣ), найдемъ для искомымъ колпаковъ разстоянія:

192 саж., 297 саж., 342 саж.

которые довольно близко подходятъ къ дѣйствительнымъ мѣстамъ воздушныхъ массъ.



Фиг. 31.

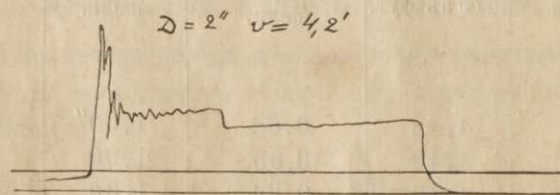
Замѣтимъ здѣсь, что на фиг. (31) первая щель отстоитъ отъ начала діаграммы дальше нежели отъ ея конца. Это обстоятельство не оставляетъ въ насъ сомнѣнія въ томъ, что въ трубѣ имѣется три воздушныхъ колпака. Если бы вторая щель отстояла въ два раза дальше первой отъ начала діаграммы, то она могла бы явиться эффектомъ волны, отброшенной отъ перваго колпака и потомъ отраженной отъ задвижки.

§ 19. *Определение съ помощью ударной діаграммы мѣста утечки въ водопроводной трубѣ.*

Подобно тому какъ ударная діаграмма позволяетъ обнаружить мѣсто скопления въ трубѣ воздуха, можетъ она обнаружить и мѣсто утечки, образовавшейся въ трубѣ, и способъ этого обнаруженія, можетъ быть, получить важное практическое значеніе.

Для разъясненія поставленнаго вопроса были произведены нами наблюденія 25 сентября 1897 года. На линіи петли трубы 2" было сдѣлано нѣсколько отверстій (отмѣченныхъ точками на фиг. 7), которые поочередно открывались и образовывали фонтаны воды. Задвижка трубы съ такимъ фонтаномъ открывалась, количество истекающей изъ-подъ нея воды опредѣлялось и потомъ обыкновеннымъ образомъ производился гидравлическій ударъ. Ударныя діаграммы снимались въ будкахъ №№ I, II и III, хотя для опредѣленія мѣста фонтана достаточно бы было одной діаграммы № I.

На фиг. (32) дана фотографія такой діаграммы при скорости истечения воды 4,2 ф. и при тоненькомъ фонтанѣ, бьющемъ изъ трубы на разстояніи 135,56 сажени отъ задвижки.



Фиг. 32.

Мы видимъ, какимъ яснымъ паденіемъ высоты діаграммы отмѣчается мѣсто фонтана. Опредѣляя время 0,44", протекшее отъ начала поднятія давленія, и умно-

жая его половину на  $\lambda$ , находимъ при  $\lambda = 600$ , разстояніе 132, довольно близкое къ дѣйствительному.

Укажемъ на нѣкоторые теоретическія соображенія, относящіеся къ разсматриваемому вопросу.

Когда ударная волна, образовавшаяся отъ уничтоженія скорости посредствомъ быстрого закрытія водовыпускной задвижки, подойдетъ къ отверстию фонтана, тогда ударное давленіе

$$P = v h$$

понизится до величины  $P'$ . При этомъ разовьются скорости: въ части трубы между фонтаномъ и задвижкой скорость

$$\frac{P - P'}{h}$$

по направленію къ фонтану, а въ части трубы между фонт. и маг. скорость  $\frac{P'}{h}$  по направленію къ магистрالی;

послѣдняя соединится съ имѣющеюся въ трубѣ по направленію къ фонтану скоростью  $v + w$  и дастъ скорость

$$v + w - \frac{P'}{h} = w + \frac{P - P'}{h}$$

по направленію къ фонтану.

Все секундное количество воды, которое при этомъ должно выбрасываться чрезъ отверстіе фонтана, будетъ:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \left( w + 2 \frac{P - P'}{h} \right).$$

Секундное количество воды, изливавшееся изъ фонтана до удара, было:

$$\frac{\pi d^2}{4} w = \mu \frac{\pi d'^2}{4} \sqrt{\frac{2pg}{8}}$$

гдѣ  $d$  и  $d'$  — діаметры трубы и отверстія фонтана, а  $\mu$  — коэффициентъ истеченія изъ фонтана, а  $p$  — давленіе до удара. Фаза съ давленіемъ  $P'$  и скоростью

$$\frac{P - P'}{h}$$

будетъ передаваться къ задвижкѣ и образуетъ при ней отрицательный ударъ съ давл.  $P_1$ , опредѣляемый по формулѣ:

$$P_1 = P' - \frac{P - P'}{h} h = 2P' - P = P - 2(P - P');$$

такъ что

$$2P' = P + P_1$$

и

$$P > P' > P_1.$$

Выше данная величина  $Q$  можетъ быть теперь представлена такимъ образомъ:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \left[ w + \frac{P - P_1}{h} \right].$$

Съ другой стороны

$$Q = \mu \frac{\pi d'^2}{4} \sqrt{\frac{2(P' + p)}{8}} g = \mu \frac{\pi d'^2}{4} \sqrt{\frac{2P - (P - P_1) + 2p}{8}} g.$$

Сравнивая величины  $Q$ , получаемъ урав. для определения  $P - P_1$ :

$$\left[ \frac{P - P_1}{h} \right]^2 + \left( \frac{P - P_1}{h} \right) \left\{ 2\mu \left( \frac{d'}{d} \right)^2 \sqrt{\frac{2pg}{8}} + \mu^2 h \left( \frac{d'}{d} \right)^4 \frac{1}{8} \right\} - 2\mu^2 \left( \frac{d'}{d} \right)^4 \frac{Pg}{8} = 0, \quad (39)$$

гдѣ  $w$  было выражено по  $p$ .

Если отношеніе  $\frac{d'}{d}$  очень мало и  $P$  великъ сравнительно съ  $p$ , то можно вмѣсто ур. (39) пользоваться слѣдующимъ приближеннымъ уравненіемъ:

$$P - P_1 = 93,3\mu \left( \frac{d'}{d} \right)^2 \sqrt{P}, \quad (40)$$

гдѣ  $P$  и  $P_1$  выражены въ атмосферахъ.

Предположивъ, что  $s$  есть разстояніе фонтана отъ задвижки и что цѣлая часть дроби  $\frac{l}{s}$  есть  $n$ , будемъ имѣть  $n$  отраженій ударной волны отъ задвижки, прежде нежели ударная волна, отраженная отъ магистрали, дойдетъ до задвижки (видоизмѣняясь эффектомъ фонтана).

Назовемъ чрезъ:  $P_2, P_3, P_4 \dots$  ударныя давленія при задвижкѣ при второмъ, третьемъ и т. д. отраженіи, а чрезъ:  $P', P''$  назовемъ второе, третье и т. д. ударное давленіе при фонтанѣ. На основаніи разсужденія, съ помощію котораго мы вывели соотношеніе

$$2P' = P + P_1$$

можемъ получить рядъ соотношеній:

$$\begin{aligned} 2P' &= P + P_1, \\ 2P'' &= P_1 + P_2, \\ 2P''' &= P_2 + P_3, \\ 2P'''' &= P_3 + P_4, \end{aligned} \quad (41)$$

изъ которыхъ слѣдуетъ, что

$$\begin{aligned} P_1 &= P - 2(P - P'), \\ P_2 &= P - 2(P' - P''), \\ P_3 &= P_1 - 2(P'' - P'''), \\ P_4 &= P_2 - 2(P''' - P'''). \end{aligned} \quad (42)$$

Укажемъ порядокъ, въ которомъ располагаются величины  $P_1, P_2, \dots, P', P'', P''', \dots$

Когда отраженное отъ задвижки давленіе  $P_1$  дойдетъ до фонтана, при которомъ имѣется большее давленіе  $P'$ , то давленіе при фонтанѣ обратится въ  $P''$ , при чемъ

$$P'' < P'.$$

Изъ части трубы, идущей къ магистрали начнетъ изливаться къ фонтану новое количество воды

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{P' - P''}{h},$$

а отъ фонтана въ трубу, идущую къ задвижкѣ, будетъ уходить количество воды

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{P'' - P_1}{h},$$

между тѣмъ какъ прежде къ нему подходило количество воды

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{P - P'}{h}.$$

Такимъ образомъ секундное количество воды  $Q$ , изливающееся теперь въ фонтанѣ, опредѣлится по  $Q$  соотношеніемъ:

$$Q_1 = Q + \frac{\pi d^2}{4h} [2(P' - P'') + P_1 - P],$$

которое по форм. (42) будетъ:

$$Q_1 = Q + \frac{\pi d^2}{4h} (P_1 - P_2).$$

Такъ какъ вслѣдствіе  $P' < P''$  надо имѣть  $Q_1 < Q$ , то

$$P_2 > P_1.$$

Къ этому неравенству по форм. (42) и (41) присоединяются еще слѣдующія:

$$\begin{aligned} P_2 &< P, \\ P_2 &> P''. \end{aligned}$$

Когда послѣ второго отраженія отъ задвижки давленіе  $P_2$  подойдетъ къ фонтану, то имѣющееся при немъ давленіе  $P''$  замѣнится на  $P'''$ , при чемъ

$$P''' > P''.$$

Въ часть трубы, идущую къ магистрали, будетъ изливаться отъ фонтана новое количество воды

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{(P''' - P'')}{h},$$

а изъ части трубы къ задвижкѣ будетъ изливаться къ фонтану

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{(P_2 - P''')}{h},$$

тогда какъ прежде отъ фонтана уходило

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{P' - P_1}{h}.$$

Секундное количество выбрасываемой фонтаномъ воды увеличится и обратится въ  $Q_2$ , гдѣ

$$Q_2 = Q_1 + \frac{\pi d^2}{4} [2(P'' - P''') + P_2 - P_1]$$

или по форм. (42)

$$Q_2 = Q_1 + \frac{\pi d^2}{4} [P_2 - P_3].$$

Такъ какъ  $Q_2 > Q_1$ , то

$$P_3 < P_2.$$

Сюда присоединяются еще по форм. (42) и (41) неравенства:

$$\begin{aligned} P_3 &> P_1, \\ P_3 &< P'''. \end{aligned}$$

Продолжая разсуждать подобнымъ образомъ, придемъ къ заключенію, что разности

$$\begin{aligned} P - P_1, P_1 - P_2, P_2 - P_3, \dots \\ P' - P'', P'' - P''', P''' - P''''', \dots \end{aligned}$$

представляютъ знакочередующіеся ряды постоянно убывающихъ членовъ.

Секундные объемы, изливаемые въ фонтанъ, въ послѣдовательные промежутки времени на основаніи сказаннаго могутъ быть представлены въ видѣ:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\pi d^2}{4} \left( w + \frac{P-P_1}{h} \right), \\ Q_1 &= \frac{\pi d^2}{4} \left( w + \frac{P-P_2}{h} \right), \\ Q_2 &= \frac{\pi d^2}{4} \left( w + \frac{P-P_3}{h} \right), \\ &\dots \end{aligned} \quad (43)$$

Эти величины показываютъ намъ, что скорость истечения фонтана попеременно увеличивается и уменьшается.

Воспользовавшись форм. (43), мы можемъ составить для опредѣленія  $P-P_i$  урав., аналогичныя (39 и (40). Эти урав. могутъ быть прямо получены изъ урав. (39) и (40) чрезъ замѣну въ нихъ  $P-P_1$  на  $P-P_i$  и величины  $P$  на  $\frac{P+P_{i-1}}{2}$ .

Когда произойдетъ  $n$  отраженій отъ задвижки, тогда ударная волна, отраженная отъ магистрали, подойдетъ раньше къ фонтану, нежели волна, отраженная отъ задвижки. Эта волна принесетъ къ концу трубы у фонтана добавочное давленіе

$$P^{(n)} - P'$$

и добавочную скорость къ магистрали

$$\frac{P'}{h}.$$

У фонтана разовьется давленіе  $P^{(n+1)}$  и къ количеству  $Q_n$  выбрасываемой имъ воды прибавится

$$\begin{aligned} \frac{\pi d^2}{4} \left[ -\frac{P'}{h} + \frac{P^{(n)} - P' - P^{(n+1)}}{h} + \frac{P^{(n)} - P^{(n+1)}}{h} \right] = \\ = \frac{\pi d^2}{4h} [2P^{(n)} - 2P' - 2P^{(n+1)}]. \end{aligned}$$

Такимъ образомъ будемъ имѣть:

$$\begin{aligned} Q_{n+1} &= \frac{\pi d^2}{4} \left[ w + \frac{P - 2P' + 2P^{(n)} - P_n - 2P^{(n+1)}}{h} \right] \\ &= \frac{\pi d^2}{4} \left[ w - \frac{-P_1 + P_{n-1} - 2P^{(n+1)}}{h} \right]. \end{aligned}$$

Эта форм. показываетъ, что  $P^{(n+1)}$  или отрицательно, или удовлетворяетъ неравенству

$$2P^{(n+1)} < P^{(n-1)} - P_1.$$

Измѣненіе давленія при фонтанѣ будетъ передаваться къ задвижкѣ, къ которой подбѣжитъ волна, несущая добавочное давленіе

$$P^{(n+1)} - P^{(n)}$$

и добавочную скорость

$$\frac{P^{(n)} - P^{(n+1)}}{h}.$$

направленную къ фонтану. Эта волна произведетъ отрицательный ударъ при задвижкѣ, при которомъ должно бы развиться давленіе

$$P_{n+1} = 2P^{(n+1)} - 2P^{(n)} + P_n.$$

Это давленіе по вышеприведенному неравенству само должно удовлетворять неравенству:

$$P_{n+1} < P_{n-1} - P_1 - 2P^{(n)} + P_n$$

или по форм. (41)

$$P_{n+1} < -P_1.$$

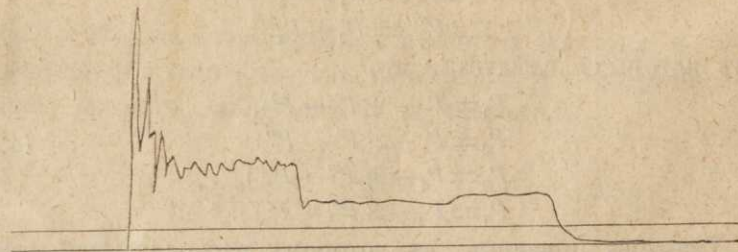
Такимъ образомъ при задвижкѣ разовьется отрицательное ударное давленіе и выступъ діаграммы окончится рѣзкимъ переходомъ во впадину. Длина всего выступа для будки № I будетъ  $\frac{2l}{\lambda}$ . Онъ будетъ состоять изъ  $n+1$

ступеней, изъ которыхъ первыя  $n$  имѣютъ длины  $\frac{2s}{\lambda}$ .

Эти ступени имѣютъ высоты  $P, P_1, \dots$ , разности которыхъ  $P-P_1, P_1-P_2, \dots$  идутъ, постепенно уменьшаясь и попеременно мѣняя знаки.

Если  $n=1$ , т. е. фонтанъ ближе къ магистрали, нежели къ задвижкѣ, то діаграмма будетъ о двухъ ступеняхъ и будетъ имѣть видъ, изображенный на фиг. (32).

На фиг. (33) дано изображеніе діаграммы о трехъ ступеняхъ для случая фонтана, отстоящаго на 136 саженъ отъ задвижки ( $n=2$ ).



Фиг. 33.

Здѣсь двойное время пробѣга ударной волны до фонтана равно  $0,46''$  и даетъ теоретическое разстояніе 138 саженъ.

Діаграммы будокъ № II и № III даютъ, смотря по тому находится ли фонтанъ между будкою и задвижкою или будкою и магистралью, ступени высоты  $P, P', P_1, P'', \dots$  или ступени высоты  $P', P'', P''', \dots$

Мы не опредѣляли  $\frac{d'}{d}$ , такъ какъ измѣненіе отверстія фонтана получалось большимъ или меньшимъ открытіемъ крана, выпускающаго фонтанъ. Все наше вниманіе при наблюденіяхъ было сосредоточено на опредѣленіи мѣста фонтана, по ударной діаграммѣ.

Привожу здѣсь таблицу опытовъ, произведенныхъ 25 сентября 1897 года.

Опыты 25 сентября 1897 года надъ опредѣленіемъ мѣста утечки въ трубѣ 2", имѣющей длину 356,3 сажени.

| Нумеръ опыта. | Нумеръ дыры. | Скорость воды въ футахъ. | Время дв. пробѣга тру- бы. | Время дв. пробѣга отъ задв. до фонт. по діагр. I. | Теор. разст. фонт. отъ задв. | Дѣйств. разст. фонт. отъ за- движки. | Время дв. про- бѣга до фонт. по діагр. II. | Теоретич. разст. | Дѣйств. разст. | Время дв. пробѣга до фонт. по діагр. III. | Теор. разст. | Дѣйств. разст. |
|---------------|--------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------------------------|--------------|----------------|
| 1             | 3            | 3,92                     | 1,18"                      | 0,20"                                             | 60                           | 56,5                                 | —                                          | —                | —              | —                                         | —            | —              |
| 2             | 4(a)         | 3,86                     | 1,16                       | 0,25                                              | 75                           | 76,9                                 | 0,25                                       | 75               | 76,9           | —                                         | —            | —              |
| 3             | 4(a)         | 4,18                     | 1,15                       | 0,26                                              | 78                           | 76,9                                 | 0,25                                       | 75               | 76,9           | —                                         | —            | —              |
| 4             | 6            | 3,61                     | 1,15                       | 0,46                                              | 138                          | 135,6                                | 0,44                                       | 132              | 135,6          | —                                         | —            | —              |
| 5             | 6            | 3,60                     | 1,15                       | 0,44                                              | 132                          | 135,6                                | 0,47                                       | 141              | 135,6          | —                                         | —            | —              |
| 6             | 7(a)         | 3,87                     | 1,13                       | 0,66                                              | 198                          | 193,9                                | разст. отъ будки № II<br>0,25              | 75               | 76,2           | —                                         | —            | —              |
| 7             | 7(a)         | 4,42                     | 1,15                       | 0,66                                              | 198                          | 193,9                                | —                                          | —                | —              | —                                         | —            | —              |
| 8             | 8(a)         | 3,87                     | 1,14                       | 0,86                                              | 258                          | 250,6                                | 0,46                                       | 138              | 133,13         | разст. отъ будки № III                    | —            | —              |
| 9             | 8(a)         | 4,42                     | 1,14                       | 0,82                                              | 246                          | 250,6                                | —                                          | —                | —              | 0,064                                     | 19,2         | 20,2           |
| 10            | 10           | 4,13                     | 1,15                       | 1,02                                              | 306                          | 315,0                                | 0,62                                       | 186              | 197,9          | 0,27                                      | 81           | 80,9           |

Мы пользовались здѣсь для опредѣленія разстояній скоростью ударной волны  $\lambda = 600$  сажень, хотя какъ видно изъ чиселъ, дающихъ время пробѣга двойной длины трубы, т. е. 712,68 сажени, только въ началѣ получалась эта скорость, потомъ же скорость была около 619 с.

При  $\lambda = 619$  слѣдовало бы взять теоретическія разстоянія въ 1,03 раза большія. Я полагаю, что при болѣе тщательномъ измѣреніи времени указываемый нами методъ можетъ дать способъ для опредѣленія мѣста утечки трубы, нахожденіе которой иногда требуетъ раскопки трубы на большомъ разстояніи.

§ 20. Заключение. Резюмируемъ результаты вышеописанныхъ опытовъ.

1) Гидравлическій ударъ распространяется вдоль водопроводной трубы съ постоянною скоростью, величина которой не зависитъ замѣтно отъ силы удара. Эта скорость зависитъ отъ вещества трубы и отъ отношенія толщины ея стѣнокъ къ диаметру трубы. Такъ какъ въ обыкновенныхъ чугунныхъ водопроводныхъ трубахъ упомянутое отношеніе нѣсколько уменьшается съ увеличеніемъ размѣровъ трубы, то скорость распространенія ударной волны для трубъ большихъ диаметровъ нѣсколько меньше, нежели для трубъ среднихъ диаметровъ. Для трубъ среднихъ диаметровъ (отъ 2 до 6 дюймовъ), эта скорость около 600 сажень, а для трубъ большихъ диаметровъ (24 дюйма) около 470 сажень. Скорость ударной волны остается одна и та же получается ли

ударъ вслѣдствіе остановки теченія воды въ трубѣ или вслѣдствіе весьма быстрого поднятія давленія при началѣ трубы.

2) Гидравлическій ударъ распространяется по водопроводной трубѣ съ одинаковою силою. Величина его пропорціональна потерянной при ударѣ скорости теченія воды и скорости распространенія ударной волны въ трубѣ. Для обыкновенныхъ чугунныхъ водопроводныхъ трубъ среднего диаметра (отъ 2 до 6 дюймовъ) на каждый футъ потерянной скорости мы имѣемъ силу удара около 4-хъ атмосферъ, для трубы 24" около 3-хъ атмосферъ.

3) Явленіе періодическаго колебанія ударнаго напора въ водопроводной трубѣ вполне объясняется отраженіями ударной волны отъ концовъ трубы (отъ задвижки и отъ магистрали).

4) Транзитное теченіе воды не имѣетъ вліянія на ударъ и послѣдній опредѣляется только по потеряннѣмъ скоростямъ. Въ случаѣ ударной волны, проходящей по трубѣ, изъ которой изливается вода, ударная волна отражается отъ начала струи, такъ же, какъ она отражается отъ бака съ постояннымъ давленіемъ.

5) Опасное возрастаніе ударнаго давленія происходитъ при переходѣ ударной волны съ трубъ большого диаметра на трубы малаго диаметра. При этомъ, достигнувъ концовъ тупиковъ, сила ударнаго давленія удваивается. Такое удвоеніе можетъ повториться нѣсколько

разъ, такъ что давленіе можетъ при неблагопріятныхъ условіяхъ возрасти до большихъ размѣровъ.

6) Простѣйшимъ способомъ огражденія водопровода отъ гидравлическихъ ударовъ являются приспособленія къ медленному закрытію крановъ. При этомъ продолжительность закрытія должна быть пропорціональна длинамъ трубъ. Воздушные колпаки надлежащихъ размѣровъ, поставленные при кранахъ и задвижкахъ, почти совершенно уничтожаютъ гидравлическій ударъ и не пропускаютъ чрезъ себя ударную волну, если они поставлены на линіи трубы, но сохраненіе воздуха въ колпо-

кахъ весьма затруднительно. Что касается предохранительныхъ клапановъ, поставленныхъ на линіи трубъ, то они пропускаютъ чрезъ себя ударъ только той силы, которая соотвѣтствуетъ упругости ихъ пружины.

7) По ударной діаграммѣ, снятой съ водопроводной трубы, можно опредѣлять мѣсто скопленія воздушныхъ массъ въ трубѣ и величину этихъ массъ. Ударная діаграмма можетъ служить для опредѣленія мѣста утечки воды въ трубѣ и вообще дать полныя свѣдѣнія о состояніи трубы.