

Инженеръ И. Цыганенко

Преподаватель 1-хъ московскихъ строительныхъ курсовъ инженера М. Пріорова  
инженеръ технической конторы «В. Залѣсскій и В. Чаплинъ» въ Москвѣ.

# Кирпичныя комнатныя печи большой теплоемкости

назначенныя для топки дровами, торфомъ, углемъ,  
нефтью и другими видами топлива.

---

## ОТДѢЛЪ I.

Нѣкоторыя вспомогательныя главы изъ технической физики.

Съ чертежами въ текстѣ и техническими  
справочными таблицами.

---

1-е Изданіе Технической Конторы  
Торговаго Дома „В. ЗАЛѢССКІЙ и В. ЧАПЛИНЪ“ въ Москвѣ.  
МОСКВА — 1913.



## ПРЕДИСЛОВІЕ.

Первый отдѣлъ книги посвященъ краткому изложенію нѣкоторыхъ главъ изъ Технической Физики, знаніе которыхъ является необходимымъ при изученіи вопросовъ, связанныхъ съ техникою отопленія и вентиляціи. Для удобства пользованія справочными таблицами весь первый отдѣлъ выпускается въ отдѣльной обложкѣ и съ самостоятельной нумераціей страницъ.

**И. Цыганенко.**

# ОТДѢЛЪ I.

## ГЛАВА I.

### Законы распространенія теплоты.

#### 1. Три способа распространенія теплоты.

Опытъ показываетъ, что существуютъ три существенно различные способа распространенія теплоты отъ тѣла болѣе нагрѣтаго къ тѣлу менѣе нагрѣтому, именно:

1) **Теплопроводность** (или проводимость), подъ которой обыкновенно понимаютъ сравнительно медленную передачу теплоты отъ одной части тѣла къ другой, или отъ одного тѣла къ другому, непосредственно соприкасающемуся съ первымъ. Нѣкоторая часть внутренней теплоты земли именно этимъ способомъ постепенной передачи отъ слоя къ слою достигаетъ поверхности, а солнечная теплота проникаетъ въ толщу земной коры.

2) **Переносъ теплоты или конвенція**, подъ которымъ обыкновенно разумѣютъ передачу тепловой энергіи отъ источника высшей температуры въ данномъ мѣстѣ въ другое мѣсто съ помощью перемѣщенія тѣхъ отдѣльныхъ частицъ матеріи, съ которыми связаны запасы тепловой энергіи. Грандіознымъ примѣромъ переноса тепловой энергіи въ природѣ—можетъ служить извѣстное океаническое теченіе—Гольфштремъ, начинающееся въ Мексиканскомъ заливѣ и доходящее въ видѣ рѣчки въ водяныхъ берегахъ океана до береговъ Скандинавіи и нашего Мурмана. Солнечная теплота подъ тропикомъ въ Мексикаискомъ заливѣ поглощается массою воды потока и частицами этой воды, съ которою теплота какъ бы связана, переносится черезъ весь Атлантической океанъ до береговъ Европы.

То же самое явленіе происходитъ при нагрѣваніи помещенія теплотою, выдѣляемою обращенною въ комнату печною поверхностью: частицы воздуха непосредственно соприкасающіяся съ нагрѣтою поверхностью печи сами нагрѣваются; по мѣрѣ нагрѣванія онѣ становятся легче и подъ напоромъ притекающихъ снизу болѣе тяжелыхъ холодныхъ частицъ поднимаются вверхъ, скользятъ вдоль потолка, доходятъ до стѣнъ и оконъ и отдаютъ (переносятъ на нихъ) часть унесенной теплоты, постепенно охлаждаются и падаютъ вдоль поверхностей стѣнъ и оконъ къ полу; снова притекаютъ къ нагрѣтой по-

верхности печи и процессъ переноса теплоты устанавливается непрерывно.

3) **Лучеиспускание** или такой случай передачи теплоты отъ одного тѣла къ другому, находящемуся отъ него на нѣкоторомъ разстояніи, при которомъ среда, заполняющая пространство между тѣлами, не воспринимаетъ теплоту, а только переноситъ ее отъ тѣла высшей температуры на тѣло низшей температуры, хотя самый переносъ теплоты совершается при посредствѣ различныхъ процессовъ, совершающихся въ этой промежуточной средѣ.

Изученіе способовъ распространенія теплоты и законовъ ими управляющихъ начнемъ со случая теплопроводности.

## II. Теплопроводность.

### 1) Основаніе теоріи Фурье.

По ученію современной намъ кинетической теоріи газовъ теплота опредѣляется, какъ хаотическое (нестройное, неупорядоченное) движеніе молекулъ тѣла <sup>1)</sup>).

Этой хаотичностью объясняются и всѣ трудности построенія законовъ теплопроводности. Если бы движеніе молекулъ, являющееся источникомъ тепловой энергіи въ тѣлахъ, было подчинено извѣстной закономерности, иначе говоря, если бы мы знали то движеніе, которое имѣютъ молекулы при нагрѣваніи тѣлъ, то, вѣроятно, съ помощью математическаго анализа оказалось бы возможнымъ установить законы теплоты, какъ это уже сдѣлано для свѣта и звука; до настоящаго времени наука еще не въ силахъ разрѣшить эту задачу въ общемъ случаѣ; законы распространенія теплоты путемъ теплопроводности установлены пока только для совершеннаго газа (не существующаго въ природѣ).

Въ 1822 году Фурье поставилъ себѣ задачею построить математическую теорію распространенія теплоты въ тѣлахъ, не прибѣгая ни къ какимъ гипотезамъ относительно природы теплоты.

Фурье сдѣлалъ только слѣдующее допущеніе: частицы нагрѣваемаго тѣла поглощаютъ тепловые лучи отъ источника нагрѣванія и затѣмъ сами начинаютъ испускать теплоту на смежныя съ ними частицы тѣла, вслѣдствіе чего температура вокругъ этихъ частицъ должна съ теченіемъ времени измѣняться. Задача, такимъ образомъ, сводится къ опредѣленію хода распространенія температуръ, зависящихъ отъ частичнаго лучеиспусканія.

Не всѣ, но большинство результатовъ, къ которымъ пришелъ Фурье, подтвердились позже экспериментальнымъ путемъ, что въ свою очередь доказываетъ а posteriori правильность теоріи Фурье.

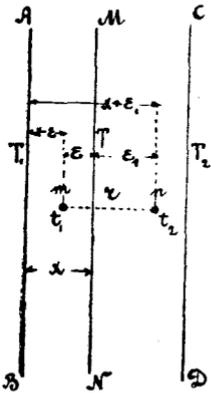
Теорія эта покоится на слѣдующихъ положеніяхъ или гипотезахъ:

<sup>1)</sup> А. Бачинскій. Введеніе въ кинетическую теорію газовъ. Лекціи въ Московскомъ университетѣ. 1907.



и  $\overline{CD}$ , находящимися другъ отъ друга на нѣкоторомъ конечномъ разстояніи.

Чер. №2



Положимъ, что во всѣхъ точкахъ плоскости  $\overline{AB}$  сохраняется постоянная температура  $T_1$ , а въ плоскости  $\overline{CD}$ , другая, меньшая, но тоже постоянная температура  $T_2$ .

Если вообразить себѣ между плоскостями  $\overline{AB}$  и  $\overline{CD}$  нѣкоторую параллельную имъ плоскость  $\overline{MN}$ , отстоящую отъ плоскости  $\overline{AB}$  на разстояніи  $x$ , то во всѣхъ точкахъ этой промежуточной плоскости, какъ находящихся въ совершенно одинаковыхъ условіяхъ, должна сохраняться неизмѣнно нѣкоторая постоянная температура  $T$  отличная отъ температуръ  $T_1$  и  $T_2$  въ плоскостяхъ  $\overline{AB}$  и  $\overline{CD}$ .

Очевидно, что для даннаго момента времени температура  $T$  есть функція разстоянія плоскости  $\overline{MN}$  отъ плоскости  $\overline{AB}$ , т.е. что:

$$T = \varphi(x) \dots \dots \dots (1)$$

Нѣкоторая частица  $m$ , лежащая слѣва отъ плоскости  $\overline{MN}$  посылаетъ частицѣ  $n$ , лежащей справа отъ  $\overline{MN}$ , количество теплоты:

$$q_1 = (t_1 - t_2) f(r) \dots \dots \dots (2)$$

гдѣ:  $t_1$  и  $t_2$  суть температуры въ точкахъ  $m$  и  $n$ , а  $r$  — разстояніе между этими двумя точками.

Аналогично этому и всѣ прочія частицы, лежащія слѣва отъ плоскости  $\overline{MN}$ , будутъ посылать теплоту, точкамъ лежащимъ справа отъ этой плоскости и если разстоянія между первыми частицами (лѣвыми) и вторыми (правыми) будутъ меньше предѣльныхъ, то полное количество теплоты  $N$ , которое можетъ въ единицу времени пройти черезъ единицу плоскости  $\overline{MN}$  выразится зависимостью:

$$N = \Sigma (t_1 - t_2) f(r) \dots \dots \dots (3)$$

Обозначимъ черезъ  $\varepsilon$  разстояніе точки  $m$  отъ плоскости  $\overline{MN}$ , а черезъ  $\varepsilon_1$  разстояніе до этой же плоскости точки  $n$ , тогда разстояніе точекъ  $m$  и  $n$  до плоскости  $\overline{AB}$  будутъ соответственно равны:

$$x - \varepsilon \text{ и } x + \varepsilon_1$$

Такъ какъ температуры точекъ въ толщѣ стѣны вообще суть функція разстояній ихъ до плоскости  $\overline{AB}$ , то для температуръ  $t_1$  и  $t_2$  въ точкахъ  $m$  и  $n$  можемъ написать выраженія:

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= \varphi(x - \varepsilon) \\ t_2 &= \varphi(x + \varepsilon_1) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

разложивъ въ рядъ функціи (4), имѣемъ:

$$t_1 = \varphi(x) - \varepsilon \frac{d\varphi(x)}{dx} + \dots \dots \dots (5)$$

$$t_2 = \varphi(x) + \varepsilon_1 \frac{d\varphi(x)}{dx} + \dots \dots \dots (6)$$

Такъ какъ величины  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_1$  по 1-му положенію Фурье очень малы, то при разложеніи функціи  $\varphi$  въ рядъ Тейлора свободно можемъ ограничиться только двумя первыми членами разложенія, что и представленно формулами (5) и (6); вычитая выраженіе (6) изъ выраженія (5) имѣемъ:

$$t_1 - t_2 = -(\varepsilon + \varepsilon_1) \frac{d\varphi(x)}{dx} \dots \dots \dots (7)$$

Подставляемъ значеніе  $t_1 - t_2$  въ уравненіе (3) и находимъ:

$$N = -\Sigma(\varepsilon + \varepsilon_1) f(r) \frac{d\varphi(x)}{dx} \dots \dots \dots (8)$$

выраженіе:

$$\Sigma(\varepsilon + \varepsilon_1) f(r)$$

для заданной стѣны есть величина постоянная. Обозначаемъ его черезъ  $\lambda$  и переписываемъ выраженіе (8) въ видѣ:

$$N = -\lambda \frac{d\varphi(x)}{dx} \dots \dots \dots (9)$$

Но, по равенству (1):

$$\varphi(x) = T,$$

поэтому:

$$N = -\lambda \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (10)$$

Послѣ нѣкотораго промежутка времени разсматриваемая нами стѣна  $\overline{AB-CD}$  должна притти къ состоянію тепловаго равновѣсія, называемому періодомъ инерціи или «установившагося» дѣйствія. Съ этого момента времени количество теплоты, проходящей въ единицу времени черезъ любую промежуточную плоскость  $\overline{MN}$  стѣны уже не должно зависѣть отъ разстоянія  $x$  этой плоскости до плоскости  $\overline{AB}$ . Дѣйствительно, если бы этого не было, то раздѣляя стѣну на рядъ слоевъ параллельными плоскостями мы убѣдились бы, что одинъ какой-нибудь слой получаетъ отъ предыдущаго теплоты больше, чѣмъ передаетъ слѣдующему и долженъ нагрѣваться, или же получая меньше, чѣмъ отдаетъ самъ, наоборотъ, долженъ бы былъ охлаждаться.

Оба эти допущенія должны быть отвергнуты, какъ противорѣчающія положенію, по которому количества входящей въ стѣну и выходящей изъ стѣны теплоты другъ другу равны.

Слѣдовательно, N должно быть постояннымъ, а это влечетъ за собою выраженія:

$$N = \text{Const} = -\lambda \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (11)$$

Величина  $\lambda$  сама по себѣ постоянна для каждаго случая, слѣдовательно, необходимо, чтобы:

$$\frac{dT}{dx} = C \dots \dots \dots (12)$$

гдѣ C постоянная величина.

$$dT = C \cdot dx \dots \dots \dots (13)$$

Взявъ неопредѣленный интегралъ дифференціального выраженія (13) имѣемъ:

$$\int dT = \int C \cdot dx$$

откуда:

$$T = Cx + D \dots \dots \dots (14)$$

гдѣ D—постоянная интегрированія.

Постоянные C и D находятся изъ предѣльныхъ условій:

$$\text{при } x = 0; T = T_1;$$

откуда по ур—нію 14-му:

$$D = T_1$$

Точно также;

$$\text{при } x = e; T = T_2;$$

что доставляетъ:

$$T_2 = C \cdot e + D$$

откуда:

$$C = \frac{T_2 - D}{e} = \frac{T_2 - T_1}{e} = - \frac{T_1 - T_2}{e}$$

Теперь ур—ніе (14) переписется въ видѣ:

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{e} x \dots \dots \dots (15)$$

ур—ніе (15) показываетъ, что температуры внутри стѣны убываютъ въ ариѳметической прогрессіи, разность которой равна:

$$\frac{T_1 - T_2}{e};$$

въ то время какъ разстояніи до АВ сѣченій, для которыхъ опредѣляются температуры возрастаютъ въ ариѳметической прогрессіи, разность которой равна единицѣ.

Взявъ въ ур—ніи (15) первую производную отъ T по x, найдемъ:

$$\frac{dT}{dx} = - \frac{T_1 - T_2}{e} \dots \dots \dots (16)$$

Подставляя же значеніе  $\frac{d\Gamma}{dx}$  въ ур—ніе (11) имѣемъ:

$$N = \lambda \frac{T_1 - T_2}{e}$$

или:

$$N = \frac{\lambda}{e} (T_1 - T_2) \dots \dots \dots (17)$$

ур—ніе (17) представляетъ выраженіе для количества теплоты проходящаго въ единицу времени черезъ единицу площади любого сѣченія  $\overline{MN}$ .

Положивъ, далѣе,  $T_1 - T_2 = 1^\circ$  с, а  $e = 1$ -цѣ длины (толщины) найдемъ:

$$\lambda = N \dots \dots \dots (18)$$

величина  $\lambda$  называется коэффициентомъ внутренней теплопроводности, при чемъ подъ этимъ терминомъ понимаютъ количество вступающей въ стѣну или выходящей изъ нея теплоты въ единицу времени черезъ поверхность равную квадратной единицѣ при разности температуръ обѣихъ крайнихъ поверхностей въ  $1^\circ$  с и при толщинѣ стѣны равной единицѣ длины.

Въ техникѣ отопленія и вентиляціи за единицу времени принимается часть, за единицу длины (толщины) 1 mtr, — поверхности—1 mtr.<sup>2</sup>

При этихъ единицахъ коэффициентъ внутренней теплопроводности  $\lambda$  опредѣляется какъ количество теплоты въ большихъ  $\left(\frac{\text{klgr.}}{\text{cel.}}\right)$  калоріяхъ, вступающее въ стѣну или выходящее изъ нея въ теченіе часа черезъ поверхность въ 1 mt<sup>2</sup> при толщинѣ стѣны  $e$  въ 1 mt и при разности температуръ наружныхъ поверхностей въ  $1^\circ$  с.

Въ уравненіе (17)  $N = \frac{\lambda}{e} (T_1 - T_2)$

Отношеніе  $\frac{\lambda}{e}$  коэффициента внутренней теплопроводности даннаго вещества къ толщинѣ проводящаго слоя обозначимъ черезъ  $\xi$ .

$$\xi = \frac{\lambda}{e}$$

и будемъ называть его внутренней проводимостью.

Для слоевъ изъ одного и того же вещества при  $\lambda = \text{Const}$ , но разной толщины, должны быть справедливы равенства:

$$\xi_1 = \frac{\lambda}{e_1}; \quad \xi_2 = \frac{\lambda}{e_2}; \quad \xi_3 = \frac{\lambda}{e_3} \dots \dots \xi_n = \frac{\lambda}{e_n},$$
 показывающіе

что внутренняя проводимость  $\xi$  обратно пропорціональна толщинѣ слоя  $e$ .

При одной и той же толщинѣ слоевъ  $e$  и одинаковомъ  $\lambda$ , какъ слѣдуетъ изъ выраженія (17), количество проведенной теплоты пропорціонально температурной разности, т.-е.:

$$Q = \xi [T_1 - T_2] \dots \dots \dots (20)$$

Таблица № 1.

Коэффициентов  $\lambda$  внутренней теплопроводности некоторых телъ.

Названіе вещества.	Значенія коэффициентов $\lambda$ .		Исследователи.
	По даннымъ Пекле.	По даннымъ другихъ исследователей.	
<b>I. Металлы:</b>			
Жельзо . . . . .	28,00	60,00	Lorenz (и другія.)
Мѣдь . . . . .	69,00	360,00(300)	Mitchel (Ритшель).
Латунь . . . . .	90,00	—	Ритшель.
Олово . . . . .	53,00	—	
Свинецъ . . . . .	30,00	—	
Цинкъ . . . . .	110,00	—	
<b>II. Древесные матеріалы:</b>			
Сосна (поперекъ волоконъ) . . . . .	0,093	0,087	Георгиевскій.
„ (вдоль волоконъ) . . . . .	0,170	—	
Дубъ (поперекъ волоконъ) . . . . .	0,211	0,125	Георгиевскій.
Ель (вдоль волоконъ) . . . . .	—	0,170	Георгиевскій.
„ (поперекъ волоконъ) . . . . .	—	0,093	Георгиевскій.
Опилки сосновые . . . . .	—	0,087	Lamb и Wilson.
Древесная зола . . . . .	—	0,060	Георгиевскій.
Древесный уголь (въ порошокъ) . . . . .	—	0,080	Ритшель.
Пробковое дерево . . . . .	0,143	0,047	Lees.
<b>III. Камни (естественные).</b>			
Известнякъ (мелкозернистый) . . . . .	1,70—2,08	3,22	Stadler.
Мраморъ бѣлый . . . . .	2,780	2,40	Christianser.
„ сѣрый . . . . .	3,480	—	
Известнякъ раковистый строительный . . . . .	—	0,800	Чаплинъ.
Песчаникъ . . . . .	1,320	2,57—2,90	(пл. 2,57) 2,90 Stadler.
Шиферъ . . . . .	—	0,290	Ритшель.
<b>IV. Камни (искусственные).</b>			
Бетонъ . . . . .	—	0,800	Ритшель, Чаплинъ.
Гипсъ (искусственный) . . . . .	—	0,320	Weber.
Глина (обожж.) (плотн. 1,98—1,85) . . . . .	0,69—0,51	—	
Красный кирпичъ различныхъ сортовъ . . . . .	—	0,34—0,36	Георгиевскій.
Цементный растворъ очень тощій (съ большимъ содержаніемъ песка) . . . . .	—	0,36	Георгиевскій.
Цементный растворъ (съ различнымъ содержаніемъ песка) . . . . .	—	до 0,680	Георгиевскій.
Кирпичная кладка . . . . .	—	0,690	Ритшель.
Алебастровыя плиты для перегородокъ . . . . .	—	0,600	Чаплинъ.
Древесный цементъ . . . . .	—	0,040	Чаплинъ.
<b>V. Земли.</b>			
Песокъ . . . . .	0,270	0,760	Георгиевскій.
Земляная засыпка . . . . .	—	0,150	Чаплинъ.
Мѣлъ въ порошокъ . . . . .	—	0,090	Ритшель.
<b>VI. Разные матеріалы.</b>			
Асбестъ . . . . .	—	0,107	Lamb и Wilson.
Бумага . . . . .	0,034	0,110	Lees.
Воздухъ . . . . .	0,040	0,020	Lees.
Пухъ . . . . .	0,039	—	
Стекло . . . . .	0,75—0,88	0,50—0,90	Hecht.
Шерсть . . . . .	—	0,038	Георгиевскій.
Войлокъ . . . . .	—	0,032	Георгиевскій.
Коксъ плотный-измельченный . . . . .	—	5,000—0,160	Ритшель.
Штукатурка . . . . .	—	0,60	Чаплинъ.
Толь кровельный . . . . .	—	0,12	Ритшель.
Хлопокъ . . . . .	—	0,04	Ритшель.
Пробковыя плиты для изоляци . . . . .	—	0,037	Чаплинъ.

# Таблица № 2.

Величина  $k_1$ .

$h$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
1"	0,3588	0,7593	0,7117	0,6936	0,6753	0,6580	0,6477	0,6394	0,6326	0,6268	0,6218	0,6176	0,6136	0,6101	0,6071	0,6043	0,6017	0,5995	0,5973	0,5953	0,5935	0,5918	0,5902	0,5817	0,5874	0,5860	0,5848	0,5836	0,5825	0,5814	0,5804	0,5794	0,5785	0,5776	0,5768
2"	0,8010	0,7083	0,6648	0,6470	0,6298	0,6137	0,6042	0,5964	0,5900	0,5846	0,5800	0,5760	0,5723	0,5691	0,5663	0,5637	0,5613	0,559	0,5571	0,555	0,5536	0,5520	0,5505	0,501	0,5479	0,5466	0,5454	0,5444	0,5433	0,5423	0,5414	0,5406	0,5396	0,5388	0,5380
3"	0,7754	0,6856	0,6435	0,6263	0,6097	0,5941	0,5848	0,5773	0,5712	0,5659	0,5614	0,5576	0,5540	0,5509	0,5481	0,5456	0,5433	0,5413	0,5393	0,5375	0,539	0,5344	0,5329	0,5316	0,5304	0,5291	0,5280	0,5269	0,5259	0,5250	0,5241	0,5232	0,5224	0,5215	0,5208
4"	0,7601	0,6721	0,6308	0,6139	0,5976	0,5823	0,5733	0,5659	0,5599	0,5547	0,5503	0,5466	0,5431	0,5400	0,5373	0,5349	0,5326	0,5306	0,5287	0,5269	0,5253	0,5238	0,5225	0,5111	0,5199	0,5687	0,5176	0,5165	0,5155	0,5146	0,5137	0,5128	0,5120	0,5113	0,5105
5"	0,7495	0,6677	0,6220	0,6054	0,5894	0,5743	0,5654	0,5581	0,5521	0,5471	0,5427	0,5390	0,5356	0,5326	0,5299	0,5275	0,5252	0,5233	0,5213	0,5196	0,5180	0,5166	0,5152	0,59	0,5127	0,5115	0,5104	0,5094	0,5084	0,5075	0,5066	0,5057	0,5050	0,5042	0,5034
6"	0,7419	0,6560	0,6157	0,5992	0,5834	0,5684	0,5596	0,5524	0,5465	0,5415	0,5372	0,5335	0,5301	0,5271	0,5245	0,5221	0,5199	0,5180	0,5160	0,5143	0,5128	0,5115	0,5099	0,586	0,5075	0,5063	0,5052	0,5042	0,5032	0,5023	0,5014	0,5006	0,5008	0,4990	0,4983
7"	0,7341	0,6491	0,6092	0,5929	0,5772	0,5624	0,5537	0,5476	0,5417	0,5367	0,5315	0,5279	0,5245	0,5215	0,5189	0,5166	0,5144	0,5125	0,5106	0,5089	0,5073	0,5059	0,5045	0,5032	0,5021	0,5009	0,4999	0,4989	0,4979	0,4970	0,4961	0,4953	0,4945	0,4938	0,4931
8"	0,7312	0,6465	0,6069	0,5906	0,5749	0,5602	0,5515	0,5444	0,5386	0,5337	0,5294	0,5258	0,5225	0,5195	0,5169	0,5145	0,5121	0,5105	0,5086	0,5069	0,5054	0,5039	0,5025	0,013	0,5002	0,4988	0,4979	0,4969	0,4960	0,4950	0,4942	0,4934	0,4926	0,4918	0,4911
9"	0,7272	0,6440	0,6035	0,5873	0,5718	0,5571	0,5485	0,5416	0,5357	0,5307	0,5265	0,5229	0,5196	0,5167	0,5141	0,5117	0,5095	0,5077	0,5058	0,5041	0,5026	0,5011	0,4988	0,4888	0,4974	0,4962	0,4952	0,4942	0,4932	0,4923	0,4915	0,4906	0,4909	0,4891	0,4884
10"	0,7237	0,6400	0,6007	0,5846	0,5691	0,5545	0,5459	0,5389	0,5321	0,5282	0,5240	0,5205	0,5171	0,5142	0,5116	0,5093	0,5071	0,5053	0,5034	0,5017	0,5002	0,4988	0,4974	0,4967	0,4951	0,4939	0,4928	0,4917	0,4909	0,4900	0,4893	0,4883	0,4876	0,4868	0,4861
11"	0,7209	0,6374	0,5982	0,5822	0,5668	0,5523	0,5437	0,5367	0,5310	0,5261	0,5220	0,5184	0,5151	0,5122	0,5096	0,5073	0,5051	0,5033	0,5014	0,4997	0,4983	0,4968	0,4954	0,4142	0,4931	0,4919	0,4909	0,4898	0,4880	0,4870	0,4872	0,4864	0,4856	0,4849	0,4842
12"=1'	0,7184	0,6352	0,5962	0,5802	0,5649	0,5504	0,5418	0,5349	0,5292	0,5243	0,5201	0,5166	0,5133	0,5104	0,5087	0,5055	0,5034	0,5015	0,4997	0,4980	0,4965	0,4951	0,4937	0,4925	0,4914	0,4901	0,4982	0,4881	0,4863	0,4854	0,4853	0,4846	0,4840	0,4832	0,4818
1,5'	0,7079	0,6259	0,5889	0,5717	0,5566	0,5423	0,5339	0,5271	0,5214	0,5166	0,5125	0,5091	0,5058	0,5029	0,5004	0,4983	0,4960	0,4942	0,4923	0,4907	0,4892	0,4878	0,4865	0,4858	0,4842	0,4830	0,4820	0,4810	0,4801	0,4792	0,4784	0,4776	0,4769	0,4761	0,4756
2	0,7004	0,6193	0,5813	0,5657	0,5507	0,5366	0,5283	0,5215	0,5159	0,5112	0,5071	0,5037	0,5004	0,4976	0,4951	0,4928	0,4918	0,4890	0,4872	0,4855	0,4841	0,4827	0,4814	0,4802	0,4791	0,4780	0,4769	0,4760	0,4751	0,4742	0,4734	0,4726	0,4718	0,4711	0,4705
2,5	0,6973	0,6166	0,5788	0,5632	0,5483	0,5343	0,5260	0,5192	0,5137	0,5089	0,5049	0,5015	0,4983	0,4955	0,4930	0,4907	0,4886	0,4869	0,4850	0,4834	0,4820	0,4806	0,4793	0,4781	0,4770	0,4759	0,4749	0,4739	0,4730	0,4721	0,4713	0,4705	0,4698	0,4691	0,4684
3	0,6943	0,6139	0,5762	0,5608	0,5459	0,5319	0,5237	0,5179	0,5114	0,5067	0,5027	0,4993	0,4961	0,4933	0,4908	0,4886	0,4865	0,4847	0,4829	0,4813	0,4798	0,4785	0,4772	0,4760	0,4749	0,4738	0,4728	0,4718	0,4709	0,4700	0,4693	0,4685	0,4677	0,4670	0,4663
3,5	0,6918	0,6717	0,5742	0,5588	0,5439	0,5300	0,5218	0,5151	0,5096	0,5049	0,5009	0,4975	0,4943	0,4914	0,4891	0,4868	0,4848	0,4830	0,4812	0,4796	0,4781	0,4768	0,4755	0,4743	0,4732	0,4721	0,4711	0,4701	0,4692	0,4684	0,4676	0,4668	0,4661	0,4653	0,4647
4	0,6899	0,6100	0,5727	0,5572	0,5425	0,5286	0,5204	0,5137	0,5082	0,5035	0,4995	0,4961	0,4929	0,4902	0,4877	0,4855	0,4834	0,4816	0,4793	0,4783	0,4768	0,4754	0,4741	0,4729	0,4719	0,4708	0,4697	0,4688	0,4679	0,4671	0,4663	0,4655	0,4648	0,4640	0,4634
4,5	0,6882	0,6085	0,5701	0,5558	0,5411	0,5273	0,5191	0,5124	0,5069	0,5022	0,4983	0,4949	0,4917	0,4889	0,4865	0,4843	0,5822	0,4804	0,4786	0,4771	0,4756	0,4743	0,4730	0,4718	0,4707	0,4696	0,4686	0,4677	0,4668	0,4659	0,4651	0,4643	0,4636	0,4629	0,4622
5	0,6868	0,6073	0,5690	0,5547	0,5401	0,5262	0,5180	0,5115	0,5059	0,5013	0,4973	0,4939	0,4907	0,4880	0,4855	0,4833	0,4813	0,4795	0,4777	0,4761	0,4747	0,4733	0,472	0,5703	0,4698	0,4687	0,4677	0,4667	0,4659	0,4650	0,4642	0,4634	0,4627	0,4620	0,4613

### III. Передача теплоты соприкосновениемъ (конвекція).

Явленіе перенесенія теплоты съ одного твердаго тѣла на другое при помощи частицъ подвижной среды, заполняющей пространство между тѣлами основано на измѣненіи плотности вещества среды и на нарушеніи условій равновѣсія, существовавшихъ до нагрѣванія.

Явленія переноса теплоты отъ однихъ частицъ жидкой массы къ другимъ, а также и въ газовой средѣ легко поддаются опытному наблюденію. Однакоже, въ силу чрезвычайной сложности процессовъ теоретическое изученіе явленій конвекціи до сихъ поръ еще находится въ зародышѣ и современная наука обладаетъ лишь крайне несовершенными законами, которымъ подчинены эти явленія, столь важныя въ вопросахъ отопленія и вентиляціи.

#### 1) Формула Ньютона.

Ньютому принадлежитъ первая попытка дать математическое выраженіе для закона передачи теплоты отъ тѣла въ окружающую среду путемъ *соприкосновенія* частицъ среды съ поверхностью охлаждающагося тѣла.

На основаніи опытнаго изученія явленій Ньютонъ допустилъ, что потеря теплоты прикосновениемъ, въ томъ случаѣ, когда средою является воздухъ, зависитъ:

а) Отъ *абсолютнаго значенія разности температуръ* поверхности тѣла и среды:

$$T - t = \tau;$$

б) Отъ *величины, формы и положенія тѣла, поверхность котораю отдаетъ теплоту*; потеря теплоты въ этомъ случаѣ не зависитъ:

в) Отъ рода и состоянія поверхности, т. е. не зависитъ отъ свойствъ вещества тѣла, поверхность котораго отдаетъ теплоту соприкосновениемъ съ окружающимъ воздухомъ.

д) Отъ температуры  $t$  среды—воздуха. По Ньютону для тѣлъ, поставленныхъ въ одинаковыя условія охлажденія: отношеніе количества теплоты, отдаваемыхъ въ единицу времени путемъ конвекціи:

$$N_1 \ N_1' \ N_1'' \ . \ . \ . \ N_1^{(n)}$$

къ температурнымъ разностямъ

$$T - t = \tau; \quad T_1 - t_1 = \tau_1 \ . \ . \ . \ . \quad T_n - t_n = \tau_n$$

суть величины постоянныя, т. е.:

$$\frac{N_1}{\tau} = \frac{N_1'}{\tau_1} = \frac{N_1''}{\tau_2} = \ . \ . \ . \ = \frac{N_1^{(n)}}{\tau_n} = k_1 \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ (1)$$

Отсюда вытекает известная формула Ньютона:

$$N_1 = k_1 (T - t) = k_1 \tau \dots \dots \dots (2)$$

по которой количество теплоты, теряемое в единицу времени единицей поверхности тела путем конвекции пропорционально разности температур поверхности тела  $T$  и среды  $t$ .

Коэффициент пропорциональности  $k_1$  при  $T - t =$  единиц равен  $N_1$ ; следовательно, представляет количество теплоты, теряемое в единицу времени единицей поверхности тела при разности температур в  $1^\circ \text{C}$ .

Для поверхностей одинаковой формы и положения коэффициент  $k_1$  величина постоянная.

## 2) Формула Дюлонга и Пти.

Более точные опыты, произведенные Дюлонгом и Пти показали, что закон теплопередачи путем конвекции данный Ньютоном является точным только в весьма ограниченных пределах температурных разностей, именно до  $5^\circ$ <sup>1)</sup>.

При дальнейшем же возрастании температурной разности  $\tau = T - t$ .

Отношение количества отдаваемой теплоты  $N$  к этой температурной разности  $\tau = T - t$  также возрастает вместе с абсолютной величиной последней, так что при:

$$\tau_0 > \tau_1 > \tau_2 > \dots > \tau_n$$

$$\frac{N_1}{\tau_0} = k_1 \alpha_0; \quad \frac{N_1'}{\tau_1} = k_1 \alpha_1; \quad \frac{N_1''}{\tau_2} = k_1 \alpha_2 \dots \dots \frac{N_1^{(n)}}{\tau_n} k_1 \alpha_n$$

при чем:

$$\alpha_0 > \alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_n$$

Обозначив вообще через  $\alpha_1$  множитель при  $k_1$ , характеризующий возрастание  $k_1$  в зависимости от возрастания абсолютного значения  $\tau$ , можем представить исправленную формулу Ньютона в вид:

$$N_1 = k_1 \alpha_1 (T - t) = k_1 \alpha_1 \tau \dots \dots \dots (3)$$

гдѣ, по указаніямъ опытовъ Дюлонга и Пти  $\alpha_1$  есть нѣкоторая функція отъ  $\tau$ , возрастающая съ возрастаніемъ абсолютнаго значенія самого  $\tau$ , т.-е.:

$$\alpha_1 = \varphi(\tau) \dots \dots \dots (4)$$

<sup>1)</sup> Хвольсенъ „Курсъ физики“ т. III.

Дюлонгъ и Пти для коэффициента  $\alpha_1$  предложили численное выражение:

$$\alpha_1 = \frac{0,552 (T - t)^{1,233}}{T - t} \dots \dots \dots (5)$$

Подставляя въ равенство (3) значение  $\alpha_1$  изъ формулы (5), получаемъ формулу Дюлонга и Пти въ видѣ выраженія:

$$N_1 = \frac{0,552 (T - t)^{1,233}}{T - t} k_1 (T - t) \dots \dots \dots (7)$$

или по сокращеніи:

$$N_1 = 0,552 k_1 (T - t)^{1,233} \dots \dots \dots (7)$$

Согласно пункта (b), значение коэффициента  $k_1$  въ формулахъ Ньютона и Дюлонга зависитъ только отъ величины, формы и положенія теплоотдающей поверхности.

Для нѣкоторыхъ частныхъ случаевъ были выведены формулы, выражающія эту зависимость, напримѣръ:

а) Для поверхности сферического тѣла радіуса  $r$ :

$$k_1 = 0,4033 + \frac{0,0068}{r} \dots \dots \dots (a)$$

б) Для поверхности вертикальнаго цилиндра или трубы радіуса  $r$  и высоты  $h$ :

$$k = \left( 0,3458 + \frac{0,0298}{\sqrt{\frac{r}{h}}} \right) \cdot \left( 1,157 + \frac{0,7566}{\sqrt{\frac{r}{h}}} \right) \dots \dots (b)$$

в) Для вертикальной плоскости высоты  $h$  выраженіе для  $k_1$  легко получить изъ предыдущаго, положивъ  $r = \infty$ , тогда, послѣ преобразованій, получаемъ:

$$k_1 = 0,4002 + \frac{0,2613}{\sqrt{h}} \dots \dots \dots (c)$$

г) Для поверхности горизонтальнаго цилиндра или трубы радіуса  $r$ :

$$k_1 = 0,4669 + \frac{0,0284}{r} \dots \dots \dots (d)$$

е) Для горизонтальной плоскости изъ выраженія (d) при  $r = s$  получаемъ:

$$k_1 = 0,4669 \dots \dots \dots (e)$$

Для облегченія вычисленій въ случаяхъ практическаго пользованія приводимъ здѣсь таблицы, содержащія значенія  $k_1$  для нѣкоторыхъ чаще встрѣчающихся въ техникѣ формъ поверхностей.

См. табл. № 2 на вкладн. листѣ.

Таблица № 3-й.

Коэффициентовъ  $k_1$  для вертикальныхъ плоскостей, высоты которыхъ измѣняются отъ  $h = 0,5$  фут. до  $h = 35$  фут.

Высота въ футахъ.	Величина $k_1$ .	Высота въ футахъ.	Величина $k_1$ .
0,5	0,7706	14	0,4702
1	0,6615	15	0,4677
1,5	0,6143	16	0,4655
2	0,5850	17	0,4635
2,5	0,5655	18	0,4618
3	0,5511	19	0,4602
3,5	0,5399	20	0,4586
4	0,5309	21	0,4572
4,5	0,5233	22	0,4559
5	0,5171	23	0,4547
5,5	0,5116	24	0,4535
6	0,5069	25	0,4525
6,5	0,5027	26	0,4514
7	0,4990	27	0,4505
7,5	0,4956	28	0,4495
8	0,4926	29	0,4487
8,5	0,4898	30	0,4479
9	0,4873	31	0,4471
9,5	0,4850	32	0,4463
10	0,4818	33	0,4456
11	0,4790	34	0,4450
12	0,4756	35	0,4444
13	0,4726		

Таблица № 4-й.

Коэффициентов  $k_1$  для поверхностей горизонтальных цилиндровъ, радиусы которыхъ измѣняются отъ  $r = 1''$  до  $r = 12''$  и отъ  $r = 1$  фут. до  $r = 5$  фут.

Радиусъ въ дюймахъ.	$k_1$	Радиусъ въ дюймахъ.	$k_1$	Радиусъ въ футахъ.	$k_1$	Радиусъ въ футахъ.	$k_1$
1	0,8077	7	0,5156	1,5	0,4856	4,5	0,4732
1,5	0,6941	7,5	0,5123	1,75	0,4831	4,75	0,4729
2	0,6373	8	0,5095	2	0,4811	5	0,4726
2,5	0,6052	8,5	0,5070	2,25	0,4795		
3	0,5805	9	0,5047	2,50	0,4782		
3,5	0,5641	9,5	0,5027	2,75	0,4772		
4	0,5521	10	0,5010	3	0,4764		
4,5	0,5426	10,5	0,4993	3,25	0,4756		
5	0,5349	11	0,4979	3,50	0,4750		
5,5	0,5289	11,5	0,4965	3,75	0,4745		
6	0,5237	12=1 ф.	0,4953	4	0,4740		
6,5	0,5193	1,25 ф.	0,4896	4,25	0,4735		

Значенія коэффициентовъ  $k_1$ , взятая изъ таблицъ, подставляются въ формулы Ньютона или Дюлонга и Пти, (2) или (6).

Для дальнѣйшаго упрощенія пользованія формулою Дюлонга, здѣсь помѣщается таблица коэффициентовъ  $\alpha_1$ , вычисляемыхъ по уравненію (5).

Таблица № 5-й.

Коэффициенты  $\alpha_1$  въ формулѣ Дюлонга и Пти для температурныхъ разностей отъ  $\tau = 20^\circ \text{C.}$  до  $\tau = 500^\circ \text{C.}$  черезъ  $10^\circ$ .

Разность температурь ( $T-t$ ).	$\alpha_1$ (прикосновеніемъ).	Разность коэфф. соответствующая увеличенію ( $T-t$ ) на $1^\circ$ .	Разность температурь ( $T-t$ ).	$\alpha_1$ (прикосновеніемъ).	Разность коэфф. соответствующая увеличенію ( $T-t$ ) на $1^\circ$ .
10	0,9209		260	1,9673	0,00178
20	1,0823	0,01614	270	1,9847	0,00174
30	1,1883	0,01060	280	2,0016	0,00169
40	1,2720	0,00837	290	2,0180	0,00164
50	1,3398	0,00678	300	2,0340	0,00160
60	1,3979	0,00581	310	2,0496	0,00156
70	1,4491	0,00512	320	2,0648	0,00152
80	1,4949	0,00458	330	2,0797	0,00149
90	1,5364	0,00415	340	2,0942	0,00145
100	1,5747	0,00383	350	2,1084	0,00142
110	1,6100	0,00353	360	2,1223	0,00139
120	1,6430	0,00330	370	2,1360	0,00137
130	1,6743	0,00313	380	2,1492	0,00132
140	1,7030	0,00287	390	2,1622	0,00130
150	1,7307	0,00277	400	2,1750	0,00128
160	1,7569	0,00262	410	2,1876	0,00126
170	1,7820	0,00251	420	2,1999	0,00122
180	1,8058	0,00238	430	2,2119	0,00120
190	1,8287	0,00229	440	2,2239	0,00120
200	1,8507	0,00220	450	2,2357	0,00118
210	1,8723	0,00216	460	2,2473	0,00116
220	1,8922	0,00199	470	2,2583	0,00110
230	1,9120	0,00198	480	2,2693	0,00110
240	1,9310	0,00190	490	2,2802	0,00109
250	1,9495	0,00185	500	2,2910	0,00108

Формулу Дюлонга и Пти, считали достаточно точной до температурной разности въ 250° С. <sup>1)</sup>

Однако позднѣйшими работами Пекле установлено, что эта формула при разностяхъ температуръ уже близкихъ къ 60° даетъ несогласные съ опытомъ результаты. Пользованіе этой формулой, кромѣ того затруднительно еще и въ силу ея сложности и громоздкости, что и побудило Пекле предложить свое выраженіе для  $N_1$  въ предѣлахъ температурныхъ разностей отъ  $\tau = 25^\circ$  С. до  $\tau = 65^\circ$  С.

### 3) Формула Пекле.

Замѣтивъ на основаніи своихъ опытовъ, что коэффициентъ  $k_1$  возрастаетъ съ возрастаніемъ абсолютнаго значенія температурной разности  $\tau$ , Пекле выражаетъ исправленную формулу Ньютона подобно Дюлонгу и Пти въ формѣ:

$$N_1 = k_1 \alpha_1 (T - t) = k_1 \cdot \alpha_1 \cdot \tau \dots \dots (8)$$

гдѣ:

$$\alpha_1 = \varphi (\tau);$$

На основаніи сказаннаго  $\alpha_1$  должно удовлетворить условію:

$$\alpha_1 > 1;$$

Слѣдовательно,  $\alpha_1$  можетъ быть выражено въ видѣ:

$$\alpha_1 = 1 + \delta_1$$

гдѣ  $\delta_1$ —нѣкоторое переменное число. Такъ какъ  $\alpha_1$  является функцией температурной разности, то простѣйшей формой зависимости будетъ:

$$\alpha_1 = 1 + \delta_1 = 1 + \gamma_1 \tau \dots \dots (9)$$

Значеніе множителя  $\gamma_1$  подлежитъ уже опытному опредѣленію.

Для предѣловъ температурной разности отъ  $\tau = 25^\circ$  С. до  $\tau = 65^\circ$  С. и при температурѣ воздуха  $t = +12^\circ$  С Пекле нашель для  $\gamma_1$  величину равную 0,0075, что доставляетъ для  $\alpha_1$  значеніе:

$$\alpha_1 = 1 + 0,0075 \tau = 1 + 0,0075 (T - t) \dots \dots (10)$$

Подставляя далѣе значеніе  $\alpha_1$  изъ выраженія (10) въ формулу (8) найдемъ:

$$N_1 = k_1 \alpha_1 \tau = k_1 [1 + 0,0075 \tau] \tau \dots \dots (11)$$

<sup>1)</sup> Проф. С. Лукашевичъ „Курсъ отопленія и вентиляціи“. Изданіе 3-е стр. 29.

Это и будет выражение, данное Пекле, для потери теплоты поверхностью тѣла путемъ соприкосновенія съ воздухомъ, справедливое въ указанныхъ выше предѣлахъ.

Для коэффициента  $k_1$  Пекле были даны численныя значенія, оказавшіяся, по признанію самого Пекле, малодостовѣрными приближеніями. Провѣркою цифръ, найденныхъ Пекле, нѣсколько позже занялись Руссеръ и затѣмъ Германъ Фишеръ, наблюдая охлажденіе желѣзныхъ и чугунныхъ трубъ, согрѣваемыхъ паромъ. Опыты подтвердили недостаточность коэффициентовъ, данныхъ Пекле. Въ виду недостаточной степени точности и позднѣйшихъ цифровыхъ величинъ, найденныхъ для  $k_1$ , въ настоящее время для практическихъ приложений считаютъ необходимымъ удваивать цифры, данныя Пекле; такимъ образомъ составлена нижепомѣщаемая таблица.

Таблица № 6-й.

Основныхъ коэффициентовъ передачи тепла соприкосновеніемъ по Грасгофу и Фишеру:

Поверхности воспринимающія и отдающія теплоту соприкосновеніемъ съ воздухомъ.	Коэффициентъ $k_1$ .
Поверхности со стороны воздушныхъ прослойковъ . . . . .	Отъ 2 до 3.
Внутреннія поверхности огражденій зданій (стѣнъ, половъ, потолоковъ, оконъ) . . . . .	Отъ 3 до 4.
Внѣшнія поверхности, защищенныя отъ непосредственнаго вліянія вѣтра . . . . .	Отъ 4 до 5.
Наружныя поверхности, не защищенныя отъ дѣйствія вѣтра . . . . .	Отъ 5 до 6.

### III. Передача теплоты лучеиспусканіемъ.

#### 1) Сушность лучистой энергіи.

На основаніи принципа сохраненія энергіи необходимо представлять себѣ возникновеніе любой формы энергіи только путемъ преобразования части или всего имѣющагося запаса другой формы энергіи. Согласно этого положенія, лучистая энергія периодическаго движенія въ эфирѣ должна имѣть своимъ источникомъ запасъ какого-либо другого вида энергіи. Чаше всего лучистая энергія возникаетъ вслѣдствіе перехода въ нее тепловой энергіи молекулъ твердыхъ, жидкихъ или газообразныхъ тѣлъ.

Такой переход называется *колорическимъ лучеиспусканиѣмъ*. Переходъ тепловой энергіи въ лучистую современная физика представляет себѣ происходящимъ слѣдующимъ образомъ:

Эфиръ заполняетъ все свободное пространство между молекулами тѣла; энергія движенія молекулъ непрерывно передается эфиру и распространяется въ немъ по всѣмъ направленіямъ; если бы эта энергія не пополнялась притокомъ извнѣ отъ другихъ сосѣднихъ тѣлъ, то тѣло въ очень короткій промежутокъ времени потеряло бы весь запасъ тепловой энергіи; молекулы пришли бы въ относительный покой. Подобнаго истощенія запасовъ энергіи въ природѣ не наблюдается вслѣдствіе непрерывнаго ея притока въ видѣ лучистой энергіи, непрерывно исходящей отъ всѣхъ окружающихъ тѣлъ и переходящей въ тепловую энергію движенія молекулъ.

Отъ всякаго тѣла при всѣхъ условіяхъ и при всякой, даже самой низкой температурѣ непрерывно исходитъ потокъ лучистой энергіи; въ то же время тѣло непрерывно поглощаетъ потоки энергіи исходящіе отъ другихъ тѣлъ.

Если потокъ лучистой энергіи, испускаемый тѣломъ, больше или меньше потока поглощаемаго, то запасъ тепловой энергіи, а слѣдовательно и температура тѣла уменьшается или увеличивается, тѣло охлаждается или нагрѣвается.

Характеръ потока лучистой энергіи, испускаемой тѣломъ, вѣроятно, зависитъ отъ характера тѣхъ молекулярныхъ движеній, которыя происходятъ въ данный моментъ. Когда температура тѣла низка, тогда движенія большинства молекулъ сравнительно медленны; они способны вызывать въ эфирѣ также медленные колебанія, распространяющіяся лучами съ большею длиною волны.

По мѣрѣ повышенія температуры тѣла увеличивается и число молекулъ совершающихъ болѣе быстрыя, чѣмъ раньше, колебанія, соотвѣтственно этому усиливаются и потоки лучистой энергіи съ болѣе короткой волной и большою преломляемостью.

Когда температура тѣла достигнетъ нѣкотораго значенія, тогда часть испускаемой лучистой энергіи, обладая длиною волны въ 0,0007 мп, начинаетъ дѣйствовать на нашъ глазъ, вызывая впечатлѣніе краснаго свѣта. Это значить, что тѣло достигло температуры «темно краснаго каленія».

При дальнѣйшемъ повышеніи температуры увеличивается энергія лучей съ все болѣе и болѣе короткой волной и большою преломляемостью: дѣлаются видимыми послѣдовательно лучи оранжевые, желтые, зеленые, голубые, синіе и, наконецъ, фіолетовые (температура бѣлаго каленія), далѣе тѣло будетъ испускать лучи, которые снова не способны дѣйствовать на нашъ органъ зрѣнія—это лучи ультра-фіолетовые.

Такимъ образомъ лучистая теплота представляетъ одну изъ формъ лучистой энергіи вообще и поэтому подчиняется въ своемъ распространеніи общимъ физическимъ законамъ, управляющимъ явленіями лучистой энергіи.

а) Тепловые лучи распространяются прямолинейно во всѣ стороны отъ теплового центра, подобно лучамъ свѣтовымъ.

б) Напряжение теплоты обратно пропорціонально квадратамъ разстояній и Sinus'амъ угловъ, составляемыхъ тепловыми лучами съ плоскостью, на которую они падаютъ. Тепловые лучи испускаемые солнцемъ и всякимъ раскаленнымъ тѣломъ называются *свѣтлыми* тепловыми лучами; потокъ лучей, выходящихъ изъ камина въ помещеніе, представляетъ *смѣсь* свѣтлыхъ и темныхъ лучей, наконецъ, нагрѣтая поверхность голландской печи посылаетъ въ пространство только *темные* тепловые лучи.

## 2) Формула Ньютона.

Въ предѣлахъ температурныхъ разностей, не превосходящихъ  $\tau = 5^\circ \text{C}$ ., справедливъ предложенный Ньютономъ законъ потери теплоты поверхностью тѣла черезъ лучеиспусканіе:

$$N_2 = k_2 [T - t] = k_2 \tau \dots \dots \dots (1)$$

по которому количество теплоты отданной лучеиспусканіемъ нагрѣтаго тѣла температуры  $T$  въ среду температуры  $t$  въ единицу времени черезъ поверхность въ 1 кв. единицу пропорціонально первой степени разности температуръ:

$$\tau = (T - t)$$

Коэффициентъ пропорціональности  $k_2$  въ уравненіи (1) при  $T - t =$  единицъ, равенъ  $N_2$ ; слѣдовательно,  $k_2$  представляетъ собою количество теплоты теряемой лучеиспусканіемъ въ единицу времени, черезъ единицу поверхности при разности температуръ тѣла и пространства въ  $1^\circ \text{C}$ .  $k_2$  называется коэффициентомъ лучеиспусканія.

Количество теплоты  $k_2$  теряемое въ единицу времени единицею поверхности лучеиспускающаго тѣла при разности температуръ въ  $1^\circ \text{C}$ . зависитъ какъ показываетъ опытъ,

а) отъ рода и состоянія поверхности, а при температурныхъ разностяхъ, большихъ  $\tau = 5^\circ \text{C}$ . еще и отъ абсолютнаго значенія температуры среды  $t$ .

Значенія коэффициентовъ лучеиспусканія для нѣкоторыхъ тѣлъ приводятся въ нижеслѣдующей таблицѣ:

Таблица № 7-й.

Коэффициентъ ( $k_2$ ) лучеиспускательной способности для плоских поверхностей некоторых тѣлъ (по Пекле).

Наименованіе тѣлъ.	Значенія $k_2$ .		Наименованіе тѣлъ.	Значенія $k_2$ .	
	въ са на 1 m <sup>2</sup> .	въ ф/ц. ед. т. на 1 кв. футъ.		въ са на 1 m <sup>2</sup> .	въ ф/ц. ед. т. на 1 кв. футъ.
<b>I. Металлы:</b>			<b>III. Разныя мате ріалы:</b>		
Чугунъ новый . . .	3,17	0,7191	Бумага . . . . .	3,80	0,8553
„ ржавый . . .	3,36	0,7622	Бумага посеребренн.	0,42	0,0953
Мѣдь красная . . .	0,16	0,0363	Бумага позолоченная.	0,23	0,0522
Цинкъ . . . . .	0,24	0,0544	Бумажная матерія . .	3,65	0,8280
Олово . . . . .	0,22	0,0488	Промасленное полотно.	3,71	0,8416
Желѣзо полированное.	0,45	0,1021	Шерсть и шерстяная матерія . . . . .	3,70	0,8948
„ проолифовая.	0,65	0,1474	Шелковая матерія . .	3,70	0,8348
„ обыкновенное.	2,77	0,6284	Древесные опилки . .	3,53	0,8008
„ ржавое . . .	3,36	0,7622	Дерево . . . . .	3,60	0,8167
Серебро полированн.	0,13	0,0295	Дерево - угольный порошокъ . . . . .	3,42	0,7759
Латунь полированн.	0,26	0,0585	Стекло (сухое) . . .	2,91	0,6601
<b>II. Камни и Земли:</b>			Сажа . . . . .	4,00	0,9097
Строительные камни.	3,60	0,8167	Вода . . . . .	5,30	0,0424
Известь . . . . .	3,60	0,8167	Масляная окраска . .	3,70	0,8348
Гипсъ . . . . .	3,60	0,8167	Штукатурка известково-алебастровая.	3,60	0,8167
Мѣлъ (въ порошокъ).	3,32	0,7530	Обои бумажные . . .	3,80	0,8563
Песокъ мелкій . . .	3,62	0,8212			

*Примѣчаніе.* Для перевода мѣръ метрическихъ въ русскія 1-го столбца надо дѣлать на 4,41 и обратно для перевода русскихъ въ метрическія мѣры 2-го столбца надо умножать на 4,41.

**3) Формула Дюлонга и Пти.**

Такъ какъ формула Ньютона оказывается неточною уже при малыхъ температурныхъ разностяхъ, то Дюлонгъ и Пти предложили свою эмпирическую формулу:

$$N_2 = 124,72k_2 \cdot a^t \left[ a^{\frac{(T-t)}{a}} - 1 \right] \dots \dots \dots (2)$$

гдѣ  $k_2$  — коэффициентъ лучеиспусканія, выбираемый по таблицѣ № 7 й въ русскихъ мѣрахъ,  $a$  — численный множитель, равный постоянному числу 1,0077.

Въ формулу Дюлонга входитъ членъ  $a^t$ , выражающій зависимость теплопередачи лучеиспусканіемъ отъ абсолютнаго значенія температуры среды  $t$ .

Положивъ:

$$\frac{124,72 a^t \left[ a^{\frac{(T-t)}{a}} - 1 \right]}{T-t} = \alpha_2 \dots \dots \dots (3)$$

можемъ представить формулу Дюлонга въ формѣ, подобной формулѣ Ньютона:

$$N_2 = k_2 \alpha_2 (T - t) = k_2 \alpha_2 \tau \dots \dots \dots (4)$$

для облегченія вычисленій ниже приводится таблица значеній  $\alpha_2$  при  $t = +15^\circ$ , а для случаевъ, когда  $t$  не равно  $+15^\circ$  С. дополнительная таблица поправочныхъ коэффициентовъ  $\beta$ .

Въ этихъ послѣднихъ случаяхъ формула принимаетъ видъ:

$$N_2 = k_2 \alpha_2 \beta (T - t) = k_2 \alpha_2 \beta \tau \dots \dots \dots (5)$$

**Таблица № 8-й.**

Коэффициентовъ  $\alpha_2$  въ формулѣ Дюлонга и Пти при  $t = +15^\circ$  С.

Разность температуръ (T-t).	$\alpha_2$ (лучемспу- сканіемъ).	Разность коэфф. со- отвѣтствующая уве- личенію (T-t) на 1°.	Разность температуръ (T-t).	$\alpha_2$ (лучемспу- сканіемъ).	Разность коэфф. со- отвѣтствующая уве- личенію (T-t) на 1°.
10	1,1860		260	3,6296	0,01774
20	1,2328	0,00468	270	3,8137	0,01841
30	1,2832	0,00504	280	4,0171	0,02034
40	1,3353	0,00521	290	4,2286	0,02141
50	1,3907	0,00554	300	4,4527	0,02115
60	1,4489	0,00582	310	4,6907	0,02380
70	1,5101	0,00612	320	4,9737	0,02830
80	1,5748	0,00647	330	5,2118	0,03381
90	1,6433	0,00685	340	5,4962	0,02844
100	1,7154	0,00721	350	5,7988	0,03126
110	1,7915	0,00761	360	6,1203	0,03215
120	1,8720	0,00805	370	6,4608	0,03405
130	1,9570	0,00850	380	6,8234	0,03626
140	2,0468	0,00898	390	7,2102	0,03868
150	2,1415	0,00947	400	7,6200	0,04098
160	2,2417	0,01002	410	8,0536	0,04336
170	2,3480	0,01063	420	8,5170	0,04634
180	2,4598	0,01118	430	9,0095	0,04925
190	2,5786	0,01188	440	9,5470	0,05375
200	2,7042	0,01256	450	10,0900	0,05430
210	2,8371	0,01329	460	10,6832	0,05932
220	2,9779	0,01408	470	11,3232	0,06400
230	3,1270	0,01491	480	11,9864	0,06632
240	3,2891	0,01621	490	12,7029	0,07165
250	3,4522	0,01631	500	13,4634	0,07605

**Дополнительная таблица № 9-й**

поправочных коэффициентов  $\beta$  для случаев  $t \geq +15^\circ \text{C}$ .

Коэффициент ( $\beta$ ), на который слѣдуетъ умножить ( $\alpha_2$ ), если температура поверхности не равна  $15^\circ \text{C}$ .

Температура поверхности.	0°	10	17	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Значеніе коэф. $\beta$	0,89	0,96	1,016	1,04	1,12	1,21	1,31	1,31	1,52	1,65	1,78	1,92

**4) Формула Пекле.**

Позднѣйшіе опыты Пекле и другихъ показали неточность формулы Дюлонга; такъ оказалось, что потеря тепла лучеиспусканіемъ пропорциональна не первой степени температурной разности  $\tau$ , а степени высшей, чѣмъ первая.

Отношеніе количества  $N_2$  къ температурной разности  $\tau$ , не есть постоянная величина  $k_2$ , какъ это допущено Ньютономъ, но измѣняется, возрастая съ возрастаніемъ абсолютнаго значенія  $\tau$ , т.е. что:

$$\text{при } \tau_0 > \tau_1 > \tau_2 > \dots > \tau_n$$

$$\frac{N_2}{\tau_0} = k_2 \alpha_0; \quad \frac{N_2}{\tau_1} = k_2 \alpha_1; \quad \frac{N_2''}{\tau_2} = k_2 \alpha_2 \dots \dots \frac{N_2^{(n)}}{\tau_n} = k_2 \alpha_n$$

причемъ

$$\alpha_0 > \alpha_1 > \alpha_2 > \dots \dots \alpha^n.$$

Обозначая вообще черезъ  $\alpha_2$  множитель при  $k_2$ , характеризующій возрастаніе  $k_2$  съ возрастаніемъ  $\tau$ , можемъ написать что:

$$\alpha_2 = \varphi(\tau).$$

При этомъ  $\alpha_2$  должно удовлетворять условію:

$$\alpha_2 > 1.$$

Если это такъ, то  $\alpha_2$  можетъ быть представлено въ формѣ суммы:

$$\alpha_2 = 1 + \delta_2,$$

гдѣ  $\delta_2$  — нѣкоторое переменное число.

Такъ какъ  $\alpha_2$  зависитъ отъ  $\tau$ , являясь ея функцией, то

$$\alpha_2 = 1 + \delta_2 = 1 + \gamma_2 \tau \dots \dots (6)$$

коэффициентъ  $\gamma_2$  опредѣленъ былъ опытомъ и найденъ равнымъ 0,0056; что доставляетъ для  $\alpha_2$  значеніе:

$$\alpha_2 = 1 + 0,0056 \tau = 1 + 0,0056 (T - t) \dots \dots (7)$$

Подставляя значение  $\alpha_2$  въ формулу (4) находимъ:

$$N_2 = k_2 \alpha_2 (T - t) = k_2 [1 + 0,0056 (T - t)] = k_2 (1 + 0,0056 \tau) . . . . (8)$$

формула (8) считается справедливой при температурѣ среды + 12° С. и въ предѣлахъ температурныхъ разностей:

$$\text{отъ } \tau = 25^\circ \text{ С. до } \tau = 65^\circ \text{ С.}$$

#### IV. Общій случай передачи теплоты.

##### Соприкосновеніемъ и лучеиспусканиемъ.

1) **Основные формулы.** Въ общемъ случаѣ внѣшняго охлаждения нагрѣтое тѣло теряетъ теплоту одновременно какъ черезъ соприкосновение съ частицами среды, такъ и путемъ лучеиспусканія, поэтому полная потеря теплоты  $N$  въ единицу времени черезъ единицу поверхности при разности температуръ  $T - t = \tau$  поверхности и среды должна быть равна суммѣ частныхъ слагающихъ потерь  $N_1$  и  $N_2$ , т.-е.:

$$N = N_1 + N_2.$$

а) При малыхъ разностяхъ температуръ до  $\tau = 10^\circ \text{ С.}$  достаточна точность, представляемая формулами Ньютона, по которымъ:

$$N = N_1 + N_2 = k_1 (T - t) + k_2 (T - t) = (k_1 + k_2) [T - t] . . . . (1)$$

или;

$$N = (k_1 + k_2) \tau . . . . . (1).$$

Въ уравненіяхъ (1) и (1') ( $k_1$   $k_2$ +) равно суммѣ коэффициентовъ теплопередачи соприкосновеніемъ и лучеиспусканиемъ;

$$T - t = \tau$$

есть разность температуръ поверхности охлаждающагося тѣла и окружающей его среды.

б) При разностяхъ температуръ въ предѣлахъ

$$\text{отъ } \tau = 10^\circ \text{ С. до } \tau = 60^\circ \text{ С.}$$

и при

$$t \lesseqgtr + 15^\circ \text{ С.}$$

можно пользоваться формулами Дюлонга и Пти въ формѣ:

$$N = N_1 + N_2 = k_1 \alpha_1 [T - t] + k_2 \alpha_2 \beta [T - t] = [k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2 \beta] \cdot [T - t] . . . . . (2)$$

или

$$N = [k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2 \beta] \tau . . . . . (2')$$

причемъ:

$$\alpha_1 = \frac{0,552 [T - t]^{1,233}}{T - t};$$

и

$$\alpha_2 = \frac{124.72 a^t [a^{(T-t)} - 1]}{T - t}$$

а значения  $\beta$  берутся по таблицѣ № 9-й для данной температуры  $t$ .

γ) Наконецъ, въ предѣлахъ температурныхъ разностей  
отъ  $\tau = 25^\circ \text{C}$ . до  $\tau = 65^\circ \text{C}$ .

и при температурѣ среды:

$$t = +12^\circ \text{C}.$$

Наиболѣе удобной для технического пользованія является формула Пекле, по которой:

$$N = N_1 + N_2 = k_1 \alpha_1 (T - t) + k_2 \alpha_2 (T - t) = (k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2) (T - t) \dots \dots \dots (3)$$

или

$$N = N_1 + N_2 = |k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2| \tau \dots \dots \dots (3')$$

причемъ:

$$\alpha_1 = 1 + 0,0075 \tau;$$

$$\alpha_2 = 1 + 0,0056 \tau;$$

что по подставленіи въ уравненія (3) и (3') доставляетъ:

$$N = k_1 |1 + 0,0075 (T - t)| (T - t) + k_2 |1 + 0,0056 (T - t)| (T - t) = |k_1 + k_2| + (0,0075 k_1 + 0,0056 k_2) (T - t) (T - t) \dots \dots \dots (4)$$

или

$$N = |k_1 + k_2| + (0,0075 k_1 + 0,0056 k_2) \tau \tau \dots \dots \dots (4')$$

2) Преобразование основныхъ формулъ теплопередачи сопряженіемъ и лучеиспусканіемъ.

а) Обозначая въ уравненіяхъ (1) и (1') сумму коэффициентовъ потери теплоты  $(k_1 + k_2)$  черезъ  $Q$ , т.е. полагая

$$k_1 + k_2 = Q,$$

получаемъ ур-ніе Ньютона въ формѣ:

$$N = Q (T - t) = Q \tau \dots \dots \dots (5)$$

б) Положивъ, точно также, въ формулѣ Дюлонга:

$$k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2 = Q,$$

или при

$$t \leq +15^\circ \text{C}.$$

$$k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2 \beta = Q;$$

найдемъ, по подстановленіи въ формулы (2) и (2'):

$$N = Q (T - t) = Q \tau \dots \dots \dots (6)$$

и, наконецъ,

γ) Обозначивъ также черезъ  $Q$  выражения:

$$(k_1 + k_2) + (0,0075 k_1 - 0,0056 k_2) (T - t) = Q$$

найдемъ, какъ и выше:

$$N = Q \cdot (T - t) = Q \cdot \tau \dots \dots \dots (7)$$

Выраженія (5), (6) и (7) въ совершенно одинаковой формѣ выражаютъ потерю теплоты черезъ соприкосновеніе и лучеиспусканіе поверхностью нагрѣтаго тѣла. Само собою разумѣется, что при пользованіи этими формулами значенія  $Q$  въ нихъ различны и зависятъ отъ указанныхъ выше условій теплоизліянія.

Съ достаточной точностью можно принимать, что явленія нагрѣванія тѣлъ или такъ называемые процессы поглощенія теплоты соприкосновеніемъ и лучеиспусканіемъ подчинены тѣмъ же законамъ, что и разсмотрѣнныя выше явленія охлажденія. Слѣдовательно, могутъ быть выражаемы тѣми же формулами, какія выведены для закономъ охлажденія.

Необходимо еще имѣть въ виду, что не всегда потеря теплоты происходитъ одновременно соприкосновеніемъ и лучеиспусканіемъ: въ нѣкоторыхъ случаяхъ потеря можетъ происходить или только соприкосновеніемъ или только лучеиспусканіемъ.

Въ этихъ случаяхъ соотвѣтствующіе коэффиціенты  $k_1$ ,  $k_2$  или  $k_1 \alpha_1$  и  $k_2 \alpha_2$  или  $k_2 \alpha_2 \beta$  обращаются въ нуль.

**3) Численные примѣры на опредѣленіе потери теплоты черезъ внѣшнее охлажденіе.**

**Примѣръ № 1-й**

**Заданіе:** дана вертикальная желѣзная труба радіуса  $r=12''$  и высоты  $h = 21'$

Температура внѣшней поверхности трубы  $T = + 100^\circ \text{ C.}$ ;

температура окружающаго воздуха  $t = + 15^\circ \text{ C}$

требуется вычислить часовой расходъ теплоты поверхностью всей трубы  $W$  въ ф./п. ед. т.

**Рѣшеніе:**

Разность температуръ

$$T - t = 100 - 15 = 85^\circ \text{ C.}$$

превышаетъ допустимую для формулы Ньютона, поэтому должна быть

примѣнена формула Дюлонга (уравненіе (2), такъ какъ потеря теплоты совершается одновременно соприкосновеніемъ и лучеиспусканіемъ.

$$N = [k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2 \beta] (T - t) \dots \dots \dots (a)$$

для вертикальнаго цилиндра радіуса  $r = 12''$  и  $h = 21'$  согласно таблицы № 2-й коэффициентъ  $k_1 = 0,4965$ ; по таблицѣ № 4 для разности температуръ  $T - t = 100 - 15 = 85^\circ C$ , коэффициентъ

$$\alpha_1 = 1.4949 + 0,00415 \times 5 = 1.5157;$$

$$\alpha_1 k_1 = 1.5157 \times 0,4965 = 0.7525;$$

по таблицѣ № 6-й для желѣза коэффициентъ лучеиспусканія:

$$k_2 = 0.6284;$$

по таблицѣ № 7-й, въ предположеніи температуры оболочки равной при разности

$$T = + 15^\circ C.$$

коэффициентъ

$$T - t = 85^\circ$$

$$\alpha_2 = 1,5748 + 0,00647 \times 5 = 1.6172;$$

по таблицѣ 9-й поправочный коэффициентъ (при температурѣ оболочки

$$T = + 100^\circ C.) \beta = 1.92;$$

$$k_2 \alpha_2 \beta = 0,6284 \times 1.6172 \times 1.92 = 1.9543.$$

Откуда:

$$N = (0.7525 + 1.9543) (100 - 15) = 230,078 \text{ ф./ц. ед. т.}$$

съ одного кв. фута теплоотдающей поверхности.

Величина этой поверхности:

$$S = 2 \pi r h = 2 \times 3.14 \times 1 \times 21 = 131,88 \text{ кв. фут.}$$

Полная часовая теплоотдача внѣшнюю поверхность трубы:

$$W = N \cdot S = 230,078 \times 131.88 = 30342,69 \text{ ф./ц. ед. т.}$$

### Примѣръ № 2-й.

**Заданіе:** дана вертикальная, плоская кирпичная стѣна, внѣшняя поверхность которой поддерживается при температурѣ  $T = + 120^\circ C$ . температура воздуха  $t = + 20^\circ C$ . высота стѣны  $h = 5'$  теплоотдающая поверхность  $S = 40$  кв. фут.

**Рѣшеніе.** Такъ какъ  $T - t = 120^\circ - 20^\circ = 100^\circ C$ , то

$$N = [k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2 \beta] (T - t).$$

по табл. № III-й: для вертикальной плоскости  $h = 5$  фут.  $k_1 = 0.5171$ ; по табл. № IV-й: для  $T - t = 120 - 20 = 100^\circ C$ ;  $\alpha_1 = 1,5747$ ; по табл. № VI-й:  $k_2 = 0,8167$ ; по табл. № VII-й:  $\alpha_2 = 1,7154$ ; и по табл. VIII-й:  $\beta = 1,04$ .

При этих данных:

$$N = [(0,5171 \times 1,5747) + (0,8167 \times 1,7154 \times 1,04)] 100 = [0,8143 + 0,4570] 100 = 227,13 \text{ ф/ц. ед. т.}$$

$$W = N.S \ 227,13 \times 40 = 9085,20 \text{ ф/ц. ед. т. вь чась.}$$

### Примѣръ № 3-й.

**Заданіе.** Дана наружная стѣна жилого зданія сложенная изъ известняка толщиной  $e = 0,38 \text{ mtr.}$ ; внѣшняя ея поверхность имѣеть  $t$ -ру  $T = +15^\circ \text{ C.}$ ;  $t$ -ра воздуха снаружи  $t = +5^\circ \text{ C.}$  Поверхность стѣны  $S = 25 \text{ mtr}^2$ ; требуется вычислить часовую потерю тепла черезъ поверхность  $S$  вь calor/Cels. по формуль Пекле.

**Рѣшеніе.** По формуль Пекле имѣемъ:

$$N = [k_1 + k_2 + (0,0075 k_1 + 0,0056 k_2) (T - t)] (T - t);$$

по табл. № V-й коэффициентъ  $k_1 = 6$  (для внѣшней стѣны не защищенной отъ дѣйствія вѣтра); по табл. № VI-й коэффициентъ лучеиспусканія для известняка:  $k_2 = 3,60$ ;

$$T - t = 15 - 5 = 10^\circ \text{ C.}$$

поэтому:

$$N = [(6 + 3,60) + (0,0075 \times 6 + 0,0056 \times 3,60) 10] 10 = [9,60 + 0,0652 \times 10] 10 = 102,52 \text{ calor.}$$

$$W = N.S = 102,52 \times 25 = 2563 \text{ cal. вь чась.}$$

### Примѣръ № 4-й.

**Заданіе.** Дана вертикальная чугунная труба радіуса  $r = 9''$  и высоты  $h = 15 \text{ фут.}$ ; внутренняя поверхность трубы поддерживается при  $t$ -рѣ  $T = +100^\circ \text{ C}$  по трубѣ движется воздухъ при  $t$ -рѣ  $t = +15^\circ \text{ C.}$  Требуется вычислить часовую теплоотдачу внутренней поверхности трубы.

**Рѣшеніе.** Вь данномъ случаѣ передача тепла происходитъ только соприкосновеніемъ воздуха съ чугунной поверхностью, лучеиспускательная, а слѣдовательно и поглощательная способность котораго близка къ нулю. Точки поверхности самой трубы, лучеиспуская одна по направлению къ другой, будутъ столько же получать сколько и терять теплоты.

При этихъ условіяхъ:

$$k_2 = 0; \alpha_2 = 0; \beta = 0; N = \alpha_1 k_1 [T - t];$$

при

$$T - t = 100 - 15 = 85^\circ \text{ C.}$$

По табл. № II-й: для вертикальнаго цилиндра  $r = 9''$  и  $h = 15 \text{ фут.}$

$$k_1 = 0,5141;$$

по табл. № IV-й при  $T - t = 85^\circ \text{C}$ .

$$\alpha_1 = 1,51;$$

при этихъ данныхъ:

$$N = 1,51 \times 0,5141 \times 85 = 66,13 \text{ ф/ц. ед. т. въ часъ съ 1 кв. ф.}$$

Внутренняя поверхность трубы

$$S = 2 \times 3,14 \times 0,75 \times 15 = 70,65 \text{ кв. фут.};$$

слѣдовательно:

$$W = N.S = 66,13 \times 70,65 = 4623,30 \text{ ф/ц. ед. т въ часъ.}$$

**Примѣчаніе.** Къ случаю, приведенному въ примѣрѣ № 3-й можно было примѣнить и простую формулу Ньютона, такъ какъ  $T - t = 15 - 5 = 10^\circ \text{C}$ .

Въ этомъ случаѣ получили бы:

$$N = (k_1 + k_2) (T - t) = (6,00 + 3,60) 10 = 96,00 \text{ cal.}$$

и

$$W = N.S = 96 \times 25 = 2400 \text{ cal. въ часъ,}$$

что меньше вычисленнаго по формулѣ Пекле.

### V. Выраженіе для количества проведенной теплоты $N$ въ случаѣ нѣсколькихъ разнородныхъ слоевъ. (Черт. № 3-й).

Положимъ имѣется вертикальная стѣна, состоящая изъ  $n$  разнородныхъ по материалу слоевъ, толщины которыхъ послѣдовательно обозначаемъ черезъ  $e_1, e_2, \dots, e_{n-1}, e_n$ .

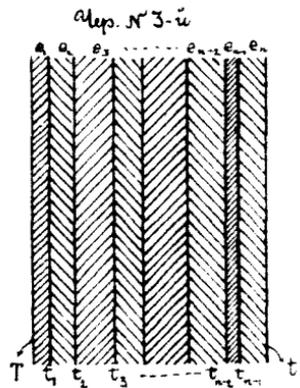
Температура внѣшней поверхности крайняго лѣваго слоя извѣстна и равна  $T$ ; точно также  $t$ —ра внѣшней поверхности послѣдняго слоя равна  $t$ .

Такъ какъ матеріалъ каждаго слоя извѣстенъ, то извѣстны и коэффициентъ внутренней ихъ теплопроводности  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ .

Обозначимъ черезъ  $t^1, t_2, t_3, \dots, t_{n-1}$  неизвѣстныя  $t$ —ры въ плоскостяхъ разграниченія отдѣльныхъ слоевъ.

На основаніи уравненія (19-го) § II-го для перваго слоя можемъ написать выраженіе для количества проведенной теплоты:

$$N = \frac{\lambda_1}{e_1} (T - t_1) \dots \dots \dots \text{ а)}$$



Разсматривая періодъ инерціи или установившагося дѣйствія, т. е. тотъ случай, когда каждый слой проводитъ сквозь свою толщю и передаетъ слѣдующему за нимъ слою въ ед—цу времени тоже самое

количество теплоты  $N$ , каксе за то же время получает самъ отъ предыдущаго слоя, можемъ для втораго слоя составить выраженіе аналогичное выраженію (а), именно:

$$N = \frac{\lambda_2}{e_2} (t_1 - t_2) \dots \dots \dots (b)$$

Точно также для каждаго послѣдующаго промежуточнаго слоя включая и предпослѣдній  $(n - 1)$ -й составляемъ такія же выраженія, именно: для третьаго:

$$N = \frac{\lambda_3}{e_3} (t_2 - t_3) \dots \dots \dots (c)$$

для четвертаго:

$$N = \frac{\lambda_4}{e_4} (t_3 - t_4) \dots \dots \dots (d)$$

.....  
.....

для  $(n - 1)$ -го:

$$N = \frac{\lambda_{n-1}}{e_{n-1}} (t_{n-2} - t_{n-1}) \dots \dots \dots (n-1)$$

и, наконецъ, для послѣдняго наружнаго слоя:

$$N = \frac{\lambda_n}{e_n} (t_{n-1} - t) \dots \dots \dots (n)$$

Такъ какъ въ системѣ уравненій отъ (а) до (n) заключается  $n$  неизвѣстныхъ:

$$N, t_1, t_2 \dots \dots \dots t_{n-1}$$

то, задача имѣть вполнѣ опредѣленное рѣшеніе.

Такъ какъ въ концѣ концовъ искомымъ является только количество проведенной теплоты  $N$ , то простѣйшимъ рѣшеніемъ является слѣдующее: рѣшаемъ каждое изъ  $(n)$  уравненій относительно разностей  $t$ -ръ и получаемъ слѣдующую систему:

$$\left. \begin{aligned} T - t_1 &= N \frac{e_1}{\lambda_1} \\ t_1 - t_2 &= N \frac{e_2}{\lambda_2} \\ t_2 - t_3 &= N \frac{e_3}{\lambda_3} \\ \dots \dots \dots \\ t_{n-2} - t_{n-1} &= N \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} \\ t_{n-1} - t &= N \frac{e_n}{\lambda_n} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

Сложивъ первыя и вторыя части всѣхъ  $n$  ур—ній системы (1) найдемъ, что въ лѣвой части сократятся всѣ неизвѣстныя температуры  $t_1, t_2, \dots, \text{до } t_{n-1}$ ; во второй же вынесется за скобки общій множитель  $N$  и тогда:

$$T - t = N \left[ \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + \frac{e_n}{\lambda_n} \right] \dots \dots \dots (2)$$

Рѣшая ур—ніе 2 относительно искомага  $N$ , получаемъ окончательно:

$$N = \frac{T - t}{\left[ \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + \frac{e_n}{\lambda_n} \right]} \dots \dots \dots (3)$$

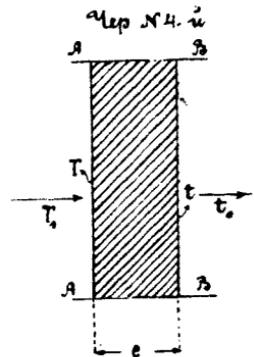
Ур—ніе (3) показываетъ, что въ случаѣ проведенія теплоты сквозь толщу нѣсколькихъ разнородныхъ слоевъ, количество теплоты, проводимой въ ед—цу времени черезъ ед—цу поверхности пропорціонально температурной разности внѣшнихъ поверхностей крайнихъ слоевъ сложной стѣны и обратно пропорціонально суммѣ отношеній толщинъ слоевъ къ соответствующимъ коэффиціентамъ внутренней теплопроводности.

## Г Л А В А II.

### Всеобщій коэффиціентъ теплопередачи $K$ и формы его выраженія въ частныхъ случаяхъ.

#### I. Выводъ формулы для всеобщаго коэффиціента теплопередачи $K$ .

Положимъ имѣется представленная на черт. № 4-й однородная вертикальная стѣна  $AB$ , толщины  $e$ ; обозначимъ черезъ  $T_1$ ,  $t$ —ру воздуха и твердыхъ предметовъ съ лѣвой стороны стѣны, т.е. со стороны поверхности  $AA$ ; пусть  $t$ —ра самой поверхности  $AA$  обозначена черезъ  $T$ ;  $t$ —ра внѣшней поверхности  $BB$  черезъ  $t$ , а  $t$ —ра воздуха со стороны поверхности  $BB$  положимъ, обозначена черезъ  $t_0$ , причеъ  $t_0 < T_1$ . При заданныхъ условияхъ необходимо должно возникнуть и продолжаться движеніе тепла изъ пространства  $t$ —ры  $T_1$  въ среду низшей  $t$ —ры  $t_0$  черезъ раздѣляющую эти среды однородную стѣнку  $AB$ , толщиной  $e$ .



Процессъ движенія или распространенія тепла очевидно будетъ продолжаться все время въ теченіе котораго будетъ поддерживаться постоянство  $t$ —ръ  $T_1$  и  $t_0$  т. е. пока будетъ существовать отличная отъ нуля разность  $t$ —ръ  $(T_1 - t_0)$ .

Въ случаѣ, когда  $T_1 - t_0 = \text{const}$  въ теченіе любого проме-

межутка времени, очевидно, имѣемъ періодъ установившагося дѣйствія или періодъ инерціи.

Процессъ движенія тепла будетъ состоять изъ трехъ отдѣльныхъ и послѣдовательныхъ процессовъ:

а) *Воспріятія или поглощенія* тепла изъ среды т-ры  $T_1$  поверхностью  $\overline{AA}$  стѣнки, т-ра которой  $T$  должна быть все время ниже т-ры  $T_1$ .

б) *Процесса проведенія* теплоты сквозь толщу  $e$  стѣны  $\overline{AB}$  отъ поверхности  $\overline{AA}$  т-ры  $T$  къ поверхности  $\overline{BB}$  т-ры  $t$  низшей, чѣмъ  $T$ ;

в) *Отдачи или изліянія* теплоты поверхностью  $\overline{BB}$  т-ры  $t$  средѣ т-ры  $t_0$ , низшей чѣмъ т-ра поверхности  $t$ .

Изъ самой сущности понятія о періодѣ инерціи слѣдуетъ, что количества *поглощенной, проведенной и отданной* теплоты между собою равны.

Разсматриваемое сложное явленіе носить названіе *передачи теплоты* и представляетъ совокупность разсмотрѣнныхъ уже нами явленій *поглощенія теплоты, проводимости и охлажденія*.

Теперь надлежитъ выразить математически зависимость между этими тремя отдѣльными непрерывно протекающими процессами.

1) *Воспріятіе или поглощеніе* теплоты совершается совмѣстно путемъ соприкосновенія частицъ болѣе теплой среды т-ры  $T_1$  съ поверхностью стѣны  $\overline{AA}$  т-ры  $T$  и путемъ лучеиспусканія; поэтому, въ общемъ случаѣ этотъ процессъ можетъ быть выраженъ ур-ніемъ:

$$N = Q_1 [T_1 - T] \dots \dots \dots (1)$$

гдѣ:  $Q_1$  вообще сложный коэффициентъ, различныя формы выраженій котораго завясятъ отъ частныхъ условій.

2) *Проведеніе того же количества* теплоты  $N$  сквозь толщу  $e$  однородной стѣнки  $\overline{AB}$  на основаніи законовъ теплопроводности выразится зависимостью:

$$N = \frac{\lambda}{e} [T - t] \dots \dots \dots (2)$$

3) Наконецъ, процессъ *отдачи того же количества* теплоты  $N$  поверхностью  $\overline{BB}$  выражаемъ ур-ніемъ:

$$N = Q_2 [t - t_0] \dots \dots \dots (3)$$

**Примѣчаніе:** Сложные коэффициенты тепловоспріятія  $Q_1$  и теплоизліянія  $Q_2$  въ ур-ніяхъ (1) и (3) вообще не одинаковы, такъ какъ въ нихъ входятъ величины, характеризующія форму, родъ и особенно *состояніе* поверхностей, на примѣръ: внутренняя поверхность  $\overline{AA}$  можетъ быть сухою, тогда какъ внѣшняя  $\overline{BB}$  — влажною; это сейчасъ же отражается на величинѣ коэффициентовъ лучеиспусканія  $k_2$ , входящихъ въ выраженія для  $Q_1$  и  $Q_2$ ; поверхность  $\overline{AA}$  можетъ быть окрашена масляною краскою, поверхность же  $\overline{BB}$  обѣлена известью и т. д.,

наконецъ, одна изъ поверхностей можетъ быть плоскостью, а другая нѣкоторой криволинейной поверхностью и проч.

Рѣшая каждое изъ 3-хъ ур-ній относительно разности т-ръ, получаемъ:

$$\left. \begin{aligned} T_1 - T &= N \frac{1}{Q_1}; \\ T - t &= N \frac{e}{\lambda}; \\ t - t_0 &= N \frac{1}{Q_2}; \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

складывая почленно всѣ три ур-нія системы (4), находимъ:

$$T_1 - t_0 = N \left[ \frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q_2} \right] \dots \dots \dots (5)$$

ур-ніе (5) будучи рѣшено относительно искомага N, доставляетъ:

$$N = \frac{T_1 - t_0}{\left[ \frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q_2} \right]} \dots \dots \dots (6)$$

ур-ніе (6) показываетъ, что количество теплоты переходящей въ ед-цу времени черезъ единицу поверхности изъ среды высшей температуры  $T_1$  въ среду низшей температуры  $t_0$  черезъ толщѣ раздѣлительной стѣнки  $e$  прямо пропорціоально разности т-ръ обѣихъ срединъ и обратно пропорціоально суммѣ трехъ дробей въ знаменатель; первый и послѣдніе дробные члены этой суммы представляютъ ед-цу дѣленную на коэффициентъ воспріятія  $Q_1$  и отдачи  $Q_2$  теплоты, а средній есть величина обратная внутренней теплопроводности  $\xi$ .

При разности т-ръ  $T_1 - t_0 =$  единицѣ

$$N = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q_2}} = K \dots \dots \dots (7)$$

величина N представляетъ количество теплоты, переходящее изъ среды высшей т-ры въ среду низшей т-ры черезъ ед-цу поверхности раздѣлительной стѣнки толщины  $e$  въ ед-цу времени при разности т-ръ въ 1°С.

Эту величину называютъ *всеобщимъ коэффициентомъ теплопередачи* и обозначаютъ черезъ  $K$ .

Изъ выраженія

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q_2}} = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{\xi} + \frac{1}{Q_2}} \dots \dots \dots (8)$$

видно, что всеобщій коэффициентъ теплопередачи  $K$  является линейной

функціей трехъ основныхъ коэффициентовъ поглощенія, проведенія и отдачи теплоты, т.-е. что:

$$K = F(Q_1, \xi_1, Q_2) \dots \dots \dots (9)$$

видъ функціи опредѣляется ур-ніемъ (8)-мъ.

**II. Случай воздушнаго прослойка въ сложной вертикальной стѣнкѣ.**

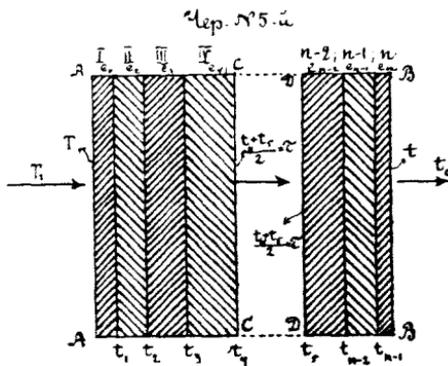
Найденное выше выраженіе для всеобщаго коэффициента теплопередачи  $K$  въ случаѣ сложной стѣнки, состоящей вообще изъ  $n$  соприкасающихся разнородныхъ по матеріалу и не одинаковыхъ по толщинѣ слоевъ принимаетъ видъ:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{Q_2}}$$

и показываетъ, что въ этихъ случаяхъ въ знаменатель выраженія члены вида  $\frac{e}{\lambda}$ , характеризующіе проводимость слоевъ, входятъ слагаемымъ столько разъ, сколько имѣется различныхъ слоевъ; членовъ же вида  $\frac{1}{Q}$ , выражающихъ вліяніе воспріятія и отдачи теплоты въ общемъ случаѣ соприкосновеніемъ и лучеиспусканіемъ совмѣстно, всегда только два, по числу внѣшнихъ поглощающихъ и отдающихъ теплоту поверхностей крайнихъ слоевъ.

Исключеніемъ изъ этого правила является тотъ случай, когда, кромѣ  $n$  твердыхъ слоевъ въ вертикальной сложной стѣнкѣ имѣются одинъ или нѣсколько воздушныхъ прослоекъ.

Положимъ, имѣется вертикальная раздѣлительная стѣнка  $\overline{AB}$ , состоящая изъ  $n$  твердыхъ слоевъ и одного воздушнаго прослойка, какъ показано на черт. № 5-й.



При данныхъ на чертежѣ обозначеніяхъ и при условіи  $T_1 > T_0$  для количества теплоты  $N$ , воспринимаемаго въ ед-цу времени ед-цей поверхности  $\overline{AA}$  отъ среды т-ры  $T_1$  соприкосновеніемъ и лучеиспусканіемъ въ періодъ установившагося дѣйствія, можемъ написать выраженіе:

$$N = Q_1 (T_1 - T) \dots \dots (a)$$

гдѣ черезъ  $Q_1$  обозначенъ сложный коэффициентъ тепловоспріятія соприкосновеніемъ и лучеиспусканіемъ, выражаемый въ общемъ случаѣ суммою:

$$Q_1 = k'_1 + k'_2;$$

далѣе, для количествъ теплоты  $N$ , проводимыхъ въ ед-цу времени сквозь толщѣ твердыхъ соприкасающихся слоевъ, черезъ ед-цу поверхности каждаго слоя, для того же періода инерціи составляемъ послѣдовательно выраженія:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для I-го слоя: } N = \frac{\lambda_1}{e_1} (T - t_1) \\ \text{» II-го » } N = \frac{\lambda_2}{e_2} (t_1 - t_2) \\ \text{» III-го » } N = \frac{\lambda_3}{e_3} (t_2 - t_3) \\ \text{» IV-го » } N = \frac{\lambda_4}{e_4} (t_3 - t_4) \end{array} \right\} \dots \dots \dots (b)$$

Слѣдующій слой  $\overline{CD}$  наполненъ воздухомъ. Если бы, во-первыхъ воздухъ не былъ тепло-прозраченъ, т. е. если бы онъ былъ неспособенъ передавать лучистую теплоту отъ поверхности  $\overline{CC}$  на поверхность  $\overline{DD}$  и если бы, во-вторыхъ, воздухъ въ прослойкѣ могъ находится въ абсолютномъ покоѣ, то способы и условія передачи теплоты отъ поверхности  $\overline{CC}$  черезъ воздушный слой къ поверхности  $\overline{DD}$  рѣшительно ничѣмъ не отличались бы отъ тѣхъ, при которыхъ передаютъ теплоту другъ другу твердые соприкасающіеся слои сложной стѣнки. Разница оказалась бы только въ количествѣ передаваемой въ ед-цу времени теплоты, что зависитъ отъ незначительной способности сухого неподвижнаго воздуха проводить теплоту, такъ какъ для него коэффициентъ внутренней теплопроводности найденъ весьма малымъ и измѣняющимся въ узкихъ предѣлахъ отъ  $\lambda=0,02$  до  $\lambda=0,04$ .

Въ дѣйствительности оба указанная условія не могутъ выполняться, такъ какъ воздухъ въ прослойкѣ не находится и не можетъ находится въ покоѣ: частицы тонкаго воздушнаго слоя, прилегающаго къ болѣе холодной поверхности  $\overline{DD}$  т-ры  $t_2$  сами охлаждаются и, становясь тяжелѣе, стремятся опуститься внизъ вдоль этой поверхности, образуя непрерывный нисходящій потокъ; подъ напоромъ этого потока частицы болѣе теплаго тонкаго слоя воздуха соприкасающіяся съ поверхностью  $\overline{CC}$  болѣе высокой т-ры  $t_1$ , какъ болѣе легкія, стремятся подняться вверхъ, скользя вдоль этой поверхности и образуя теплый восходящій потокъ.

Легко видѣть, что при такой непрерывной циркуляціи воздуха въ прослойкѣ, продолжающейся до тѣхъ поръ пока т-ры  $t_1$  и  $t_2$  не равны другъ другу, частицы восходящаго потока, воспринимая теплоту соприкосновеніемъ съ поверхностью  $\overline{CC}$ , переносятъ ее на поверхность  $\overline{DD}$  при обратномъ нисходящемъ теченіи вдоль этой послѣдней поверхности.

Описанный характеръ движенія воздуха въ прослойкѣ даетъ намъ право полагать его среднюю т-ру равною средней ариѳметической изъ т-ръ  $t_1$  и  $t_2$  поверхностей  $\overline{CC}$  и  $\overline{DD}$ .

Обозначимъ эту среднюю т-ру черезъ  $\tau = \frac{t_4 + t_5}{2}$  и найдемъ выражение для количества теплоты  $n_1$  отдаваемой въ ед-цу времени единицей поверхности  $\overline{CC}$  воздуху черезъ соприкосновение съ нимъ; обозначивъ черезъ  $k_1'''$  коэффициентъ теплопередачи соприкосновениемъ для данного случая, можемъ написать выражение:

$$n_1 = k_1''' \left( t_4 - \frac{t_4 + t_5}{2} \right) = k_1''' (t_4 - \tau);$$

кромѣ того, сухой воздухъ почти абсолютно теплопрозраченъ и, слѣдовательно, въ высокой степени способенъ передавать теплоту испускаемую поверхностью  $\overline{CC}$  въ направлении поверхности  $\overline{DD}$ .

Обозначивъ количество теплоты, излучаемой въ ед-цу времени ед-цей поверхности  $\overline{CC}$ , черезъ  $n_2$  и зная, что оно приблизительно пропорціонально разности т-ръ  $(t_4 - t_5)$  можемъ написать:

$$n_2 = k_2''' (t_4 - t_5),$$

гдѣ  $k_2'''$ —коэффициентъ теплоотдачи лучеиспусканиемъ для поверхности  $\overline{CC}$ .

Въ условіяхъ установившагося дѣйствія сумма  $n_1 + n_2$ , очевидно должна быть равна  $N$ , поэтому для количества теплоты отдаваемого воздуху въ ед-цу времени ед-цей поверхности  $\overline{CC}$  можемъ составить выражение:

$$N = n_1 + n_2 = k_1''' \left( t_4 - \frac{t_4 + t_5}{2} \right) + k_2''' (t_4 - t_5);$$

преобразуемъ это выражение, имѣя въ виду, что:

$$t_4 - \tau = t_4 - \frac{t_4 + t_5}{2} = \frac{t_4 - t_5}{2}$$

и что, слѣдовательно,

$$t_4 - t_5 = 2 (t_4 - \tau);$$

подставляя значенія

$$(t_4 - t_5) \text{ и } \frac{(t_4 - t_5)}{2}$$

въ предыдущее выражение для  $N$ , имѣемъ:

$$N = n_1 + n_2 = k_1''' (t_4 - \tau) + k_2''' 2 (t_4 - \tau)$$

или окончательно:

$$N = (k_1''' + 2 k_2''') (t_4 - \tau);$$

замѣчая, что по составу послѣднее выражение аналогично выраженію (а) можемъ, положивъ:

$$k_1''' + 2 k_2''' = Q_3,$$

представить его въ общей формѣ:

$$N = Q_3 (t_4 - \tau) \dots \dots \dots (c)$$

Точно также для количества теплоты  $n_1$  воспринимаемого ед-цей поверхности  $\overline{DD}$  соприкосновениемъ съ воздухомъ можемъ написать выражение

$$n_1 = k_1 \overset{IV}{\smile} \left( \frac{t_4 + t_5}{2} - t_5 \right) = k_1 \overset{IV}{\smile} (\tau - t_5);$$

а для тепловоспріятія лучепоглошеніемъ:

$$n_2 = k_2 \overset{IV}{\smile} (t_4 - t_5)$$

Сумма послѣднихъ двухъ выраженій, очевидно, должна быть равна  $N$  для періода инерціи, поэтому:

$$N = n_1 + n_2 = k_1 \overset{IV}{\smile} \left( \frac{t_4 + t_5}{2} - t_5 \right) + k_2 \overset{IV}{\smile} (t_4 - t_5)$$

но такъ какъ:

$$\tau - t_5 = \frac{t_4 + t_5}{2} - t_5 = \frac{t_4 - t_5}{2},$$

то:

$$t_4 - t_5 = 2 (\tau - t_5)$$

и, слѣдовательно:

$$N = n_1 + n_2 = k_1 \overset{IV}{\smile} (\tau - t_5) + k_2 \overset{IV}{\smile} 2 (\tau - t_5)$$

или, окончательно,

$$N = (k_1 \overset{IV}{\smile} + 2 k_2 \overset{IV}{\smile}) (\tau - t_5)$$

Или, положивъ, аналогично выраженію (с)

$$k_1 \overset{IV}{\smile} + 2 k_2 \overset{IV}{\smile} = Q_1, \text{ можемъ представить послѣднее выраженіе въ формѣ}$$

$$N = Q_1 (\tau - t_5) \dots \dots \dots (d).$$

Послѣдующіе слои твердые и для нихъ справедливы выраженія вида:

для V-го слоя:	« $N = \frac{\lambda_5}{e_5} (t_5 - t_6);$	}	
» VI-го	« $N = \frac{\lambda_6}{e_6} (t_6 - t_7);$		
.....	.....		
.....	.....		
.....	.....		
для (n-1)-го	« $N = \frac{\lambda_{n-1}}{e_{n-1}} (t_{n-2} - t_{n-1})$	}	
« (n) го	« $N = \frac{\lambda_n}{e_n} (t_{n-1} - t)$		

..... (e)

Наконецъ, для количества теплоты, отдаваемой соприкосновениемъ и лучеиспусканиемъ въ ед-цу времени ед-цей поверхности  $\overline{BB}$ , аналогично выраженію (а) имѣемъ равенство:

$$N = Q_2 (t - t_0) \dots \dots \dots (f)$$

гдѣ:

$$Q_2 = k_1'' + k_2'',$$

т.-е.  $Q_2$  равно суммѣ коэффициентовъ теплоотдачи соприкосновениемъ и лучеиспусканиемъ для поверхности  $\overline{BB}$ .

Рѣшая относительно разностей т-рѣ выраженія отъ (а) до (f), получаемъ рядъ равенствъ:

$$\left. \begin{aligned}
 T_1 - T &= N \frac{1}{Q_1}; \\
 T - t_1 &= N \frac{e_1}{\lambda_1} \\
 t_1 - t_2 &= N \frac{e_2}{\lambda_2} \\
 t_2 - t_3 &= N \frac{e_3}{\lambda_3} \\
 t_3 - t_4 &= N \frac{e_4}{\lambda_4} \\
 t_4 - \tau &= N \frac{1}{Q_3} \\
 \tau - t_5 &= N \frac{1}{Q_4} \\
 t_5 - t_6 &= N \frac{e_5}{\lambda_5} \\
 &\dots \dots \dots \\
 t_{n-2} - t_{n-1} &= N \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} \\
 t_{n-1} - t &= N \frac{e_n}{\lambda_n} \\
 t - t_0 &= N \frac{1}{Q_2}
 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (k)$$

Складывая почленно ур—нія системы (k) и рѣшая, затѣмъ, относительно N находимъ:

$$T_1 - t_0 = N \left[ \frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} + \dots + \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{Q_2} \right]$$

откуда, наконецъ:

$$N = (T_1 - t_0) \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} + \dots + \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{Q_2}} \quad (e)$$

При  $T_1 - t_0 = 1$ -цѣ, второй членъ второй части ур—нія (e) представляетъ собою выраженіе всеобщаго коэффициента теплопередачи K для данного случая, т. е.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} + \dots + \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{Q_2}} \quad (I)$$

Переставивъ члены суммы въ знаменателѣ выраженія (I) имѣемъ:

$$K = \frac{1}{\left( \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} \right) + \left( \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} \right) + \left( \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + \frac{e_n}{\lambda_n} \right)} \quad (II)$$

Выражение (II) дает право сдѣлать тотъ выводъ, что въ случаѣ сложной стѣнки изъ  $n$  твердыхъ слоевъ и одного воздушнаго прослойка въ знаменателѣ выраженія для  $K$ , кромѣ  $n$  членовъ вида  $\frac{e}{\lambda}$  и пары членовъ  $\frac{1}{Q_1}$  и  $\frac{1}{Q_2}$  входитъ еще пара членовъ  $(\frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4})$ , характеризующихъ вліяніе присутствія воздушнаго прослойка.

Не трудно, поэтому, безъ всякихъ промежуточныхъ вычисленій записать выраженіе и для самаго общаго случая, когда, кромѣ  $n$  твердыхъ слоевъ въ составѣ сложной стѣнки имѣются еще  $m$  воздушныхъ прослоекъ, именно:

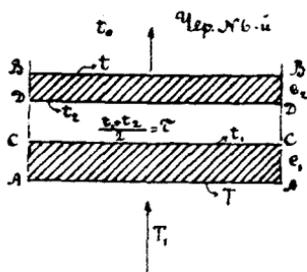
$$K = \frac{1}{\underbrace{\left(\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2}\right)}_{\text{два члена.}} + \underbrace{\left[\left(\frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4}\right) + \left(\frac{1}{Q_5} + \frac{1}{Q_6}\right) + \dots + \left(\frac{1}{Q_{3(m)}} + \frac{1}{Q_{4(m)}}\right)\right]}_{m \text{ парь членовъ.}} + \underbrace{\left[\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + \frac{e_n}{\lambda_n}\right]}_{n \text{ членовъ.}} \dots \dots \dots \text{(III)}$$

**III. Случай воздушнаго прослойка въ системѣ горизонтальныхъ соприкасающихся слоевъ.**

а) Передача теплоты снизу вверхъ.

Положимъ даны (см. черт. № 6-й) два разнородные горизонтальные слоя, раздѣленные воздушнымъ прослойкомъ.

Обозначимъ, какъ показано на чертежѣ,  $t$ —ру среды со стороны внѣшней поверхности нижняго твердаго слоя черезъ  $T_1$ ,  $t$ —ру поверхности  $AA$  черезъ  $T$ ,  $t$ —ры поверхностей  $CC$  и  $DD$ , обращенныхъ въ прослойкъ, черезъ  $t_1$  и  $t_2$  соотвѣтственно,  $t$ —ру внѣшней поверхности  $BB$  наружнаго слоя—черезъ  $t$  и  $t$ —ру внѣшней среды—черезъ  $t_0$ .



Легко видѣть, что въ данномъ случаѣ въ воздушномъ прослойкѣ должно происходить движеніе воздуха, слѣдовательно передача теплоты въ прослойкѣ и здѣсь будетъ происходить не путемъ проведенія, а лучеиспусканіемъ и перенесеніемъ черезъ соприкосновеніе съ циркулирующимъ воздухомъ, слѣдовательно, по аналогіи съ предыдущимъ случаемъ, можемъ составить для  $K$  слѣдующее выраженіе:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{Q_2}} \dots \dots \dots \text{(IV)}$$

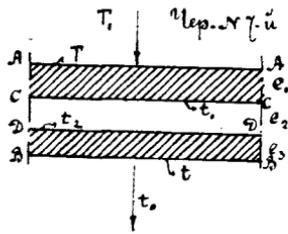
гдѣ значенія коэффициентов  $Q_1, Q_2, Q_3,$  и  $Q_4$  совершенно аналогичны съ ихъ значеніями въ предыдущихъ формулахъ.

Въ общемъ случаѣ при  $n$  твердыхъ слоевъ и при  $m$  прослойкахъ воздуха выраженіе для  $K$  совершенно одинаково съ выраженіемъ III-мъ.

в) Передача теплоты сверху внизъ.

Разсмотримъ еще систему, состоящую изъ двухъ твердыхъ горизонтальныхъ слоевъ раздѣленныхъ воздушнымъ прослойкомъ, при чемъ болѣе теплый воздухъ (см. черт. 7-й) находится надъ поверхностью  $\overline{AA}$  т-ры  $T$ , болѣе же холодный т-ры  $t_0$  снизу подъ поверхностью  $\overline{BB}$  нижняго слоя.

Въ этомъ случаѣ нельзя разсчитывать на движеніе частицъ воздуха въ прослойкѣ въ вертикальномъ направленіи, такъ какъ частицы слоя



теплаго воздуха, прилегающія къ болѣе нагрѣтой поверхности  $\overline{CC}$ , какъ болѣе легкія, стремятся пребывать у этой поверхности точно такъ же, какъ и болѣе холодныя частицы у слоя  $\overline{DD}$ , какъ болѣе тяжелыя, не могутъ подниматься вверхъ; слѣдовательно въ этихъ условіяхъ не слѣдуетъ разсчитывать на переносъ теплоты соприкосновеніемъ; передача эта здѣсь должна совершаться путемъ теплопроводности и лучеиспусканія. На этомъ основаніи при обозначеніяхъ данныхъ на чертежѣ, имѣемъ, послѣдовательно:

передача эта здѣсь должна совершаться путемъ теплопроводности и лучеиспусканія. На этомъ основаніи при обозначеніяхъ данныхъ на чертежѣ, имѣемъ, послѣдовательно:

$$N = Q_1 (T_1 - T);$$

$$N = \frac{\lambda_1}{e_1} (T - t_1)$$

$$N = \frac{\lambda_2}{e_2} (t_1 - t_2) + Q_3 (t_1 - t_2) + Q_4 (t_1 - t_2) \dots (a)$$

$$N = \frac{\lambda_3}{e_3} (t_2 - t)$$

$$N = Q_2 (t - t_0)$$

гдѣ:

$$Q_3 = k_2''' \text{ и } Q_4 = k_2''''$$

откуда:

$$N = (T_1 - t_0) \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{1}{Q_2}} \dots (b)$$

наконецъ:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{1}{Q_2}} \dots (IV)$$

Выраженіе (IV) показываетъ, что въ случаѣ передачи теплоты сверху внизъ черезъ систему  $n$  разнородныхъ слоевъ, въ числѣ кото-

рых имѣются и воздушные прослойки, въ выраженіи для К число членовъ вида  $\frac{e}{\lambda}$  равно полному числу слоевъ, включая и воздушные прослойки, членовъ вида  $\frac{1}{Q}$  только два—соотвѣтственно числу внѣшнихъ тепло-воспринимающей и теплоотдающей поверхностей и членовъ  $\left(\frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4}\right)$  столько, сколько прослойковъ воздуха. Въ общемъ случаѣ и слоевъ выраженіе для К имѣетъ видъ:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \left(\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_{n-1}}{\lambda_{n-1}} + \frac{e_n}{\lambda_n}\right) + \left(\frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4}\right)} \quad (V)$$

Подъ случай (а) подходят условія передачи теплоты черезъ горизонтальныя и вообще верхнія двухъ-и многослойныя свѣтловыя покрытія и потолочныя конструкціи.

Случаю (б) соотвѣтствуетъ теплопередача черезъ полы при болѣе холодномъ подпольи подвальномъ или вообще ниже расположенномъ этажѣ здания.

Положивъ, что во всѣхъ выше разсмотрѣнныхъ случаяхъ т-ры поверхностей слоевъ на всемъ ихъ протяженіи во всѣхъ направленіяхъ и точкахъ остаются величинами постоянными для данной поверхности, можемъ воспользоваться общими выраженіями для К въ цѣляхъ отысканія значеній его въ частныхъ случаяхъ различныхъ строительныхъ конструкцій.

#### IV. Выраженіе всеобщаго коэффициента теплопередачи К для вертикальныхъ оконныхъ рамъ и горизонтальныхъ свѣтловыхъ покрытій.

##### 1) Рамы съ одиночнымъ застенченіемъ (черт. № 8-й).

Одиночное застекленіе представляетъ случай простой раздѣлительной стѣнки; при данныхъ на чертежѣ обозначеніяхъ, общее выраженіе для всеобщаго коэффициента теплопередачи имѣетъ видъ:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q_2}} \quad (1)$$

Въ выраженіи (1) сложные коэффициенты тепло-воспріятія  $Q_1$  и теплоизліянія выражаются по Ньютону черезъ:

$$Q_1 = k_1' + k_2' \text{ и } Q_2 = k_1'' + k_2'',$$

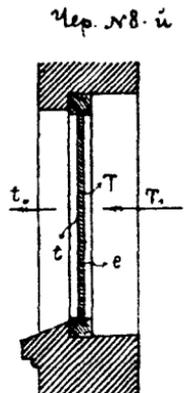
если температурныя разности  $(T_1 - T)$  и  $(t - t_0)$  не превосходятъ  $5^\circ\text{C}$ .

Въ тѣхъ же случаяхъ, когда эти разности отличаются отъ указанного максимум'а, ихъ слѣдуетъ выразить по формулѣ Пекле:

$$Q_1 = (k_1' + k_2') + (0,0075 k_1' + 0,0056 k_2') (T_1 - T)$$

и

$$Q_2 = (k_1'' + k_2'') + (0,0075 k_1'' + 0,0056 k_2'') (t - t_0)$$



Что касается численных значений величин коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи соприкосновением  $k_1'$  и  $k_1''$ , то они зависят от состояния соприкасающейся среды.

При одиночном застеклении и низкой (расчетной) наружной  $t_r$ , комнатный воздух в слое, прилегающем к одиночному стеклу, будет значительно охлаждаться и падать вниз вдоль стекла, образуя нисходящие токи. При столь энергичном движении воздуха следует полагать коэффициент  $k_1' = 5$ -ти; предполагая далее, что свободный наружный воздух находится в более подвижном состоянии, чем комнатный, приходится считать для наружной поверхности стекла  $k_1'' = 6$ -ти.

При выборе и назначении коэффициентов лучеиспускания и лучепоглощения было бы ошибкою принять для внутренней (со стороны помещения) поверхности  $k_2' = 2,91$ ; При одиночном застеклении внутренняя поверхность стекла покрыта влагою, по причине конденсации водяных паров в комнатном воздухе в слое соприкасающемся с холодным стеклом, при чем  $t_r$  этого слоя падает до  $t_p$  ожигения паров.

Лучеиспускательная и лучепоглощательная способность мокрого стекла близка к таковой же для воды, поэтому правильнее в этом случае полагать:  $k_2' = 5,30$ ; для внешней же обычно сухой поверхности стекла, принимать  $k_2'' = 2,91$ ; При  $\lambda$  изменяющемся для стекла в пределах от 0,75 до 0,88, можно полагать в среднем  $\lambda = 0,80$ ; оставляя для толщины стекла прежнее обозначение через  $e$ , можем составить общее выражение для отыскания значения  $K$  для одиночных застеклений любой толщины, именно:

а) При разностях  $t_r$ -р ( $T_1 - T$ ) и ( $t - t_p$ ) не больших  $5^\circ\text{C}$  имеем:

$$Q_1 = k_1' + k_2' = 5 + 5,30 = 10,30;$$

$$Q_2 = k_1'' + k_2'' = 6 + 2,91 = 8,91;$$

поэтому:

$$K' = \frac{1}{\frac{1}{10,30} + \frac{e}{0,80} + \frac{1}{8,91}} = \frac{1}{0,097 + \frac{e}{0,80} + 0,112}; \dots (2)$$

Подставляя в выражение (2) заданную толщину стекла в  $\text{mtr}$ 'ах, можем найти и численное значение для  $K$ .

б) При разностях  $t_r$ -р ( $T_1 - T$ ) и ( $t - t_p$ ), превышающих  $5^\circ\text{C}$ . после подстановления частных коэффициентов в формулу Пекле, имеем:

$$Q_1 = 5 + 5,30 + (0,0075 \times 5 + 0,0056 \times 5,30) (T_1 - T);$$

и

$$Q_2 = 6 + 2,91 + (0,0075 \times 6 + 0,0056 \times 2,91) (t - t_p)$$

Что доставляет:

$$Q_1 = 10,30 + 0,067 (T_1 - T)$$

и

$$Q_2 = 8,91 + 0,061 (t - t_p)$$

въ этомъ случаѣ коэффициенты  $Q_1$  и  $Q_2$  являются функциями неизвѣстныхъ еще температурныхъ разностей.

Проф. Ритшель для упрощенія вычисленій предложилъ считать, что при наружной т-рѣ  $t_0 = -20^\circ\text{C}$ . и т-рѣ помѣшеній  $T_1 = +20^\circ\text{C}$ . т.-е. при  $T_1 - t_0 = 40^\circ\text{C}$ . для одиночныхъ застекленій  $T_1 - T = t - t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Въ виду того, что, въ нашихъ климатическихъ условіяхъ расчетная разность т-рѣ считается нормально:

$$T_1 - t_0 = 20 - (-30) = 50^\circ\text{C}.$$

и доходить до

$$T_1 - t^0 = 55^\circ \text{ и даже до } 60^\circ\text{C}.$$

Приведеннымъ указаніемъ слѣдуетъ пользоваться съ осторожностью. Для той же пѣли назначенія температурныхъ разностей въ формулѣ Пекле В. М. Чаплинымъ предложена эмпирическая формула, ставящая эту разность въ зависимость отъ приближеннаго значенія  $K'$ , вычисленнаго по формуламъ Ньютона и отъ расчетной разности т-рѣ срединъ  $T_1$  и  $t_0$  именно:

$$T_1 - T = t - t_0 = 0,1 K' (T_1 - t_0) \dots \dots \dots (3)$$

Пользованіе этой формулой и дальнѣйшій ходъ вычисленій ясны:

При заданныхъ  $T_1$ ,  $t_0$  и  $e$  вычисляется по ур-нію (2) приближенное значеніе  $K'$  (не принимая во вниманіе зависимости отъ температурной разности коэффициентовъ  $Q_1$  и  $Q_2$ ; затѣмъ, изъ ур-нія (3) вычисляются разности  $T_1 - T = t - t_0$  и значенія ихъ подставляются въ формулы Пекле. По этимъ формуламъ находятъ  $Q_1$  и  $Q_2$  и новыя исправленныя ихъ значенія подставляются въ общее ур-ніе (1), откуда и находится уже точное значеніе  $K'$ . Для поясненія приведеннаго хода расчета достаточно одного численнаго примѣра.

**Численный примѣръ № 1-й.**

$$T_1 = +20^\circ\text{C}. \quad t_0 = -30^\circ\text{C}. \quad e = 0,002 \text{ mtr.}$$

Остальныя численныя величины даны выше. Пренебрегая временно вліяніемъ температурныхъ разностей ( $T_1 - T$ ) и ( $t - t_0$ ), находимъ при заданной толщинѣ стекла  $e = 0,002 \text{ mtr.}$  и формулѣ (2) приближенное значеніе:

$$K' = \frac{1}{0,097 + \frac{0,002}{0,80} + 0,112} + 4,70;$$

что по подстановленіи въ формулу (3) доставляетъ:

$$T_1 - T = t - t_0 = 0,10 \times 4,70 [20 - (-30)] = 5 K' = 5 \times 4,70 = 23,50^\circ\text{C}.$$

(Что превосходитъ норму предложенную проф. Риштелемъ): дальше,

По формуламъ Пекле:

$$Q_1 = 10,30 + 0,067 \times 23,50 = 11,90;$$

$$Q_2 = 8,91 + 0,061 \times 23,50 = 10,40;$$

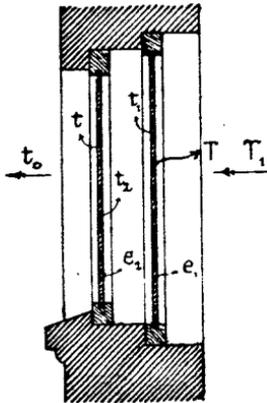
и, наконец по формулѣ (1):

$$K'' = \frac{1}{\frac{1}{11,90} + \frac{0,002}{0,80} + \frac{1}{10,40}} = 5,50 \text{ Cal/mtr}^2 \text{ въ час.}, \text{ въ русскихъ мѣ-}$$

рахъ это составить съ 1 кв. саж. въ часть:  $K'' = 5,50 \times 11,08 = 60,94$  д./ц. ед. т.

2) Случай двойныхъ (лѣтняго и зимняго) оконныхъ переплетовъ. (Черт. № 7).

Черт. № 9-й



Общее выраженіе для K въ этомъ случаѣ:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{Q_2}} \dots (4).$$

Гдѣ, по прежнему:

$Q_1 = k_1' + k_2'$ ; при чемъ надо имѣть въ виду, что при двойныхъ оконныхъ рамахъ нисходящіе токи при движеніи охлаждающагося у поверхности внутренняго стекла комнатнаго воздуха гораздо слабѣе, чѣмъ при одиночномъ застекленіи; на этомъ основаніи принимаемъ  $k_1' = 4$ -мъ; внутренняя поверхность зимняго стекла въ этомъ случаѣ, вообще говоря, не должна покрываться влагою, поэтому:  $k_2' = 2,91$  (какъ для сухого стекла). Для внѣшней поверхности наружнаго стекла какъ и раньше:

$$k_1'' = 6 \text{ и } k_2'' = 2,91;$$

воздухъ въ междурамномъ пространствѣ находится въ состояніи большей подвижности, чѣмъ комнатный, и въ меньшей, чѣмъ наружный, поэтому въ выраженіяхъ для  $Q_3 = k_1''' + 2k_2'''$  и  $Q_4 = k_1'''' + 2k_2''''$  полагаемъ:

$$k_1''' = k_1'''' = 5\text{-ти},$$

а для сухихъ поверхностей стеклъ, обращенныхъ въ междурамное пространство,  $k_2''' = k_2'''' = 2,91$ ; слѣдовательно:  $Q_3 = Q_4 = k_1''' + 2k_2''' = k_1'''' + 2k_2'''' = 5 + 2 \times 2,91 = 10,82$ .

При этихъ данныхъ по формулѣ Ньютона имѣемъ приближенно:

$$K' = \frac{1}{\frac{1}{4+2,91} + \frac{e_1}{0,80} + \frac{1}{(5+2 \times 2,91)} + \frac{1}{(5+2 \times 2,91)} + \frac{e_2}{0,80} + \frac{1}{6+2,91}} = \frac{1}{6,91 + \frac{e_1+e_2}{0,80} + \frac{2}{10,82} + \frac{1}{8,91}}$$

положивъ  $e_1 = e_2 = 0,002$  mtr., найдемъ:

$$K' = \frac{1}{0,145 + 0,005 + 0,185 + 0,112} = \frac{1}{0,447} = 2,23 \text{ Cal/mtr}^2;$$

такъ какъ и въ этомъ случаѣ температурныя разности срединъ и поверхностей будутъ превышать  $5^\circ$ , то необходимо ввести поправку,

вычислив коэффициенты  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  и  $Q_4$  по формулѣ Пекле, для чего предварительно надо задаться этими температурными разностями.

Въ этомъ случаѣ слѣдуетъ вообще руководиться указаніемъ проф. Ритшеля, который считаетъ, что при разности т-ръ  $T_1 - t_0 = 40^\circ\text{C}$ ., разности:

$$T_1 - T = t_1 - \tau = \tau - t_2 = t - t_0 = 10^\circ\text{C},$$

или же при  $T_1 - t_0$  большемъ  $40^\circ\text{C}$ . пользоваться данной выше формулой В. М. Чаплина, полагая:

$$T_1 - T = t_1 - \tau = \tau - t_2 = t - t_0 = 0,10 \text{ K}'(T_1 - t_0)$$

откуда:

$$T_1 - T = t_1 - \tau = \tau - t_2 = t - t_0 = 0,10 \times 2,23 [20 - (-30)] = 2,23 \times 5 = 11,15^\circ\text{C}.$$

При этихъ значеніяхъ температурныхъ разностей:

$$\begin{aligned} Q_1 &= k_1' + k_2' + (0,0075 k_1' + 0,0056 k_2') (T_1 - T) = \\ &= 4,00 + 2,91 + (0,0075 \times 4,00 + 0,0056 \times 2,91) 11,15 = \\ &= 6,91 + 0,51 = 7,42. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= k_1'' + k_2'' + (0,0075 k_1'' + 0,0056 k_2'') (t - t_0) = \\ &= 6,00 + 2,91 + (0,0075 \times 6 + 0,0056 \times 2,91) 11,15 = \\ &= 8,91 + 0,68 = 9,59. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_3 = Q_4 &= k_1''' + 2 k_2''' + (0,0075 k_1''' + 0,0056 \times 2 k_2''') (t_1 - \tau) = \\ &= 5 + (2 \times 2,91) + (0,0075 \times 5 + 0,0056 \times 2 \times 2,91) 11,15 = \\ &= 10,82 + (0,0375 + 0,0163) 11,15 = \\ &= 10,82 + 0,60 = 11,42. \end{aligned}$$

Поэтому:

$$\begin{aligned} K'' &= \frac{1}{\frac{1}{7,42} + \frac{0,002 \times 2}{0,80} + \frac{2}{11,42} + \frac{1}{9,59}} = \\ &= \frac{1}{0,135 + 0,005 + 0,175 + 0,104} = \frac{1}{0,420} = 2,38 \text{ Cal./mtr.}^2; \end{aligned}$$

или въ русскихъ мѣрахъ:

$K'' = 2,38 \times 11,08 = 26,37$  ф.ц. ед. т. въ часъ черезъ поверхность въ 1 кв. саж. при  $T_1 - t_0 = 1^\circ\text{C}$ .

Поправку, аналогичную поправкѣ Пекле, также въ зависимости отъ разности т-ръ среды отдающей и среды воспринимающей теплоту ( $T_1 - t_0$ ) предложилъ проф. Сальмоновичъ.

Если черезъ  $N$  обозначимъ искомую потерю тепла черезъ ед-цу поверхности двойного оконнаго переплета въ ед-цу времени при заданной разности т-ръ ( $T_1 - t_0$ ), черезъ  $K$ —всеобщій коэффициентъ теплопередачи для одиночнаго застекленія, то всеобщій коэффициентъ для двойнаго переплета  $K''$  можетъ быть вычисленъ съ помощью формулы:

$$N = K \frac{(T_1 - t_0)}{2} [1 + \alpha (T_1 - t_0)] \dots \dots \dots (5)$$

гдѣ: коэффициентъ  $\alpha$  является функцией температурной разности и берется изъ прилагаемой здѣсь таблицы:

Таблица № 10 коэффициентов  $\alpha$ .

Разность температурь $T_1 - t_0$	отъ 25° до 30°	отъ 30° до 35°	отъ 35° до 40°	отъ 40° до 45°
Значения коэффициентов $\alpha$ .	0,011; 0,010; 0,009	0,008; 0,006; 0,004	0,003; 0,002	0,001

Такъ какъ для двойного переплета вообще:  $N = K'' (T_1 - t_0)$ , то изъ сравненія съ выраженіемъ (5) можемъ получить:

$$K'' = \frac{K}{2} [1 + \alpha (T_1 - t_0)] \dots \dots \dots (6)$$

Вычисливъ по формулѣ Ньютона значеніе  $K$  для сухого одиночнаго стекла при разности т-ръ  $T_1 - t_0$  и исправивъ его съ помощью поправки Пекле, подставляемъ въ ур-ніе (6) откуда и находимъ значеніе  $K''$ .

Положимъ, напримѣръ  $T_1 - t_0 = 50^\circ\text{C}$ ; тогда для одиночнаго застекленія имѣемъ формулу:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q_2}}$$

полагая:

$$k_1' = 5;$$

$$k_2' = 2,91 \text{ (для сухой внутренней поверхности стекла).}$$

$$k_1'' = 6;$$

$$k_2'' = 2,91$$

$$e = 0,002$$

и  $\lambda = 0,80$ . При этихъ данныхъ найдемъ:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{7,91} + \frac{0,002}{0,80} + \frac{1}{8,91}} = 4,08 \text{ Cal/mtr}^2;$$

Вводя поправку Пекле, получаемъ: при  $T_1 - T = t - t_0 = 23,50^\circ\text{C}$ .

$$Q_1 = 5 + 2,91 + (0,0075 \times 5 + 0,0056 \times 2,91) \cdot 23,50 = 7,91 + 1,27 = 9,18;$$

$$Q_2 = 6 + 2,91 + (0,0075 \times 6 + 0,0056 \times 2,91) = 8,91 + 1,49 = 10,40.$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{9,18} + \frac{0,002}{0,80} + \frac{1}{10,40}} = \frac{1}{0,109 + 0,0025 + 0,096} = 4,80 \text{ Cal/mtr}^2$$

и, наконецъ, по формулѣ (6), положивъ  $\alpha = 0,001$ ; находимъ:

$$K'' = \frac{4,80}{2} [1 + 0,001 \times 50] = 2,40 (1 + 0,05) = 2,52 \text{ Cal/mtr}^2 \text{ въ часъ.}$$

### 3) Случай одиночной рамы съ двойнымъ застекленіемъ.

Для вычисленія коэффициента  $K$  въ случаѣ одиночной рамы съ двойнымъ застекленіемъ проф. Ритшель предложилъ слѣдующій способъ:

Обозначим всеобщие коэффициенты для одиночного стекла, для двойного стекла и для тела самой деревянной рамы, последовательно, через:  $K_1, K_2, K_3$ ; а искомый коэффициент для рамы с двойными стеклами—через  $X$ , примем, далее, за ед-цу общую поверхность оконного проема, т. е. сумму поверхностей застекленной части и самой рамы. Часть этой поверхности, занятую рамою, обозначим через  $m$ , и назовем еще буквою  $A$  ту часть теряемой теплоты, которая должна быть отнесена на счет неплотности оконныхъ заполненій въ стѣнахъ; при этихъ обозначеніяхъ можемъ составить слѣдующую пару уравненій:

$$\left. \begin{aligned} m. K_1 + (1 - m) K_3 + A &= K_1 \\ m. K_2 + (1 - m) K_3 + A &= X \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (a)$$

рѣшая систему ур-ній (а) относительно  $X$ , найдемъ:

$$X = K_1 - m (K_1 - K_2) \dots \dots \dots (l)$$

положивъ, для примѣра, что при заданномъ рисункѣ оконнаго переплета чистая поверхность стекляннаго заполнения оконной рамы составляетъ 0,66 полной площади оконнаго просвѣта, и обозначивъ для одиночнаго оконнаго стекла  $K_1 = 5,50$  и для двойнаго  $K_2 = 2,20$ , найдемъ по формулѣ (l)

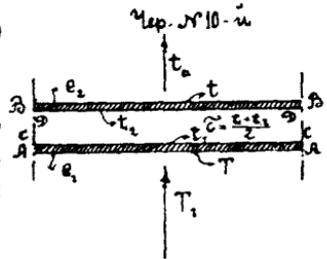
$$X = 5,50 - 0,66 (5,50 - 2,20) = 3,32 \text{ Cal.}$$

4) Горизонтальное двойное застекленіе (свѣтовой фонарь). (Черт. № 8 и).

Согласно общимъ указаніямъ, даннымъ въ пунктѣ II-мъ этой главы, выраженіе для  $K$  имѣетъ въ данномъ случаѣ видъ:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{Q_2}} \dots \dots (l)$$

при чемъ, для тепловоспріятія поверхностью  $AA$  въ выраженіи  $Q_1 = k_1' + k_2'$ , полагаемъ для комнатнаго воздуха  $k_1'$  равнымъ 4, а для сухой поверхности нижняго стекла по прежнему:  $k_2' = 2,92$ .



Для внѣшней теплоотдающей поверхности верхняго стекла  $Q_2 = k_1'' + k_2''$ , причемъ:

для подвижнаго, вообще говоря, наружнаго воздуха:  $k_1'' = 6$  и для сухой внѣшней поверхности  $k_2'' = 2,91$ .

При нѣкоторой подвижности воздуха въ междустекольномъ пространствѣ въ выраженіи сложнаго коэффициента  $Q_3 = k_1''' + k_2'''$  принимаемъ  $k_1''' = 5$ , а  $k_2''' = 2,91$ ; въ выраженіи для  $Q_4 = k_1^{IV} + k_2^{IV}$ , полагая возможнымъ неплотное закрытіе внутренней рамы и образованіе пота на внутренней поверхности болѣе холоднаго верхняго стекла:  $k_2^{IV} = 5,30$  (какъ для воды); для  $k_1^{IV}$  слѣдуетъ принять то же значеніе, что и для  $k_1''' = 5$ .

При этих цифровых данных, положив еще  $e_1 = e_2 = 0,002 \text{ mtr.}$  и зная, что  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,80$  легко найти приближенное значение  $K$  по формулѣ (I), именно:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{4+2,91} + \frac{2 \times 0,002}{0,80} + \frac{1}{5+2,91} + \frac{1}{5+5,30} + \frac{1}{6+2,91}} =$$

$$= \frac{1}{0,144 + 0,005 + 0,126 + 0,097 + 0,112} = \frac{1}{0,484} = 2,07 \text{ Cal. mtr}^2.$$

При большихъ разностяхъ  $t$ -рѣ ( $T_1 - t_0$ ) необходимо ввести поправку Пекле, опредѣливъ предварительно разности  $t$ -рѣ по формулѣ Чаплина или задаваясь ими по Ритшелю.

Въ первомъ случаѣ:

$T_1 - T = t_1 - \tau = \tau - t_2 = t - t_0 = 0,10 \text{ K}$  ( $T_1 - t_0$ ) откуда при  $T_1 = +20^\circ\text{C.}$  и  $t_0 = -30^\circ\text{C.}$  находимъ:  $T_1 - T = t_1 - \tau = \tau - t_2 = t - t_0 = 0,10 \times 2,07 \times [20 - (-30)] = 10,35^\circ\text{C.}$

Если же принять во вниманіе, что  $t$ -ра внутренняго воздуха у потолка, въ слѣбъ прилегающемъ къ свѣтовому покрытію можетъ превосходить среднюю  $t$ -ру помещенія  $T_1$  на величину мѣняющуюся въ предѣлахъ отъ  $0,5^\circ\text{C}$  до  $10^\circ\text{C}$  и положивъ въ самомъ неблагоприятномъ случаѣ  $T_1 = t + 10^\circ\text{C}$ , найдемъ болѣе надежныя значенія  $t$ -рныхъ разностей, поверхностей и срединъ равными:

$$T_1 - T = t_1 - \tau = \tau - t_2 = t - t_0 = 0,10 \times 2,07 [30 - (-30)] = 12,42^\circ\text{C.}$$

*Примѣчаніе:* Проф. Ритшель даетъ величину очень близкую къ найденной выше, полагая ее равную  $12,50^\circ\text{C.}$

Далѣе, по формулѣ Пекле:

$$Q_1 = k_1' + k_2' + (0,0075 k_1' + 0,0056 k_2') (T_1 - T) = 4 + 2,91 + (0,0075 \times 4 + 0,0056 \times 2,91) 12,42 = 6,91 + 0,58 = 7,49;$$

$$Q_3 = k_1''' + k_2''' + (0,0075 k_1''' + 0,0056 k_2''') (t_1 - \tau) = 5,00 + 2,91 + (0,0075 \times 5 + 0,0056 \times 2,91) 12,42 = 7,91 + 0,67 = 8,58;$$

$$Q_4 = k_1^{IV} + k_2^{IV} + (0,0075 k_1^{IV} + 0,0056 k_2^{IV}) (\tau - t_2) = 5 + 5,30 + (0,0075 \times 5 + 0,0056 \times 5,30) 12,42 = 10,30 + 0,83 = 11,13;$$

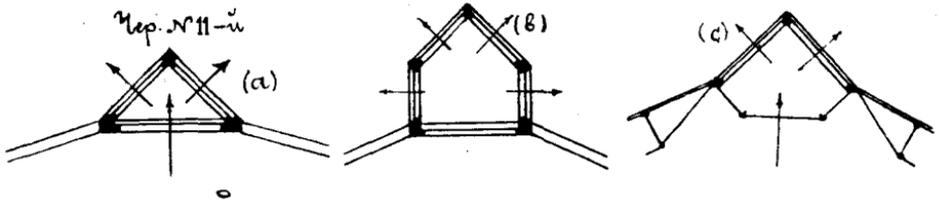
$$Q_2 = k_1'' + k_2'' + (0,0075 k_1'' + 0,0056 k_2'') (t - t_0) = 6 + 2,91 + (0,0075 \times 6 + 0,0056 \times 2,91) 12,42 = 8,91 + 0,78 = 9,69;$$

При этихъ значеніяхъ основныхъ коэффициентовъ:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{7,49} + 0,005 + \frac{1}{8,58} + \frac{1}{11,13} + \frac{1}{9,69}} =$$

$$= \frac{1}{0,133 + 0,005 + 0,115 + 0,090 + 0,103} = \frac{1}{0,446} = 2,24 \text{ Cal. mtr}^2;$$

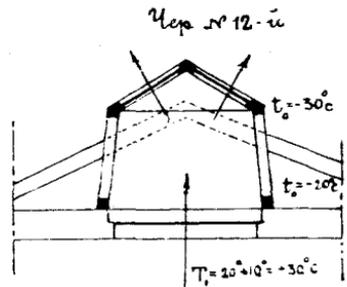
Къ разсматриваемому случаю относятся, главнымъ образомъ, свѣт-  
товые фонари надъ заводскими мастерскими, а въ жилыхъ зданіяхъ  
надъ лѣстничными клѣтками. (См. черт. № 11 (а), (б), (с)).



5) Свѣтотыя покрытія надъ жилыми помѣщеніями состоятъ иногда  
изъ одной горизонтальной рамы въ потолокъ съ одиночнымъ застекле-  
ніемъ и вертикальной шахты, прорѣзывающей чердачное пространство  
и перекрытой выше крыши второю рамою также съ одиночнымъ за-  
стекленіемъ (черт. № 12).

Полагая въ этомъ случаѣ  $t$ -ру чер-  
дачнаго пространства на  $10^{\circ}\text{C}$ . выше наи-  
низшей наружной  $t$ -ры, т. е. принимая  
 $t_0 = -20^{\circ}\text{C}$ ., а  $t$ -ру у потолка, какъ и выше  
 $T_1 = +30^{\circ}\text{C}$ . найдемъ по формулѣ Чаплина

$T_1 - T = t_1 - \tau = \tau - t_2 = t - t_2 =$   
 $= 0,1 \text{ К. } (T_1 - t_0) = 0,1 \times 2,07 \times$   
 $\times 50 = 10,35^{\circ} \text{ С. или, съ округле-}$   
ніемъ:  $10^{\circ} \text{ С.}$



Кромѣ того, въ случаяхъ солиднаго устройства и исправнаго  
содержанія крыши и слуховыхъ оконъ: въ выраженіи для  $Q_2$  можно  
принимать  $k_1'' = 5$ -ти при этихъ условіяхъ путемъ подсчетовъ, ана-  
логичныхъ тѣмъ, какіе даны въ предыдущемъ примѣрѣ, найдемъ  
значеніе:

$$K \cong 2 \text{ 16/Cal. m}^2$$

### 6) Ойна и свѣтотыя покрытія съ тройнымъ застекленіемъ.

Данныя выше общія выраженія, будучи примѣнены къ случаю  
двухъ воздушныхъ прослоекъ, доставятъ путемъ послѣдовательныхъ  
вычисленій численное значеніе для всеобщаго коэффиціента теплопе-  
редачи черезъ вертикальный оконный просвѣтъ или свѣтотыя фонарь  
при тройномъ застекленіи; поэтому, не останавливаясь на повтореніи  
всего извѣстнаго уже хода вычисленій, приведемъ способъ, данный для  
этого случая проф. Сальмоновичемъ.

Подобно общей формулѣ Сальмоновича, данной въ пунктѣ 6-мъ  
этой главы для двойного застекленія,

$$N = K \frac{T_1 - t_0}{2} [1 + \alpha (T_1 - t_0)]$$

онъ даетъ для тройнаго застекленія формулу:

$$N = K \frac{T_1 - t_0}{3} [1 + \alpha' (T_1 - t_0)] \dots \dots \dots (1)$$

Гдѣ черезъ  $N$  обозначена часовая передача теплоты черезъ 1 кв. единицу поверхности тройного окна, при чемъ  $K$  представляетъ собою извѣстный уже всеобщій коэффициентъ для одинарнаго застекленія, а  $\alpha'$  нѣкоторый поправочный коэффициентъ, зависящій отъ температурной разности  $(T_1 - t_0)$  комнатнаго воздуха и внѣшней среды. Обозначая черезъ  $K'''$  неизвѣстный пока всеобщій коэффициентъ для тройнаго застекленія, можемъ то же самое количество  $N$  выразить зависимостью:

$$N = K''' (T_1 - t_0);$$

Сопоставляя оба выраженія для  $N$  и рѣшая ихъ относительно  $K'''$ , найдемъ:

$$K''' = \frac{K}{3} [1 + \alpha' (T_1 - t_0)] \dots \dots \dots (1).$$

Коэффициентъ  $K$  былъ нами опредѣленъ выше и равенъ отъ 4.80 Cal. mtr<sup>2</sup> до 5.50 Cal mtr<sup>2</sup>, въ среднемъ его можно принимать по Ритшелю  $K = 5,00$  Cal mtr<sup>2</sup>;

Что же касается значеній коэффициента  $\alpha'$ , то ихъ можно брать изъ нижеслѣдующей таблицы:

Таблица № 11-й.

Коэффициентовъ  $\alpha'$  для тройнаго застекленія.

Разность т-ръ ( $T_1 - t_0$ ).	Отъ 25° до 30°.	Отъ 30° до 35°.	Отъ 35° до 40°.	Отъ 40° до 45°.
Значенія коэф- фициентовъ $\alpha'$ .	0,020; 0,015; 0,014.	0,013; 0,010; 0,008.	0,005, 0,004.	0,003.

По подставленіи цифровыхъ значеній  $K$  и  $\alpha'$  для заданной температурной разности легко вычислить  $K'''$  изъ формулы (1).

Положимъ, напримѣръ,  $T_1 - t_0 = 50^\circ$  С. и примемъ  $\alpha' = 0,003$  (какъ для  $45^\circ$  разности).

Тогда:

$$K''' = \frac{5,00}{3} [1 + (0,003 \times 50)] = 1,66 \times 1,15 = 1,91 \text{ Cal. mtr}^2 \text{ въ часъ.}$$

Въ качествѣ общаго замѣчанія необходимо указать, что на величину вообще очень значительной потери теплоты черезъ окна и фанари громадное вліяніе оказываютъ щели и неплотности въ рамахъ. Дѣйствительная потеря всегда больше вычисленной; въ качествѣ поправки являются предположенія о большей или меньшей подвижности воздуха и принятіе во вниманіе вліянія влажности на отпотѣвающихъ поверхностяхъ стеколъ. На разнообразіе численныхъ значеній коэффициентовъ на ряду съ этимъ вліяетъ еще и выборъ частныхъ температурныхъ разностей, до сихъ поръ еще только приблизительно отвѣчающихъ дѣйствительности.

**Таблица № 12-й.**

Всеобщихъ коэффициентовъ теплопередачи для оконъ и свѣтовыхъ покрытій.

Конструкція застекленія.		П о д а н н ы м ь		
		Ритшеля.	Друг. изслѣдователей.	
I. Окна.				
1	Вертикальное окно съ одиночнымъ застекленіемъ: а) тонкое оконное стекло. б) толстое магазинное стекло (зеркальное) . . . . .	Вн. вл. 5,30 Внутри влажн 5,00	Вн. вл. 5,50 —	Вн. влаж. 4,31, сухое 3,56. —
2	Вертикальныя двойныя переплеты съ обыкновенными тонкими стеклами . . . . .	Внутри влаж. 2,20, сух. 2,08	— сух. 2,07	Внутри влажное 2,15, сухое 1,78.
3	Вертикальныя тройныя переплеты съ обыкновенными тонкими стеклами . . . . .	—	—	Вн. сухое 1,20, внутри влажная 1,30 (по Сальм. 1,91)
4	Вертикальн. одиночн. рама съ двумя стеклами по формулѣ (при потѣниі стеколь): $k = 5 - 2,8 m = 5 - 2,8 \frac{\omega}{\omega_0}$ ; гдѣ m есть отношеніе поверхности стекла $\omega$ къ полн. поверхн. окна, (включая и раму) $\omega_0$ ; при сухихъ же стеклахъ: $k = 5 - 2,92 m$ .	При m = 0,75 2,90 При m = 0,75 2,81	—	—
II. Свѣтовые фонари.				
1	Одиночный переплетъ съ однимъ выходящимъ наружу стекломъ . . . . .	Внутри влажное 5,10	—	На 10% больше, чѣмъ для вертикальн. оконъ. —
2	То же—выход. на чердакъ.	3,60	—	На 10% больше,
3	Двойной переплетъ выходить наружу. . . . .	2,35	—	чѣмъ для вертикальн. оконъ.
4	То же—выход. на чердакъ.	2,10	—	—
5	Тройн. рамы верхн. свѣта.	—	1,50	На 10% больше, чѣмъ для вертикальн. по Сальмонов.

*Примчаніе.* Для перевода данныхъ этой таблицы въ фунто-цельсievыя единицы по отношенію къ 1 кв. саж. цифры таблицы надо умножать на 11,08.

Въ прилагаемой здѣсь таблицѣ № 12-й сгруппированы коэффициенты К для различныхъ застекленій, найденные различными изслѣдованіями.

## II. Всеобщій коэффициентъ теплопередачи для наружныхъ дверей.

Примѣненіе общихъ формулъ къ вычисленію всеобщихъ коэффициентовъ теплопередачи для наружныхъ дверей различныхъ конструкцій не представляетъ никакихъ затрудненій, но полученные такимъ образомъ коэффициенты нуждаются въ поправкахъ, такъ какъ потеря теплоты черезъ наружныя входныя двери зависитъ не только отъ ихъ конструкціи толщины и неплотностей, но еще и отъ условій пользованія дверями, т. е., какъ часто и на какое время двери открываются и остаются открытыми. Слѣдовательно, многое зависитъ отъ назначенія того помѣщенія, въ которое непосредственно ведетъ дверь. Сообразуясь съ обстоятельствами, принимаютъ нѣкоторыя мѣры для устраненія врывовъ въ помѣщенія наружнаго холоднаго воздуха, устраивая тамбуры, двойныя и тройныя двери, создавая внутри сѣней и вестибюлей опоры комнатнаго воздуха, мѣшающаго проникновенію холоднаго и проч. Всѣ эти мѣры имѣютъ цѣлью уменьшеніе температурной разности.

Въ виду сказаннаго, понятно разнообразіе численныхъ значеній предлагаемыхъ различными авторами всеобщихъ коэффициентовъ теплопередачи для входныхъ дверей.

Во всякомъ случаѣ цифры нижепомѣщаемыхъ таблицъ, какъ проверенныя практически, вполне годны для техническихъ расчетовъ, тѣмъ болѣе, что дальнѣйшею къ нимъ поправкою являются повышенные запасы, вводимые въ итоги потерь теплоты для помѣщеній, непосредственно соединенныхъ съ входными дверями.

Таблица № 13-я.

Всеобщихъ коэффициентовъ К для входныхъ дверей (по Ритшелю).

Толщина дверныхъ		mm.	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
полотенъ.		дюйм.	0,75"	1,2"	1,5"	2"	2,4"
Сосновыя двери	наружныя.		2,20	1,80	1,50	1,30	1,10
	внутреннія.		2,10	1,70	1,50	1,30	1,10
Дубовыя двери	наружныя.		3,00	2,50	2,20	2,00	1,80
	внутреннія.		2,80	2,50	2,20	2,00	1,80

Профессоръ П. Ерченко даетъ нижеслѣдующую таблицу, гдѣ полученные вычисленіемъ цифры увеличены на извѣстный %, въ зависимости отъ возможности прониканія холоднаго воздуха.

Таблица № 14-й.

Всеобщих коэффициентов К для дверей (по П. Ерченко).

КОНСТРУКЦІЯ ДВЕРЕЙ.	Число дверей во входѣ:		
	одиночныя.	двойныя.	тройныя.
Простыя двери:	2,48	0,96	0,60
обшитыя съ одной стороны.	1,86	0,90	0,55
обшитыя съ обѣихъ сторонъ.	1,68	0,84	0,53

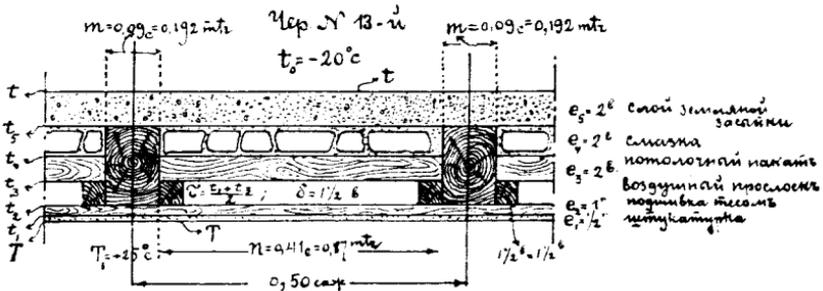
*Примѣчаніе.* Для получения коэффициентов К въ ф/ц. ед. т. по отношению къ 1 кв. саж. табличныя цифры въ обоихъ случаяхъ умножаются на 11,08.

**V. Всеобщій коэффициентъ теплопередачи К для потолочныхъ конструкций.**

**Примѣръ № 1-й.**

Въ виду широкой до сихъ поръ распространенности деревянныхъ потолковъ на деревянныхъ балкахъ и въ виду типичности этой конструкции приводимъ подробный для нея выводъ всеобщаго коэффициента.

Согласно черт. № 13-й потолочныя балки шириною  $m = 4\frac{1}{2}$  вер. = = 0,09 с. = 0,192 мтр. и высоту въ 6 вер. уложены ось отъ оси на разстояніи въ  $1\frac{1}{2}$  арш. = 0,50 саж.



Разстояніе между внутренними гранями сосновыхъ балокъ:  $n = 0,50 - 0,045 \times 2 = 0,41 \text{ с.} = 0,87 \text{ мтр.}$

Снизу по балкамъ сдѣлана подшивка 1" — мѣ тесомъ и по ней снизу слой штукатурки въ  $\frac{1}{2}$ ".

Вдоль балки прибиты продольные бруски сѣченіемъ  $1\frac{1}{2}$  в.  $\times$   $1\frac{1}{2}$  в., а по нимъ уложены сплошь сосновыя доски наката толщиной въ 2 вершка (тверскія или пластины 5 в.  $\times$   $2\frac{1}{2}$  в.); поверхъ наката или чернаго потолка по слою глины уложенъ плашмя битый кирпичъ, сверху также смазанный глиною общей толщиной въ 2 вершка, наконецъ, поверхъ смазки — засыпка растительной землею слоемъ толщиной въ 2 вершка.

Такимъ образомъ, въ промежуткахъ между балками потолочная конструкция состоитъ изъ слѣдующихъ слоевъ, считая снизу:

- 1) штукатурка:  $e_1 = 0,5'' = 0,013 \text{ mtr.};$
- 2) досчатая подшивка:  $e_2 = 1'' = 0,025 \text{ mtr.};$
- 3) воздушный прослойкъ:  $\delta = 1,5 \text{ вер.} = 2\frac{1}{2}'' = 0,064 \text{ mtr.};$
- 4) черный потолокъ (накатъ):  $e_3 = 2 \text{ вер.} = 0,085 \text{ mtr.};$
- 5) смазка (кирпичъ и глина):  $e_4 = 2 \text{ вер.} = 0,085 \text{ mtr.};$
- 6) земляная засыпка:  $e_5 = 2 \text{ вер.} = 0,085 \text{ mtr.}$

Въ общемъ видѣ формула для всеобщаго коэффициента теплопередачи данной сложной конструкции съ однимъ воздушнымъ прослойкомъ представится въ видѣ:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{e_4}{\lambda_4} + \frac{e_5}{\lambda_5} + \frac{1}{Q_2}} \dots \dots \dots (1).$$

При чемъ, сложные коэффициенты тепловосприятія и теплопередачи имѣютъ слѣдующія выраженія съ поправкою Пекле:

- 1) для нижней поверхности слоя штукатурки:

$$Q_1 = k_1' + k_2' + (0,0075 k_1' + 0,0056 k_2') (T_1 - T) \dots \dots \dots (2).$$

При относительной неподвижности комнатнаго воздуха можно положить въ выраженіе (2) коэффициентъ восприятія теплоты соприкосновеніемъ съ воздухомъ  $k_1' = 4$ .

Коэффициентъ же лучеиспусканія для штукатурки, согласно табличныхъ данныхъ  $k_2' = 3,60$ ;

- 2) для верхней, обращенной въ воздушный прослойкъ, поверхности досчатой подшивки:

$$Q_3 = k_1''' + k_2''' + (0,0075 k_1''' + 0,0056 k_2''') (t_2 - \tau) \dots \dots \dots (3),$$

гдѣ  $\tau = \frac{t_2 + t_3}{2}$  = средней т-рѣ воздуха въ прослойкѣ.

При чемъ, предполагая воздухъ въ прослойкѣ въ данныхъ условияхъ не болѣе подвижнымъ, чѣмъ комнатный, можемъ назначить:

$k_1''' = 4$ ; а коэффициентъ лучеиспусканія для дерева беремъ по таблицѣ равнымъ:  $k_2''' = 3,60$ ;

- 3) точно также, для нижней, обращенной въ прослойкъ поверхности досокъ чернаго потолка:

$$Q_4 = k_1^{iv} + k_2^{iv} = (0,0075 k_1^{iv} + 0,0056 k_2^{iv}) (\tau - t_3) \dots \dots \dots (4),$$

гдѣ попрежнему:

$$\tau = \frac{t_2 + t_3}{2};$$

$$k_1^{iv} = 4 \text{ и}$$

$$k_2^{iv} = 3,60;$$

- 4) наконецъ, для обращенной въ чердачное пространство внѣшней поверхности земляной засыпки:

$$Q_2 = k_1'' + k_2'' + (0,0075 k_1'' + 0,0056 k_2'') (t - t_0) \dots \dots \dots (5),$$

при чемъ для нѣсколько болѣе подвижнаго воздуха на чердакѣ надо принимать  $k_1'' = 5$ ; коэффициентъ же лучеиспусканія, по аналогіи съ матеріалами подобными растительной землѣ, назначаемъ равнымъ  $k_2'' = 3,62$ ;

5) для вычисленія коэффициентовъ  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  и  $Q_4$  по формуламъ (2), (3), (4) и (5) необходимо задаться величинами температурныхъ разностей; для этого, положивъ среднюю температуру комнатнаго воздуха въ  $+20^\circ \text{C}$ ., назначаемъ т-ру его  $T_1$  въ слоѣ прилегающемъ къ потолку выше, на  $5^\circ \text{C}$  т. е. принимаемъ:  $T_1 = +25^\circ \text{C}$ . При предѣльной наружной т-рѣ  $t_0 = -30^\circ \text{C}$ . т-ра чердачнаго пространства подъ желѣзною крышею по обрѣшеткѣ обыкновенно на  $10^\circ \text{C}$ . выше наружной, поэтому полагаемъ  $t_0 = -20^\circ \text{C}$ .

Пользуясь указаніемъ проф. Ритшеля, что при разности т-рѣ воздуха внутренней и внѣшней среды близкой къ  $40^\circ \text{C}$ . температурныя разности срединъ и поверхностей данной потолочной конструкціи не превышаютъ  $1^\circ \text{C}$ , можемъ положить:

$$T_1 - T = t_2 - \tau = \tau - t_3 = t - t_0 = 1^\circ \text{C}.$$

(ибо  $T_1 - t_0 = 25 - (-20) = 45^\circ \text{C}$ ., т. е. сравнительно мало отличается отъ нормы указанной проф. Ритшелемъ).

Вычисляемъ послѣдовательно значенія сложныхъ коэффициентовъ

$$Q_1, Q_3, Q_4 \text{ и } Q_2:$$

$$Q_1 = 4 + 3,60 + (0,0075 \times 4 + 0,0056 \times 3,61) = 7,65; \quad \frac{1}{Q_1} = \frac{1}{7,65} = 0,130$$

$$Q_3 = Q_4 = 4 + 3,60 + (0,0075 \times 4 + 0,0056 \times 3,60) = 7,65; \quad \frac{1}{Q_3} = \frac{1}{Q_4} = \frac{1}{7,65} = 0,130$$

$$Q_2 = 5 + 3,62 + (0,0075 \times 5 + 0,0056 \times 3,62) = 8,67; \quad \frac{1}{Q_2} = \frac{1}{8,67} = 0,115$$

Беремъ, далѣе, изъ таблицы № I значенія коэффициентовъ внутренней теплопроводности для слоевъ нашей конструкціи:

1) для штукатурки  $\lambda_1 = 0,69$ ;

2) для досчатой подшивки (поперекъ волоконъ)  $\lambda_2 = 0,093$ ;

3) для досчатаго наката (поперекъ волоконъ)  $\lambda_3 = 0,093$ ;

4) для смазки изъ кирпича и глины  $\lambda_4 = 0,800$ ;

5) для земляной засыпки  $\lambda_5 = 0,150$

и вычисляемъ рядъ отношеній:

$$\frac{e_1}{\lambda_1} = \frac{0,013}{0,690} = 0,020;$$

$$\frac{e_2}{\lambda_2} = \frac{0,025}{0,093} = 0,265;$$

$$\frac{e_3}{\lambda_3} = \frac{0,085}{0,093} = 0,913;$$

$$\frac{e_4}{\lambda_4} = \frac{0,085}{0,800} = 0,106;$$

$$\frac{e_5}{\lambda_5} = \frac{0,085}{0,150} = 0,566;$$

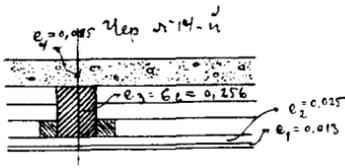
подставляя найденныя численныя величины въ ур-ніе (I) имѣемъ,

$$K_1 = \frac{1}{0,130 + 0,020 + 0,268 + 0,130 + 0,130 + 0,913 + 0,106 + 0,566 + 0,115} = \frac{1}{2,378} = 0,42 \text{ Cal. mtr}^2; \dots \dots \dots (II).$$

Вычисленное выше значеніе всеобщаго коэффициента  $K_1$  справедливо только для конструкціи въ междубалочномъ пространствѣ на ширинѣ  $n = 0,41$  саж. = 0,87 mtr.

Для участковъ потолковъ лежащихъ надъ балками на ширинѣ  $m = 0,09$  саж. = 0,192 mtr.

при отсутствіи воздушнаго прослойка и при другомъ числѣ и составѣ слоевъ (см. черт. № 14-й) коэффициентъ долженъ имѣть другое частное значеніе  $K_2$ , которое намъ и надлежитъ вычислить при обозначеніяхъ данныхъ на черт. и при нѣкоторыхъ найденныхъ уже величинахъ.



Выше были найдены:  
Толщина слоевъ:

- штукатурки  $e_1 = 0,013$  mtr.;
- подшивки  $e_2 = 0,025$  mtr.;
- засыпки  $e_4 = e_3 = 0,085$  mtr.

Ихъ коэффициенты внутренней теплопроводности:

$$\lambda_1 = 0,69; \lambda_2 = 0,093 \text{ и } \lambda_4 = \lambda_3 = 0,150,$$

поэтому, извѣстны и отношенія:

$$\frac{e_1}{\lambda_1} = \frac{0,013}{0,69} = 0,020; \quad \frac{e_2}{\lambda_2} = \frac{0,025}{0,093} = 0,268;$$

$$\frac{e_4}{\lambda_4} = \frac{0,085}{0,150} = 0,566;$$

толщина балки  $e_3 = 6$  вер. = 0,12 саж. = 0,256 mtr.

Для сосноваго дерева поперекъ волоконъ  $\lambda_3 = 0,093$ .

Поэтому:

$$\frac{e_3}{\lambda_3} = \frac{0,256}{0,093} = 2,75;$$

значенія коэффициентовъ  $Q_1 = 7,65$  и  $Q_2 = 7,67$ , остаются и въ этомъ случаѣ безъ измѣненія:

$$Q_1 = \frac{1}{7,65} = 0,130 \text{ и } Q_2 = \frac{1}{7,67} = 0,130.$$

Общее выражение всеобщаго коэффициента  $K_2$  для данной сложной конструкции имѣетъ видъ:

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{e_4}{\lambda_4} + \frac{1}{Q_2}} \dots \dots \dots (III).$$

Послѣ подстановки численныхъ величинъ находимъ:

$$K_2 = \frac{1}{0,130 + 0,020 + 0,268 + 2,75 + 0,566 + 0,130} = \frac{1}{3,864} = 0,258 \text{ Cal. mtr}^2 \dots \dots \dots (IV).$$

При вычисленныхъ частныхъ коэффициентахъ  $K_1$  и  $K_2$  проф. Ритшель предложилъ значеніе средняго для всей конструкции всеобщаго коэффициента  $K$  опредѣлять по формулѣ:

$$K = \frac{nK_1 + mK_2}{n + m} \dots \dots \dots (V),$$

гдѣ  $n$  — ширина въ мтр'ахъ промежутка между балками, а  $m$  — ширина балки.

Слѣдовательно, вообще, при вычисленныхъ  $K_1 = 0,42$  и  $K_2 = 0,258$  и произвольныхъ  $n$  и  $m$  имѣемъ:

$$K = \frac{0,42 \cdot n + 0,258 m}{n + m} \dots \dots \dots (VI),$$

въ данномъ же случаѣ:  
при:

$$\begin{aligned} n &= 0,41 \text{ саж.} = 0,870 \text{ mtr.} \\ m &= 0,09 \text{ саж.} = 0,192 \text{ mtr.} \end{aligned}$$

$$K = \frac{0,42 \times 0,870 + 0,258 \times 0,192}{0,870 + 0,192} = \frac{0,4149}{1,062} \approx 0,40 \text{ cal/mtr}^2$$

что составляетъ въ русскихъ мѣрахъ:

$$K = 0,40 \times 11,08 = 4,43 \text{ ф/ц. ед. т. съ 1 кв. саж.}$$

*Примѣчаніе.* Въ рассмотрѣнномъ примѣрѣ сомнительной величиной является принятый коэффициентъ внутренней теплопроводности для смазки  $\lambda_4 = 0,800$  (какъ для обожженной глины). Смазка же состоитъ изъ слоя необожженной глины, по которой укладывается плашмя одинъ рядъ краснаго обожженнаго кирпича съ заливкою глиною же швовъ такую же глиною кирпичъ смазывается сверху.

Для кирпичной кладки предлагаютъ  $\lambda_4 = 0,69$ ; для обожженнаго кирпича  $\lambda_4$  — отъ 0,34 до 0,36, при любомъ изъ этихъ меньшихъ зна-

чений для  $\lambda_1$  возрастаетъ выраженіе  $\frac{e_1}{\lambda_1}$  поэтому уменьшается значеніе  $K_1$ , а слѣдовательно и значеніе для  $K$ . Найденный выше коэффициентъ  $K = 0,40 \text{ Gal/mtr}^2$ , превышая обычно считаеваемый  $K = 0,30 \text{ Cal/mtr}^2$ . нѣсколько меньше предложеннаго В. М. Чаплинымъ  $K = 0,45 \text{ Cal/mtr}^2$  для подобной же конструкции и поэтому можетъ быть принимаемъ, какъ вѣроятное среднее значеніе.

Пользуясь указаніями данными выше не представитъ особыхъ затрудненій вычислить коэффициентъ  $K$  и при всякой другой потолочной конструкции.

## VI. Передача теплоты полами.

Условія передачи теплоты черезъ толщѣ половыихъ конструкций подводятся подъ случай (b) (см. стр. 38-ю). Количество теряемой теплоты находится въ прямой зависимости отъ т-ры подполья и, слѣдовательно, отъ потери тепла этимъ послѣднимъ.

Потеря теплоты подпольемъ происходитъ съ одной стороны черезъ стѣнки цоколя и черезъ отверстія въ нихъ, съ другой стороны— черезъ грунтъ.

Поглощеніе теплоты грунтомъ вообще значительно, но не поддается точному учету, такъ какъ задача осложняется многими привходящими условіями: (толщина и матеріаль стѣнъ, глубина промерзанія, характерный составъ почвы, теплопроводность и проч.) Замѣчено, что на глубинѣ большей глубины промерзанія (приблизительно ниже 3-хъ арш. отъ поверхности въ нашемъ поясѣ) т-ра почвы въ теченіе зимняго времени для данной мѣстности остается почти постоянной величиной, при чемъ подъ отапливаемыми зданіями эта т-ра всегда на нѣсколько градусовъ выше, чѣмъ для открытыхъ мѣстъ. Предположивъ точно извѣстнымъ коэффициентъ теплопроводности даннаго грунта  $\lambda$  и обозначивъ черезъ  $\Omega$  площадь пола данной конструкции, черезъ  $K_1$  его всеобщій коэффициентъ теплопередачи, черезъ  $T_1$  и  $t_0$  внутреннюю т-ру помѣщенія и температуру наружнаго воздуха, черезъ  $F$  поверхность стѣнъ цоколя черезъ  $K_2$  всеобщій для нихъ коэффициентъ теплопередачи, черезъ  $K_0$  всеобщій коэффициентъ для грунта и черезъ  $a$  постоянную т-ру грунта на глубинѣ большей глубины промерзанія, можемъ вычислить т-ру подполья  $x$  изъ условія:

$$\Omega K_1 (T_1 - x) = F K_2 (x - t_0) + \Omega K_0 (x - a);$$

Къ сожалѣнію, до сихъ поръ техника не располагаетъ сколько нибудь надежными цифровыми величинами коэффициентовъ теплопроводности для грунтовъ и практически пользование даннымъ выше выраженіемъ невозможно.

Довольствуются, обыкновенно, числами, полученными изъ наблю-

дений надъ температурами подполій въ существующихъ зданіяхъ; наиболѣе вѣроятными числами считаютъ  $4^{\circ}$  —  $6^{\circ}$  С.

При вычисленіяхъ потерь теплоты черезъ бетонные плитные и другого рода полы подвальныхъ помѣщеній, особенно обширныхъ и углубленныхъ болѣе, чѣмъ на 3 арш. въ землю, примѣняютъ слѣдующій приемъ: По периметру  $L$  наружныхъ стѣнъ берутъ полосу пола, шириною въ 1 саж. и принимаютъ площадь

$$L \times 1 \text{ саж.} = \omega \text{ кв. саж.}$$

За величину дѣйствительно охлаждаемой поверхности (вмѣсто полной площади пола). Затѣмъ при назначеніи всеобщаго коэффиціента теплопередачи  $K_0$  пользуются коэффиціентомъ для наружной стѣны, ограждающей данное подвальное помѣщеніе въ землѣ, при толщинѣ ея на уровнѣ пола.

Положимъ, напримѣръ, подвальное помѣщеніе подъ дворомъ имѣть измѣренія: длину  $a = 8$  саж.; ширину  $b = 4$  саж. высоту  $h = 1.50$  саж. при чемъ толщина стѣнъ  $\delta = 2\frac{1}{2}$  кирпичамъ; уровень пола подвала ниже поверхности двора на 1.70 саж. Положимъ, что одной длинной стороною нашъ подвалъ примыкаетъ къ сосѣднимъ подваламъ подъ зданіемъ, тогда: периметръ наружныхъ подвальныхъ стѣнъ въ нашемъ случаѣ  $L = a + 2b = 8,00 + 2 \times 4,00 = 16$  саж.; полная площадь пола подвала  $\Omega = a \times b = 8,00 \times 4,00 = 32,00$  кв. саж.; за дѣйствительно охлаждаемую его поверхность принимаемъ:

$$\omega = 1 \times 1,00 = 16,00 \times 1,00 = 16,00 \text{ кв. саж.}$$

Обозначимъ черезъ  $K = 8$  ф/ц. ед. т. всеобщій коэффиціентъ теплопередачи для стѣны въ  $2\frac{1}{2}$  кирпича, если стѣна надземная; для такой же стѣны цѣликомъ по всей высотѣ углубленной въ землю коэффиціентъ  $K'$ , очевидно, долженъ быть меньше, т. е. коэффиціентъ  $K$  долженъ быть умноженъ на нѣкоторое число  $\mu$  меньшее единицы, при чемъ:

$$K' = \mu. K.$$

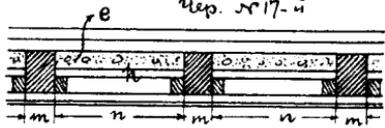
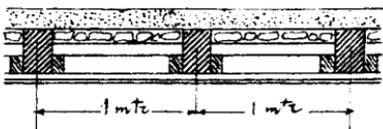
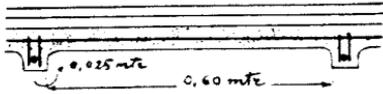
Практика указываетъ численное значеніе  $\mu = 0,60$ ; принявъ его, имѣемъ  $K' = 0,60 \times 8 = 4,80$  ф/ц. съ кв. с. этотъ же коэффиціентъ принимаемъ и для пола  $K_0 = K = \mu K$ . Часовая потеря теплоты черезъ полъ при этихъ условіяхъ  $K'$  при разности т-ръ въ  $1^{\circ}$  С. выразится величиною:  $h_0 = \omega. K_0 = 6,00 \times 4,80 = 76,80$  ф/ц. ед. т.

Въ виду того, что перекрытія одной и той же конструкціи являются то полами, то потолками въ зависимости отъ т-ры пространства надъ и подъ ними, здѣсь прилагается соединенная таблица всеобщихъ коэффиціентовъ теплопередачи для половъ, потолковъ и крышъ.

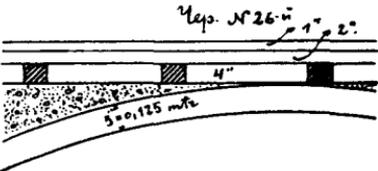
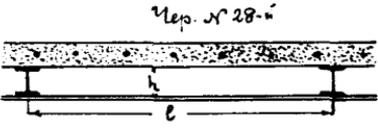
Таблица № 15-й.

Значений всеобщих коэффициентов теплопередачи для половъ, потолковъ и крышь.

№№	Описание конструкціи половъ и потолковъ.	Эскизные чертежи, размѣры и частные коэф-циенты составныхъ частей конструкціи.				Для по-толковъ.	Для по-ловъ.					
						$K_1$	$K_2$					
1	Легкая конструкція перекрытія, состоящая изъ досчатого настила по балкамъ. Черт. 15.					$K_1$ $K_2$	тѣ-же значенія.					
		$h$	$\delta$	$m$	$n$			$k_1$	$k_2$			
		0,20	0,025	0,15	0,60			0,415	1,934	1,63		
					0,70					1,67		
				0,20	0,60					1,56		
					0,70					1,60		
		0,24	0,025	0,15	0,60			0,352	1,934	1,62		
					0,70					1,66		
				0,20	0,60					1,54		
					0,70					1,59		
		2	Балки съ накатомъ и коксовой засыпкой; сверху сосновый полъ; снизу подшивка тесомъ и штукатурка по дранию. Черт. № 16.					$K_1$ $K_2$	—			
				$h$	$\delta$					$e$	$m$	$n$
0,24	0,025			0,105	0,20	0,60	0,2974			0,5375	0,48	
						0,70					0,49	
						0,80					0,49	
						0,90					0,50	
$h$	$\delta$			$e$	$m$	$n$	$k_1$			$k_2$	—	—
0,24	0,025			0,105	0,20	0,60	0,2974			0,2174	—	0,24
						0,70					—	0,24
						0,80					—	0,24
						0,90					—	0,24

№№	Описание конструкции половъ и потолковъ.	Эскизные чертежи, размеры и частные коэффициенты составныхъ частей конструкции.	Для потолковъ. K <sub>1</sub>	Для половъ. K <sub>2</sub>																																						
3	<p>Балки съ накатомъ и коксовой засыпкой; сверху по черному полу дубовый штучный полъ или паркетъ. Снизу подшивка тесомъ и штукатурка по драни. Черт. № 17.</p>	<p align="center">Черт. № 17-й</p>  <table border="1" data-bbox="352 427 859 700"> <thead> <tr> <th>h</th> <th>e</th> <th>m</th> <th>n</th> <th>k<sub>1</sub></th> <th>k<sub>2</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">0,24</td> <td rowspan="4">0,105</td> <td rowspan="4">0,20</td> <td>0,60</td> <td rowspan="4">0,2754</td> <td rowspan="4">0,4697</td> <td>0,42</td> </tr> <tr> <td>0,70</td> <td>0,43</td> </tr> <tr> <td>0,80</td> <td>0,43</td> </tr> <tr> <td>0,90</td> <td>0,43</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" data-bbox="352 717 859 973"> <thead> <tr> <th>h</th> <th>e</th> <th>m</th> <th>n</th> <th>k<sub>1</sub></th> <th>k<sub>2</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">0,24</td> <td rowspan="4">0,105</td> <td rowspan="4">0,20</td> <td>0,60</td> <td rowspan="4">0,2754</td> <td rowspan="4">0,2054</td> <td>0,22</td> </tr> <tr> <td>0,70</td> <td>0,22</td> </tr> <tr> <td>0,80</td> <td>0,22</td> </tr> <tr> <td>0,90</td> <td>0,22</td> </tr> </tbody> </table>	h	e	m	n	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	0,24	0,105	0,20	0,60	0,2754	0,4697	0,42	0,70	0,43	0,80	0,43	0,90	0,43	h	e	m	n	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	0,24	0,105	0,20	0,60	0,2754	0,2054	0,22	0,70	0,22	0,80	0,22	0,90	0,22		
h	e	m	n	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>																																					
0,24	0,105	0,20	0,60	0,2754	0,4697	0,42																																				
			0,70			0,43																																				
			0,80			0,43																																				
			0,90			0,43																																				
h	e	m	n	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>																																					
0,24	0,105	0,20	0,60	0,2754	0,2054	0,22																																				
			0,70			0,22																																				
			0,80			0,22																																				
			0,90			0,22																																				
4	<p>Тяжелая конструкция обыкновенныхъ потолковъ съ накатомъ, смазкой и засыпкой сверху; снизу подшивка тесомъ и штукатурка по драни. Черт. № 18.</p>	<p align="center">Черт. № 18-й</p> 	отъ 0,30 до 0,45																																							
5	<p>По пластинному накату смазка или засыпка, черный и чистый полъ, снизу штукатурка по драни. Черт. № 19.</p>	<p align="center">Черт. № 19-й</p> 	0,37																																							
6	<p>Жельзо - бетонный потолокъ съ чернымъ и чистымъ поломъ. Черт. № 20.</p>	<p align="center">Черт. № 20-й</p> 	1,17																																							

№№	Описание конструкціи половъ и потолоковъ.	Эскизные чертежи, размѣры и частные коэффициенты составныхъ частей конструкціи.	Для по-	Для по-																				
			ловъ. K <sub>1</sub>	толковъ. K <sub>2</sub>																				
7	Жельзо - бетонный потолокъ съ чернымъ и чистымъ поломъ, съ воздушнымъ прослойкомъ и штукатуркою по сѣткѣ. Черт. № 21.	<p>Черт. № 21-й</p> <p>воздушная прослойка</p>	0,912																					
8	Жельзо - бетонный потолокъ, штукатурка по бетону, насыпка черной и чистый полъ. Черт. № 22.	<p>Черт. № 22-й</p>																						
		<table border="1"> <tr> <td>h</td> <td>16</td><td>18</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td> </tr> <tr> <td>cm.</td> <td>0,72</td><td>0,67</td><td>0,61</td><td>0,59</td><td>0,57</td><td>0,56</td><td>0,54</td><td>0,53</td><td>0,58</td> </tr> </table>	h	16	18	20	21	22	23	24	25	26	cm.	0,72	0,67	0,61	0,59	0,57	0,56	0,54	0,53	0,58		
		h	16	18	20	21	22	23	24	25	26													
		cm.	0,72	0,67	0,61	0,59	0,57	0,56	0,54	0,53	0,58													
h	28	30	32	35	40	45	50	55	=K <sub>1</sub>															
cm.	0,48	0,45	0,44	0,40	0,37	0,36	0,35	0,28	=K <sub>1</sub>															
9	Изолированная на чердакѣ балки, плоское бетонное перекрытіе, засыпка торфомъ или пробкою. Чертежъ № 23.	<p>Черт. № 23-й</p> <p>0,15 mtr</p>	0,60	0,60																				
10	Полъ изъ каменныхъ плитъ на кирпичномъ сводѣ съ забуткою пазухъ. Черт. № 24.	<p>Черт. № 24-й</p> <p>s = 0,125 mtr</p>	1,00																					
11	Досчатый полъ на лагахъ по кирпичному своду. Черт. № 25.	<p>Черт. № 25-й</p> <p>s = 0,125 mtr</p>	0,71	0,44																				

№№	Описание конструкции полов и потолков.	Эскизные чертежи, размеры и частные коэффициенты составных частей конструкций.	Для полов. K <sub>1</sub>	Для потолков. K <sub>2</sub>																																								
12	Паркетный пол по сплошной обрешетке по лагам на сводѣ. Черт. № 26.	 <p>Черт. № 26-й</p>	0,58	0,30																																								
13	Кирпичный сводѣ. Черт. № 27.	 <p>Черт. № 27-й</p> <p>Съ забуткою пазухъ . . . . . 1,66          „ заливкою асфальтомъ . . . . . 1,58          „ настилкою плитокъ . . . . . 1,60          „ настилкою линолеума . . . . . 1,66</p>																																										
14	Жельзо-бетонная крыша съ воздушнымъ прослойкомъ, снизу по стѣлкѣ штукатурка воздушный прослойкъ, жельзо-бетонный потолокъ, асфальтъ, древесный цементъ и насыпка изъ гравия. Черт. № 28.	 <p>Черт. № 28-й</p> <table border="1" data-bbox="342 999 855 1376"> <tr> <td>h cm.</td> <td>16</td> <td>22</td> <td>28</td> <td>35</td> <td>45</td> <td>55</td> <td></td> </tr> <tr> <td>l<sub>1</sub> mt.</td> <td colspan="6">1,2 mt.</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,977</td> <td>0,978</td> <td>0,979</td> <td>0,979</td> <td>0,981</td> <td>0,983</td> <td>=K<sub>1</sub></td> </tr> <tr> <td>l<sub>2</sub></td> <td colspan="6">0,8 mt</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,979</td> <td>0,980</td> <td>0,982</td> <td>0,984</td> <td>0,985</td> <td>0,987</td> <td>=K<sub>2</sub></td> </tr> </table>	h cm.	16	22	28	35	45	55		l <sub>1</sub> mt.	1,2 mt.								0,977	0,978	0,979	0,979	0,981	0,983	=K <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	0,8 mt								0,979	0,980	0,982	0,984	0,985	0,987	=K <sub>2</sub>		
h cm.	16	22	28	35	45	55																																						
l <sub>1</sub> mt.	1,2 mt.																																											
	0,977	0,978	0,979	0,979	0,981	0,983	=K <sub>1</sub>																																					
l <sub>2</sub>	0,8 mt																																											
	0,979	0,980	0,982	0,984	0,985	0,987	=K <sub>2</sub>																																					
15	Жельзо-бетонная крыша безъ воздушнаго прослойка. Черт. № 29.	 <p>Черт. № 29-й</p>	2,81																																									

№№	Описание конструкции полов и потолковъ.	Эскизные чертежи, размеры и частные коэффициенты составных частей конструкции.	Для по-	Для по-
			ловъ.	толковъ.
			$K_1$	$K_2$
16	Толевая кровля по досчатому настилу толщиной въ 1". Черт. № 30.		2,13	
17	Цинковая кровля или красной мѣди по досчатому настилу въ 1".		2,17 2,17	
18	Аспидная кровля по досчатому настилу.		2,10	
19	Кирпичная кровля безъ настила.		4,85	
20	Гольцементная кровля.		1,32	
21	Кровля изъ волнистаго желѣза безъ настила.		10,40	

## VII. Всеобщій коэффициентъ теплопередачи черезъ вертикальныя стѣны.

### 1) Предѣльная толщина воздушнаго прослойка.

Въ §§ 1 и 2 этой главы были выведены выраженія для всеобщихъ коэффициентовъ теплопередачи  $K$  въ случаѣ однослойной однородной и сложной стѣны, состоящей изъ нѣсколькихъ соприкасающихся и разнородныхъ по материалу слоевъ, а также и для случаевъ стѣны съ однимъ или нѣсколькими воздушными прослойками.

Въ послѣднемъ случаѣ было предположено, что черезъ прослоекъ теплота передается соприкосновеніемъ и лучеиспусканіемъ въ силу циркуляціи воздуха по высотѣ прослойка и въ силу теплопрозрач-

ности воздуха. Это предположеніе, однако-же, справедливо только при нѣкоторой опредѣленной ширинѣ (толщинѣ) воздушнаго прослойка, такъ какъ при малой ширинѣ прослойка можетъ и не быть нисходящихъ и восходящихъ токовъ воздуха и поэтому теплопередача можетъ осуществляться путемъ проведенія теплоты, какъ и въ твердыхъ слояхъ. Слѣдовательно, должна существовать нѣкоторая предѣльная толщина прослойка, до которой передача теплоты происходитъ въ силу теплопроводности и, поэтому, зависитъ отъ ширины прослойка и за которой эта теплопередача, осуществляясь соприкосновеніемъ и лучеиспусканіемъ, остается величиной постоянной и не зависящей отъ толщины прослойка.

Этотъ предѣлъ достигается въ томъ случаѣ, когда сумма коэффициентовъ теплопередачи и тепловоспріятія поверхностями, обращенными въ прослойкъ, сдѣлается равной коэффициенту внутренней проводимости.

Положимъ, напримѣръ, что согласно чертежа № 31 имѣется стѣнка, состоящая изъ 2-хъ слоевъ, раздѣленных однимъ воздушнымъ прослойкомъ толщины  $\delta$ .

Въ этомъ случаѣ, согласно даннымъ выше выводовъ, сложные коэффициенты теплопередачи и тепловоспріятія для поверхностей, обращенныхъ въ прослойкъ, выражаются формулами:

$$Q_3 = k_1^{III} + 2k_2^{III};$$

$$Q_4 = k_1^{IV} + 2k_2^{IV};$$

При чемъ основные коэффициенты передачи соприкосновеніемъ

$$k_1^{III} = k_1^{IV} = 4$$

такъ какъ воздухъ въ прослойкѣ находится въ состояніи подвижности меньшей, чѣмъ для наружнаго и большей, чѣмъ для комнатнаго воздуха.

Коэффициенты лучеиспусканія для поверхностей равно сухихъ или равно влажныхъ, вообще пребывающихъ въ одинаковомъ состояніи равны. Положимъ, оба слоя каменные и сухіе; для ихъ поверхностей:

$$k_2^{III} = k_2^{IV} = 3,60.$$

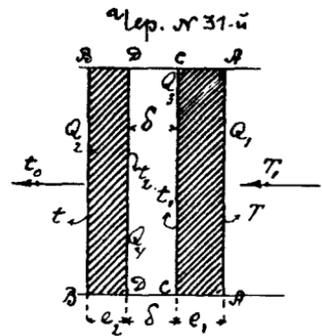
Слѣдовательно:

$$Q_3 = Q_4 = 4,00 + 2 \times 3,60 = 11,20.$$

Сумма сложныхъ коэффициентовъ равна:

$$\frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} = \frac{1}{11,20} + \frac{1}{11,20} = \frac{2}{11,20} \dots \dots \dots (a)$$

Для сухого воздуха по Пекле, коэффициентъ теплопроводности  $\lambda = 0,04$ ; Редтенбахеръ, учитывая возможность щелей и неплотностей въ стѣнахъ, а также и влажность воздуха, принималъ  $\lambda = 0,10$ ; принимая въ расчетъ эту послѣднюю величину и обозначая черезъ  $\delta$  искомую



толщину воздушного прослойка, можемъ выразить величину коэффициента внутренней проводимости  $\xi$  черезъ:

$$\frac{1}{\xi} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta}{0,10} \dots \dots \dots (b)$$

Приравнивая вторыя части выраженія (a) и (b) имѣемъ:

$$\frac{\delta}{0,10} = \frac{2}{11,20} \dots \dots \dots (c)$$

Откуда находимъ для  $\delta$  численное значеніе:

$$\delta = \frac{0,10 \times 2}{11,20} = 0,02 \text{ mtr.}$$

Слѣдовательно,—передача теплоты въ силу теплопроводности воздуха прекращается, какъ скоро ширина прослойка превышаетъ 2 см.; Проф. Ерченко даетъ для той же предѣльной толщины прослойка  $\delta = 3,5$  см.

При дальнѣйшемъ увеличеніи толщины прослойка теплопередача уже не зависитъ отъ этой ширины и осуществляется циркуляціей воздуха и его способностью проводить тепловые лучи сквозь свою толщу.

## 2) Заполненіе прослойка дурными проводниками теплоты.

Въ томъ случаѣ, когда воздушный прослойекъ имѣется въ виду заполнить какимъ-нибудь веществомъ, дурно проводящимъ теплоту, на примѣръ, пескомъ, золой, угольными шлаками, инфузорной землей и проч., то толщина прослойка  $\delta$  должна быть измѣнена пропорціонально коэффициенту  $\lambda$  внутренней теплопроводности данного матеріала.

Напримѣръ, въ случаѣ засыпки прослойка пескомъ при  $\lambda_1 = 0,27$  толщина слоя засыпки  $\delta_1$  найдется изъ условія:

$$\frac{\delta_1}{\delta} = \frac{\lambda_1}{\lambda} \dots \dots \dots (d)$$

гдѣ:  $\delta = 0,035$  mtr. толщина воздушного прослойка равной проводимости по Ерченко, а  $\lambda = 0,10$  его коэффициентъ теплопроводности при этихъ данныхъ:

$$\frac{\delta_1}{0,035} = \frac{0,27}{0,10} \dots \dots \dots (e)$$

откуда:

$$\delta_1 = \frac{0,035 \times 0,27}{0,10} = 0,0945 = 0,10 \text{ mtr.} = 10 \text{ cm.}$$

Слѣдовательно, при засыпкѣ прослойка веществомъ, коэффициентъ внутренней проводимости котораго больше, чѣмъ для воздуха, толщина слоя засыпки должна быть больше, чѣмъ свободного воздушного прослойка.

Въ случаѣ, напримѣръ, торфяной засыпки, для которой  $\lambda_1 = 400$ , найдемъ для  $\delta_1$  величину, равную:

$$\delta_1 = \frac{\delta \cdot \lambda_1}{\lambda} = \frac{0,035 \times 400}{0,10} = 0,14 \text{ mtr.} = 1,4 \text{ cm.}$$

точно также, при засыпкѣ золою, для которой  $\lambda = 0,06$ .

Находимъ:

$$\delta_1 = \frac{0,035 \times 0,06}{0,10} = 0,02 \text{ mtr.} = 2 \text{ cm.}$$

Слѣдовательно дурные проводники тепла: зола, пробка, мѣлъ въ порошокѣ, торфъ, инфузорная земля и проч. вещества, для которыхъ  $\lambda_1 < \lambda$  уменьшаютъ необходимую толщину  $\delta_1$  изолирующаго слоя, сравнительно съ толщиной равноцѣннаго воздушнаго прослойка.

Данныя въ § 1 и 2 формулы легко примѣнить къ вычисленію любой по составу стѣнки при надлежащемъ и соответствующемъ обстоятельствамъ выборѣ основныхъ и вычисленію сложныхъ коэффициентовъ тепловоспріятія и теплоизліянія. Приведемъ здѣсь два численныхъ примѣра, достаточно поясняющіе ходъ разсужденія и расчета.

### Численный примѣръ № 1-ый.

Требуется вычислить значеніе всеобщаго коэффициента  $K$  для наружной кирпичной стѣны, оштукатуренной изнутри и оклеенной обоями. Последовательность слоевъ, температуры и обозначенія указаны на черт. № 32-й.

Согласно общаго ур—нія (см. стр. 32) выраженіе для всеобщаго коэффициента  $K$  въ формѣ Ньютона имѣетъ въ данномъ случаѣ видъ:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{1}{Q_2}} \dots \dots \dots (a)$$

Тепловоспринимающая поверхность со стороны помещенія обои (бумага); коэффициентъ лучеиспусканія для нея по таблицѣ, № 7-й.

$$k_2' = 3,80;$$

Для внѣшней теплоотдающей поверхности кирпичной стѣнки, точно также:  $k_2'' = 3,60;$

для внутренняго спокойнаго воздуха коэффициентъ тепловоспріятія соприкосновеніемъ  $k_1' = 4$ -мъ, а для наружнаго свободнаго надо взять  $k_1'' = 6$ -ти.

Тогда, сложные коэффициенты:

$$Q_1 = k_1' + k_2' = 4 + 3,80 = 7,80;$$

$$Q_2 = k_1'' + k_2'' = 6 + 3,60 = 9,60;$$

Положимъ далѣе толщину слоевъ равною:

для обоевъ:  $e_1 = 0,0001 \text{ mtr.};$

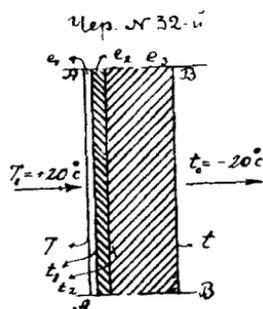
для слоя штукатурки:  $e_2 = 0,01 \text{ mtr.};$

для кирпичной стѣны:  $e_3 = 0,51 \text{ mtr.}$  (0,25 саж. = 2 кирпича).

и находимъ по таблицѣ № 1-й значеніе коэффициентовъ  $\lambda$  внутренней теплопроводности, именно:

для бумаги (обои):  $\lambda_1 = 0,034;$  для штукатурки:  $\lambda_2 = 0,69;$

для кирпичной кладки:  $\lambda_3 = 0,69.$



По подстановлении численных значений въ выражение (а) получаемъ послѣдовательно:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{7.80} + \frac{0,0001}{0,034} + \frac{0,01}{0,69} + \frac{0,51}{0,69} + \frac{1}{9,60}} =$$

$$= \frac{1}{0,128 + 0,003 + 0,015 + 0,740 + 0,104} =$$

$$= \frac{1}{0,99} = 1,01 \text{ Cal./mtr.}^2; \dots \dots \dots (b)$$

Найденное приближенное значение для  $K = 1,01 \text{ Cal./mtr.}^2$  въ часъ надлежитъ исправить въ зависимости отъ разности т-ръ  $T_1 = +20^\circ\text{C}$  и  $t_0 = -20^\circ\text{C}$  по формуламъ Пекле, по которымъ:

$$Q_1 = k_1' + k_2' + (0,0075k_1' + 0,0056k_2')(T_1 - T)$$

и

$$Q_2 = k_1'' + k_2'' + (0,0075k_1'' + 0,0056k_2'')(t - t_0) \dots \dots \dots (c)$$

для назначенія температурныхъ разностей  $(T_1 - T)$  и  $(t - t_0)$  между серединами и поверхностями воспользуемся таблицей проф. Ритчеля, въ которой для т-ръ  $T_1 = +20^\circ\text{C}$ . внутри помѣщенія и  $t_0 = -20^\circ\text{C}$ . во внѣшней средѣ при различныхъ толщинахъ наружныхъ кирпичныхъ стѣнъ даны значенія разностей  $T_1 - t = t - t_0$ , вводимыхъ въ формулы Пекле.

**Таблица № 16-й**  
значеній  $T_1 - t = t - t_0$  для кирпичныхъ стѣнъ.

Разность т-ръ $T_1 - t_0 = 20^\circ - (-20^\circ) = 40^\circ\text{C}$ .			Значенія $T_1 - T = t - t_0$ въ $^\circ\text{C}$ .
Толщина кирпичной стѣны.	Въ кирпичахъ.	Въ мтр.	
Для наружныхъ стѣнъ толщиной:	$\frac{1}{2}$	0,12	$8^\circ\text{C}$ .
" " " "	1	0,25	$7^\circ\text{C}$ .
" " " "	$1\frac{1}{2}$	0,38	$6^\circ\text{C}$ .
" " " "	2	0,51	$5^\circ\text{C}$ .
" " " "	$2\frac{1}{2}$	0,64	$4^\circ\text{C}$ .
" " " "	3	0,77	$3^\circ\text{C}$ .
" " " "	$3\frac{1}{2}$	0,90	$2^\circ\text{C}$ .
" " " "	4	1,03	$1^\circ\text{C}$ .
" " " выше:	4	1,05	$0^\circ\text{C}$ .
Для внутреннихъ стѣнъ:	—	—	$0^\circ\text{C}$ .

По этой таблицѣ, для стѣны въ 2 кирпича:

$$T_1 - T = t - t_0 = 5^\circ\text{C}.$$

поэтому:

$$Q_1 = 4 + 3.80 + (0,0075 \times 4 + 0,0056 \times 3.80)5 = 8,10;$$

$$Q_2 = 6 + 3.60 + (0,0075 \times 6 + 0,0056 \times 3.60)5 = 9,93,$$

Внося въ выражение (b) исправленные значенія  $Q_1$  и  $Q_2$  найдемъ окончательно:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{8,10} + 0,003 + 0,015 + 0,740 + \frac{1}{9,93}} = \frac{1}{0,98} = 1,02 \text{ Cal./mtr.}^2 \text{ въ часъ.}$$

### Численный примѣръ № 2-й.

Требуется вычислить значеніе  $K$  для сложной стѣнки съ воздушнымъ прослойкомъ, изображенной на черт. № 33-й.

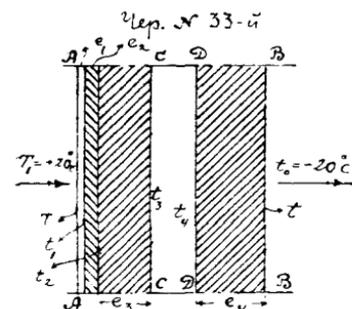
Составъ слоевъ, размѣры и коэффициенты внутренней теплопроводности слѣдующіе:

обои (бумага):

$$e_1 = 0,0001 \text{ mtr}; \lambda_1 = 0,034;$$

штукатурка:

$$e_2 = 0,01 \text{ mtr}; \lambda_2 = 0,69;$$



кирпичная стѣна:

$$e_3 = 0,25 \text{ mtr}; \lambda_3 = 0,69;$$

далѣе воздушный прослойкъ и кирпичная стѣна для которой:

$$e_4 = 0,25 \text{ mtr}; \lambda_4 = 0,69.$$

Для данного случая приближенное значеніе для  $K_1$ , не принимая во вниманіе вліяніе температурной разности, выражается формулою:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} + \frac{e_4}{\lambda_4} + \frac{1}{Q_2}} \dots \dots \dots (a)$$

Гдѣ по прежнему:

$$Q_1 = k_1' + k_2' = 4,00 + 3,80 = 7,80; \frac{1}{Q_1} = \frac{1}{7,80} = 0,128;$$

$$Q_2 = k_1'' + k_2'' = 6,00 + 3,60 = 9,60; \frac{1}{Q_2} = \frac{1}{9,60} = 0,104;$$

$$\frac{e_1}{\lambda_1} = \frac{0,0001}{0,034} = 0,003;$$

$$\frac{e_2}{\lambda_2} = \frac{0,01}{0,69} = 0,015;$$

$$\frac{e_3}{\lambda_3} = \frac{0,25}{0,69} = 0,362;$$

$$\frac{e_4}{\lambda_4} = \frac{0,25}{0,69} = 0,362;$$

Что касается значения  $Q_3$  и  $Q_4$  для поверхностей, обращенных въ прослоекъ, то для нихъ слѣдуетъ положить  $k_{1,III} = k_{1,IV} = 5$ -ти и тогда:

$$Q_3 = Q_4 = k_{1,III} + 2k_{2,III} = k_{1,IV} + 2k_{2,IV} = 5 + 3 \cdot 60 \times 2 = 12.20;$$

$$\frac{1}{Q_3} + \frac{1}{Q_4} = \frac{1}{12.20} = 0,164;$$

При этихъ данныхъ приближенное значеніе для  $K$  равно:

$$K = \frac{1}{0,128 + 0,003 + 0,015 + 0,362 + 0,164 + 0,362 + 0,104} = \frac{1}{0,138} = 0,878 \text{ Cal/mtr}^2 \text{ въ часъ.}$$

Далѣе, такъ какъ разность т-ръ  $T_1 - t_0 = 20^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C}) = 40^\circ\text{C}$ ., то, согласно предыдущаго, слѣдуетъ положить разности т-ръ ( $T_1 - T$ ) и ( $t - t_0$ ) равными  $5^\circ\text{C}$ ., т.-е.  $T_1 - T = t - t_0 = 5^\circ\text{C}$ . При этомъ условіи значенія  $Q_1$  и  $Q_2$ , исправленные по формулѣ Пекле, будутъ равны (какъ въ предыдущемъ примѣрѣ)  $Q_1 = 8,10$ ;  $Q_2 = 9,93$ . Такъ какъ воздушный прослоекъ лежитъ въ срединѣ стѣны, то можно положить среднюю т-ру воздуха въ немъ равною  $\tau = \frac{t_3 + t_4}{2} = 0^\circ \text{C}$ ., а т-ры поверхностей  $t_3$  теплоотдающей  $\overline{CC}$  и  $t_4$  тепловоспринимающей  $\overline{DD}$ —первую на  $5^\circ\text{C}$ . выше нуля, а вторую—на  $5^\circ\text{C}$ . ниже нуля, т.-е.:  $t_3 = +5^\circ\text{C}$ .;  $t_4 = -5^\circ\text{C}$ .

При этихъ условіяхъ, по формулѣ Пекле находимъ:

$$Q_2 = Q_4 = 5,00 + 2 \times 3,60 + (0,0075 \times 5 + 0,0056 \times 2 \times 3,60) (5^\circ - 0^\circ) = 12,20 + (0,0779 \times 5) = 12,59.$$

Вводя въ выраженіе (а) исправленные значенія  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  и  $Q_4$ , найдемъ окончательно:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{8,10} + 0,003 + 0,015 + 0,362 + \frac{2}{12,59} + 0,362 + \frac{1}{9,93} + 0,124} = \frac{1}{0,003 + 0,015 + 0,362 + 0,160 + 0,362 + 0,100} = \frac{1}{1,126} = 0,888 \text{ Cal/mtr}^2 \text{ въ часъ.}$$

Изъ приведенныхъ примѣровъ видно, что вліяніе температурной разности при толстыхъ стѣнахъ на величину поправки очень мало сравнительно съ случаемъ оконныхъ застекленій.

Въ заключеніе приводимъ здѣсь таблицу общепринятыхъ значеній  $K$  для стѣнъ.

Таблица № 17-И.

Значеній всеобщихъ коэффиціентовъ для стѣнъ зданій.

№№	МАТЕРІАЛЪ и КОНСТРУКЦІЯ СТѢНЪ.	Толщина стѣны въ метр.	Значеніе К въ Са/метр <sup>2</sup> въ часъ.		
<b>А. Наружныя.</b>					
<b>I. Стѣны изъ естественныхъ камней.</b>					
1	Стѣны изъ песчаника: при толщинѣ безъ штукатурки изнутри.	0,30	2,10		
		0,40	1,80		
		0,50	1,60		
		0,60	1,40		
		0,70	1,30		
		0,80	1,20		
		0,90	1,10		
1,00	1,00				
2	Стѣны изъ известняка при толщинѣ безъ штукатурки изнутри.	0,30	2,50		
		0,40	2,20		
		0,50	2,00		
		0,60	1,80		
		0,70	1,70		
		0,80	1,55		
		0,90	1,40		
1,00	1,30				
3	Сплошныя кирпичныя стѣны при толщинѣ безъ штукатурки.	$\frac{1}{2}$ к.		0,12	2,40
		1	"	0,25	1,70
		1 $\frac{1}{2}$	"	0,38	1,30
		2	"	0,51	1,10
		2 $\frac{1}{2}$	"	0,64	0,90
		3	"	0,77	0,80
		3 $\frac{1}{2}$	"	0,90	0,70
		4	"	1,03	0,60
4 $\frac{1}{2}$	"	1,16	0,55		
4	Стѣны изъ трамбованнаго бетона при толщинѣ:	0,05	3,40		
		0,10	2,70		
		0,15	2,30		
		0,20	2,00		
		0,25	1,70		
0,30	1,50				
5	Стѣны изъ гипсовыхъ плитъ при толщинѣ:	0,03	3,70		
		0,04	3,40		
		0,05	3,20		
		0,06	3,00		

№№	МАТЕРИАЛЪ и КОНСТРУКЦІЯ СТѢНЪ.	Толщина стѣны въ метр.	Значеніе K въ Cal/metr <sup>2</sup> въ часъ.		
6	<p align="center"><b>III. Стѣны смѣшанной конструкціи.</b></p> <p>Стѣны кирпичныя, облицованныя снаружи песчаникомъ.</p>				
		а) При толщинѣ каменной облицовки 0,10 mtr.	{ При толщинѣ кирпичной стѣны:	0,12	2,10
				0,25	1,50
				0,38	1,20
				0,51	1,00
				0,64	0,80
				0,77	0,70
				0,90	0,60
				1,03	0,55
				б) При толщинѣ каменной облицовки 0,25 mtr.	{ При толщинѣ кирпичной стѣны.
		0,25	1,30		
		0,38	1,00		
		0,51	0,90		
		0,64	0,75		
		0,77	0,65		
0,90	0,60				
в) При толщинѣ каменной стѣны 0,50 mtr.	{ При толщинѣ кирпичной внутри облицовки.	0,12	1,30		
		0,25	1,00		
		0,38	0,85		
		0,50	0,75		
		0,64	0,65		
		0,77	0,60		
7	Кирпичныя стѣны, облицованныя съ внутренней стороны гипсовыми плитами, толщиной въ 3 см. При толщинѣ кирпичной стѣны:	0,12	2,20		
		0,25	1,50		
		0,38	1,20		
		0,51	1,00		
8	Кирпичныя стѣны съ внутренней тесовой обшивкой.	а) При толщинѣ обшивки 0,06 mtr.	{ Толщина кирпичной стѣны.	0,12	2,00
				0,25	1,50
				0,38	1,10
		б) При толщинѣ обшивки 0,015 mtr.	{ Толщина кирпичной стѣны.	0,12	1,80
				0,25	1,40
				0,38	1,00
				0,24	1,40
				0,37	1,10
9	Кирпичныя стѣны съ воздушными прослойками при толщинѣ стѣны безъ прослойки и штукатурки:	0,50	0,90		
		0,63	0,80		
		0,76	0,70		
		0,89	0,60		
		1,02	0,55		

№№	МАТЕРИАЛЪ и КОНСТРУКЦІЯ СТѢНЪ.	Толщина стѣны въ метр.	Значеніе К въ Cal/metr <sup>2</sup> въ часъ.
<b>IV. Деревянная стѣны.</b>			
10	<p>Стѣны изъ кантованныхъ брусевъ съ наружной и внутренней обшивкой 1"-мъ тесомъ и съ прокладкой толемъ между наружной обшивкой и брусьями.</p> <p>При толщинѣ брусевъ въ 0,60 mtr. { Толщина тесовыхъ обшивокъ.</p> <p>При толщинѣ брусевъ въ 0,15 mtr. { Толщина тесовыхъ обшивокъ.</p>	<p>0,02 0,025 0,030</p> <p>0,02 0,025 0,030</p>	<p>0,57 0,54 0,51</p> <p>0,44 0,42 0,40</p>
11	<p>Стѣны рубленныя изъ бревенъ и проконопаченныя съ обѣихъ сторонъ безъ обшивки и штукатурки.</p> <p>При толщинѣ бревенъ въ остружкѣ. { 5 вер. = 4 вер. =</p>	<p>0,22 0,18</p>	<p>0,20 0,30</p>
12	<p>Тоже—съ оштукатуркою по войлоку съ внутренней стороны и при толщинѣ стѣны безъ штукатурки. { 5 вер. = 4 вер. =</p>	<p>0,22 0,18</p>	<p>0,60 0,75</p>
13	<p>Тоже—но съ наружною обшивкою тесомъ 1" по брускамъ 2½" × 2½".</p> <p>При толщинѣ бревенъ. { 5 вер. = 4 вер. =</p>	<p>0,22 0,18</p>	<p>0,53 0,60</p>
14	<p>Стѣна, состоящая изъ двухъ досчатыхъ въ 1" толщины стѣнокъ съ оштукатуркою съ обѣихъ внѣшнихъ сторонъ и съ воздушнымъ прослойкомъ толщиной въ 4".</p>	—	0,90
<b>V. Внутреннія.</b>			
15	<p>Кирпичныя стѣны при толщинѣ безъ штукатурки.</p>	<p>0,12 0,25 0,38 0,51 0,64 0,77</p>	<p>2,20 1,50 1,20 1,00 0,80 0,70</p>

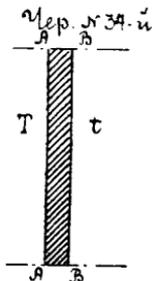
№№	МАТЕРИАЛЪ и КОНСТРУКЦІЯ СТѢНЪ.	Толщина стѣнъ въ мтр.	Значеніе К въ Col/metr <sup>2</sup> въ часъ.
16	Алебастровыя перегородки съ желѣзнымъ каркасомъ при толщинѣ.	0,04 0,06 0,08 0,10	3,10 2,80 2,50 2,30
17	Перегородки изъ гипсовыхъ плитъ при толщинѣ:	0,03 0,04 0,05 0,06 0,07 0,08 0,09 0,10	3,20 3,01 2,90 2,80 2,64 2,53 2,42 2,33
18	Перегородки изъ пробковыхъ плитъ или кирпичей при толщинѣ слоя:	0,12 0,25 0,38	1,52 0,92 0,66
19	Деревянная стѣны безъ штукатурки при толщинѣ:	0,010 0,015 0,020 0,025	2,70 2,40 2,10 1,90
20	Тоже—но съ оштукатуркою съ обѣихъ сторонъ при толщинѣ одной деревянной стѣнки:	0,020 0,025 0,030 0,040	1,30 1,20 1,15 1,00
21	Обшивныя перегородки изъ 2"-хъ досокъ съ промежуткомъ въ 6" и съ заполненіемъ его древесною золою, угольнымъ порошкомъ.	— —	0,28 0,29

## Г Л А В А III.

### Элементарная теорія поверхности нагрѣва.

#### 1. Понятіе о поверхности нагрѣва.

Представимъ себѣ стѣнку  $\overline{AB}$  (черт. № 34), по одну сторону которой, на примѣръ  $\overline{AA}$ , находятся горячія жидкости, пары или газы, а по другую  $\overline{BB}$  жидкость или газъ при значительно низшей т-рѣ  $t$ , чѣмъ горячія жидкости или газы на сторонѣ  $\overline{AA}$ , имѣющіе т-ру  $T$ .



При этомъ условіи теплота, воспринимаемая поверхностью  $\overline{AA}$  раздѣлительной стѣнки  $\overline{AB}$  въ силу теплопроводности матеріала стѣнки должна проводиться сквозь ея толщину на поверхность  $\overline{BB}$  и передаваться соприкасающимся съ этой поверхностью частицамъ среды и лучеиспускаться къ сосѣднимъ твердымъ тѣламъ, повышая ихъ температуру.

Стѣнка  $\overline{AB}$  можетъ имѣть двоякое назначеніе:

а) Она можетъ быть устроена съ цѣлью *воспрепятствовать* передачѣ теплоты изъ среды высокой т-ры по одну ея сторону въ среду низшей т-ры—по другую.

При устройствѣ стѣнки подобнаго назначенія должны быть приняты мѣры къ пониженію способности ея *проводить* теплоту путемъ устройства воздушныхъ прослоекъ, введенія въ толщину стѣнки слоевъ дурно проводящихъ теплоту матеріаловъ какъ пробковыя плиты, засыпка шлаками, кизельгуромъ, золою и проч. Такая раздѣлительная стѣнка получаетъ названіе *изолирующей*.

Кромѣ мѣръ, принимаемыхъ въ цѣляхъ уменьшенія теплопроводности, часто при устройствѣ изолирующихъ стѣнокъ принимаются мѣры и къ отведенію избытка теплоты, сообщая верхнюю и нижнюю часть вертикальнаго воздушнаго прослойка съ наружною атмосферою двумя отверстиями. Непрерывный потокъ притекающаго снизу холоднаго воздуха при этомъ во время своего теченія вверхъ по прослойку нагрѣвается и, выходя черезъ верхнее отверстие, уноситъ часть избыточной теплоты.

Случаи подобныхъ конструкций разсматриваются въ главѣ объ устройствѣ дымовыхъ трубъ во II-мъ отдѣлѣ.

б) Въ томъ случаѣ, когда назначеніемъ раздѣлительной стѣнки является лишь предупредить непосредственное соприкосновеніе или смѣшеніе частицъ, отдающей теплоту среды высокой т-ры съ частицами неоднородной съ первой среды назначенной воспринимать теплоту и имѣющей низшую т-ру, при чемъ требуется, елико возможно,

облегчить передачу теплоты через толщу такой стѣнки изъ одной среды въ другую, то такая стѣнка получаетъ названіе *нагрѣвательной поверхности*.

## 2. Виды нагрѣвательныхъ поверхностей.

Въ зависимости отъ свойствъ нагрѣвающей среды нагрѣвательныя поверхности раздѣляются на нѣсколько категорій:

а) Нагрѣвающая среда по одну сторону раздѣлительной стѣнки съ постояннымъ источникомъ теплоты непрерывно поддерживается при нѣкоторой постоянной т-рѣ  $T$ ; нагрѣваемая среда по другую сторону стѣнки для поддержанія въ ней постоянной т-ры  $t$  нуждается въ непрерывномъ притокѣ теплоты черезъ нагрѣвательную поверхность. Поверхность нагрѣва въ этомъ случаѣ должна обладать возможно большей теплопроводностью и имѣть возможно меньшую толщину, такъ какъ количество теплоты  $\xi$  проводимой въ ед-цу времени черезъ ед-цу поверхности стѣнки при толщинѣ ея  $\delta$  прямо пропорціонально коэффициенту  $\lambda$  внутренней теплопроводности и обратно пропорціонально толщинѣ ея  $\delta$ , т.-е.:

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

Наибольшимъ  $\lambda$  обладают металлы: желѣзо, чугунъ, мѣдь; по-этому въ разсматриваемомъ случаѣ предпочтеніе должно быть отдано металлической поверхности, тѣмъ болѣе, что и толщина ея можетъ быть сдѣлана очень малою. Благодаря высокой теплопроводности металлической стѣнки она очень быстро проводитъ и теряетъ теплоту, не задерживая ее въ своей толщѣ, поэтому, для поддержанія непрерывности процесса необходимо, чтобы нагрѣвающая среда непрерывно же доставляла теплоту обращенной къ ней поверхности металлической стѣнки, т.-е. поддерживалась бы во все время процесса при постоянной т-рѣ  $T$ .

Подъ указанныя условія въ точности подходитъ случай нагрѣванія помѣщеній металлическими печами. Внѣшняя поверхность такой печи способна доставлять теплоту только до тѣхъ поръ, пока продолжается процессъ топления, т.-е. пока по другую внутреннюю сторону металлической печной стѣнки непрерывно образуются горячіе дымовые газы и сообщаютъ теплоту ея внутренней поверхности.

Какъ только нагрѣвающая среда лишается притока теплоты стѣнки печи очень быстро выстываютъ и перестаютъ доставлять теплоту въ помѣщеніе. Подобнаго рода печи получили техническое опредѣленіе *печей малой теплоемкости*, а ихъ теплопередающіе поверхности *поверхностей нагрѣва малой теплоемкости*.

Для поддержанія въ нагрѣваемой средѣ постоянной т-ры  $t$  печи малой теплоемкости требуютъ непрерывнаго топления.

б) Въ томъ случаѣ, когда нагрѣвающая среда по одну сторону

раздѣлительной стѣнки пользуется отъ источника теплоты лишь періодическимъ ея притокомъ, при чемъ  $t_{ра}$  этой среды  $T$  является величиной переменнѣй, для поддержанія въ нагрѣваемой средѣ по другую сторону стѣнки постоянной  $t$ -ры  $t$  поверхность нагрѣва должна удовлетворять уже инымъ условіямъ и обладать другими свойствами.

Въ періодъ сообщенія теплоты отъ источника нагрѣваемой средѣ (въ періодъ натопки) поверхность нагрѣва не должна проводить и отдавать нагрѣваемой средѣ всего количества сообщаемой ей за этотъ періодъ теплоты, а только часть, необходимую для поддержанія въ нагрѣваемой средѣ  $t$ -ры  $t$ . Избытокъ теплоты долженъ быть поглощенъ массою матеріала стѣнки и сохраненъ въ ней до того момента, съ котораго прекращается доставленіе теплоты отъ источника. Съ этого момента для поддержанія въ нагрѣваемой средѣ  $t$ -ры  $t$  необходимо долженъ расходоваться запасъ теплоты, поглощенной массою стѣнки. Кромѣ свойства поглощать и сохранять въ періодъ натопки часть теплоты, стѣнка въ данномъ случаѣ должна обладать способностью расходовать въ періодъ охлажденія запасенную теплоту возможно равномернѣе во времени. Конечно, строго это условіе не можетъ быть выполнено, разъ прекращенъ притокъ теплоты отъ источника, но всегда желательно и возможно съ помощью соотвѣтствующихъ конструкций и выбора соотношенія размѣровъ получить достаточную для практическихъ цѣлей равномерность теплоотдачи въ періодъ охлажденія.

Поверхность нагрѣва, удовлетворяющая этимъ условіямъ называется *теплоемкой поверхностью нагрѣва* и является главнѣйшей составной частью комнатныхъ печей большой теплоемкости.

Такая печь топится въ сутки не болѣе 6 или 8 часовъ, въ теченіе которыхъ поверхность нагрѣва получаетъ и передаетъ извѣстную часть теплоты для поддержанія въ помѣщеніи постоянной  $t$ -ры  $t$  и еще успѣваетъ поглотить и сохранить запасъ теплоты, соотвѣтствующій расходу ея въ теченіе остальныхъ 18-ти или 16-ти часовъ перерыва между топками. Самая возможность устройства подобныхъ нагрѣвательныхъ приборовъ основана исключительно на свойствахъ поверхности нагрѣва большой теплоемкости.

Очевидно, что для удовлетворенія высказаннымъ выше требованіямъ стѣнки теплоемкихъ поверхностей нагрѣва должны устраиваться изъ матеріаловъ дурно проводящихъ теплоту, какъ глина, кирпичъ, изразцы.

с) Среднее мѣсто между поверхностями малой и большой теплоемкости занимаютъ стѣнки, выполняемая также изъ матеріаловъ дурно проводящихъ теплоту, но съ гораздо меньшей толщиной, чѣмъ стѣнки печей большой теплоемкости. Благодаря этому передача теплоты черезъ такія стѣнки совершается быстрѣе, а количество аккумулируемой теплоты въ зависимости отъ меньшей массы матеріала также меньше и бываетъ достаточно на гораздо меньшее число часовъ перерыва между топками. Въ предупрежденіе растрескиванія такихъ

сравнительно тонких стѣнокъ, онѣ складываются изъ кирпича въ желѣзныхъ футлярахъ.

Это весьма извѣстный типъ обыкновенно цилиндрическихъ уттермарковскихъ печей, называемыхъ печами средней теплоемкости.

### 3. Особенности условий передачи теплоты черезъ нагрѣвательныя поверхности.

Во всѣхъ случаяхъ передачи теплоты, разсмотрѣнныхъ въ главѣ II т-ра  $T_1$  среды отдающей теплоту и т-ра  $t_0$  среды ее воспринимающей на протяжении обѣихъ поверхностей раздѣлительной стѣнки предполагались величинами постоянными.

Подобное теоретическое допущеніе было почти справедливо по отношенію къ условіямъ охлажденія черезъ поверхности внѣшнихъ огражденій зданій, т.-е оконъ, стѣнъ, половъ и потолковъ, такъ какъ въ замкнутомъ пространствѣ этихъ помѣщеній комнатный воздухъ у пола имѣетъ, обыкновенно, т-ру на одинъ или два градуса низшую, чѣмъ у потолка; у наружной стѣны или у окна т-ра воздуха также немногимъ ниже, чѣмъ у противоположной внутренней стѣны; на этомъ основаніи и было возможно принимать  $T_1 = \text{Const}$ . Точно также и т-ра внѣшней среды—наружнаго воздуха—въ предѣлахъ его соприкосновенія съ внѣшними поверхностями стѣнъ, оконъ и прочихъ огражденій могла быть принимаема за величину постоянную равную:  $t_0 = \text{Const}$ .

Легко видѣть, что подобное предположеніе по отношенію къ поверхностямъ нагрѣва вообще не допустимо.

При незначительныхъ колебаніяхъ т-ръ  $T_1$  и  $t_0$  срединъ, отдающей и воспринимающей теплоту въ различныхъ точкахъ ихъ соприкосновенія съ нагрѣвательной поверхностью (напримѣръ до  $5^\circ \text{C}$ .), еще возможно довольствоваться средними арифметическими двухъ значеній т-ръ, т.-е. принимать за постоянныя т-ры:  $\frac{T_1' + T_1''}{2}$  и  $\frac{t_0' + t_0''}{2}$ , но при

тѣхъ значительныхъ измѣненіяхъ этихъ т-ръ, съ которыми приходится имѣть дѣло при изученіи условий теплопередачи черезъ поверхности нагрѣва подобный пріемъ даетъ результаты рѣзко отклоняющіеся отъ дѣйствительности.

Поэтому, при значительныхъ измѣненіяхъ т-ръ приходится устанавливать болѣе сложныя зависимости между величинами поверхностей, температурами обмѣнивающихся теплотою срединъ и количествомъ передаваемой теплоты.

Въ самомъ общемъ видѣ предстоящая намъ задача можетъ быть, формулирована слѣдующимъ образомъ:

*По одну сторону раздѣлительной стѣнки, назначенной воспринимать проводить и отдавать теплоту, находятся горячіе: жидкость, пары или газъ, при чемъ температуры этой среды для различныхъ точекъ поверхности стѣнки не одинаковы, а измѣненія этой т-ры подчинены известнымъ частнымъ условіямъ.*

Точно также, по другую сторону стѣнки находится среда воспринимающая теплоту передаваемую стѣнкою (жидкость, пары, газы, въ частности воздухъ) т-ра которой для различныхъ точекъ поверхности стѣнки также неодинакова, а измѣненія ея для различныхъ точекъ подчинены чѣмоторому закону.

Среда отдающая теплоту и среда ее воспринимающая могутъ одновременно находиться въ покоѣ или движеніи, характеръ котораго опредѣляется частными условіями. Одна изъ срединъ можетъ пребывать въ покоѣ, другая же—въ движеніи и наоборотъ.

Нисколько не сужая размѣра общаго понятія въ дальнѣйшемъ подь средою отдающей теплоту будемъ подразумѣвать горячіе дымовые газы, а за средою воспринимающую теплоту будемъ принимать воздухъ.

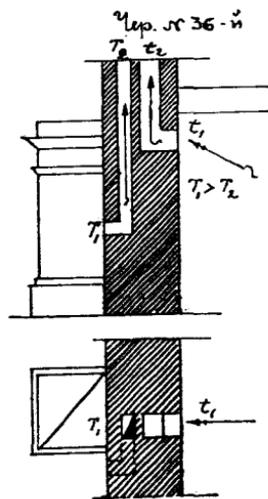
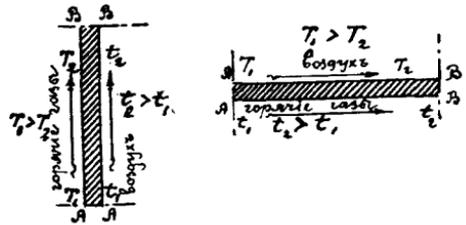
Возможныя комбинаціи можно представить въ видѣ слѣдующихъ частныхъ задачъ:

1) Горячіе газы и нагрѣваемый воздухъ по обѣ стороны стѣнки АВ движутся въ одномъ какомъ нибудь направленіи (вверхъ, внизъ, горизонтально и проч.) при чемъ т-ра газовъ въ началѣ поверхности стѣнки въ точкѣ А имѣютъ т-ру  $T_1$ , а въ концѣ рассматриваемаго участка въ точкѣ В меньшую т-ру  $T_2$ , охлаждааясь при переходѣ отъ А къ В на величину  $T_1 - T_2$ .

Нагрѣваемый воздухъ имѣющій въ А т-ру  $t_1$  къ концу передвиженія вдоль поверхности тѣ точкѣ В имѣетъ высшую т-ру  $t_2$  ( $t_2 > t_1$ ) нагрѣваясь на величину ( $t_2 - t_1$ )

Въ этомъ случаѣ раздѣлительная стѣнка носить названіе: *поверхности нагрѣ а съ параллельными токами.* (Черт. № 35).

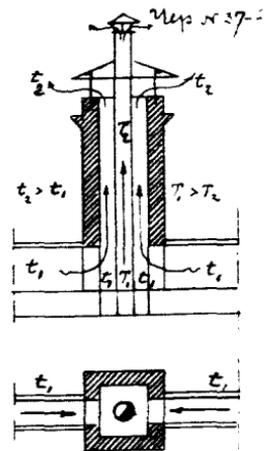
Черт. № 35-й



Техника располагаетъ многими примѣрами подобныхъ условій теплопередачи. Приводимъ здѣсь три типичныхъ примѣра:

а) Вытяжной вентиляціонный каналъ подогревается теплотою печныхъ дымовыхъ газовъ, протекающихъ по сосѣднему дымоходу, отдѣленному отъ него *раздѣлкою.* (Черт. № 36).

б). Въ сборной вытяжной шахтѣ на чердакѣ извлекаемый воздухъ по-



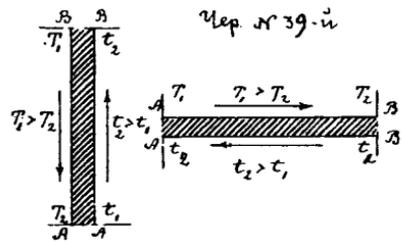
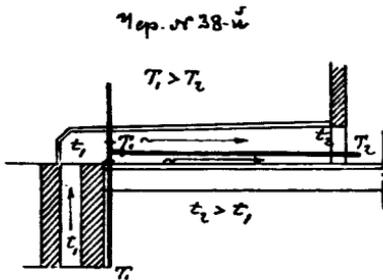
догрѣвается теплоотдачею ви́шней поверхности желѣзной дымовой трубы отъ котла или очага (черт. № 37).

с) Въ сборномъ чердачномъ боровѣ вытяжной вентиляціи проложена магистральная труба водяного или парового отопления; парь или вода могутъ имѣть движеніе совпадающее съ направлениемъ движенія вентиляціоннаго воздуха. (Черт. № 38).

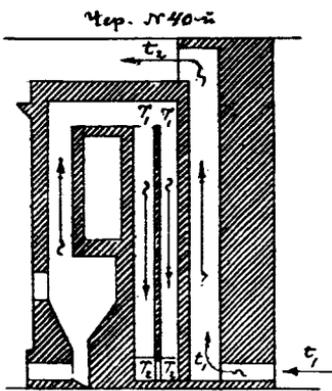
2) Движеніе горячихъ газовъ отдающихъ теплоту съ начальною т-рою  $T_1$  и конечною  $T_2$  совершается въ направленіи противоположномъ направленію движенія воздуха, имѣющаго начальную т-ру  $t_1$  и конечную послѣ нагрѣванія  $t_2$ .

$$T_1 > T_2 \text{ и } t_2 > t_1.$$

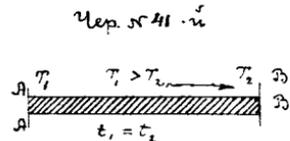
Въ этомъ случаѣ имѣемъ поверхность нагрѣва съ противотоками. (Черт. 39).



Для примѣра укажемъ на случай печной камерной поверхности нагрѣва. По опускному дымоходу—колодцу типа Свѣязева—Лукашевича сверху внизъ движутся дымовые газы, отдавая теплоту и охлаждаясь, а съ внѣшней стороны въ камерномъ пространствѣ снизу вверхъ протекаетъ подогрѣваемый холодный воздухъ. (Черт. № 40).



3) Горячіе газы двигаясь въ извѣстномъ направленіи отъ А къ В (Черт. № 41) охлаждаются отъ  $T_1$  до т-ры  $T_2$ ; воздухъ остается въ покоѣ, при чемъ т-ра его на всемъ протяженіи АВ стѣнки остается постоянной  $t_1 = t_2$ .



4) Горячіе газы сохраняютъ на пути отъ А къ В постоянную т-ру  $T_1 = T_2$ , а т-ра воздуха измѣняется увеличиваясь отъ  $t_1$  до  $t_2$ .  $t_2 > t_1$ .

5) Наконецъ, всѣ случаи, разсмотрѣнные въ главѣ II-й, могутъ быть подведены подъ случай, когда и т-ра газовъ и т-ра воздуха остаются постоянными  $T_1 = T_2$  и  $t_1 = t_2$ .

Дальнѣйшее разсмотрѣніе первыхъ четырехъ случаевъ теплотепердачи возможно лишь при наличіи нѣкоторыхъ ограничительныхъ предположеній, именно:

а) Изслѣдованіе можетъ касаться только періода инерціи, т.е. установившагося дѣйствія, при которомъ для всякой точки поверхно-

сти, разъ установившись, остаются уже неизмѣнными т-ры газовъ и воздуха, количества протекающихъ газовъ и воздуха и не мѣняются физическія свойства матеріаловъ поверхности.

б) Толщина, форма и состояніе поверхности во всѣхъ точкахъ разсматриваемаго ея участка одинаковы и не измѣнимы во времени.

с) Для всѣхъ точекъ раздѣлительной стѣнки значенія всеобщихъ коэффиціентовъ теплопередачи съ теченіемъ времени не мѣняются не зависятъ отъ скоростей и температурныхъ разностей.

д) Вся теплота отдаваемая горячими газами при охлажденіи отъ т-ры  $T_1$  до т-ры  $T_2$  цѣликомъ расходуется на нагрѣваніе воздуха отъ т-ры  $t_1$  до т-ры  $t_2$  и не расходуется никакимъ другимъ способомъ.

Такъ какъ въ практикѣ печного отопленія приходится имѣть дѣло почти исключительно съ 1-мъ, 2-мъ и 5-мъ случаями состоянія горячихъ газовъ и воздуха, то, исключая уже разсмотрѣнный 5-й случай во главѣ II-й, приступимъ къ разсмотрѣнію условий теплопередачи въ случаяхъ въ 1-мъ и 2-мъ.

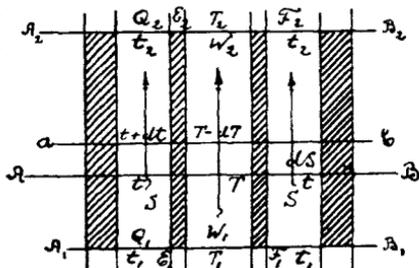
#### 4) Выраженіе для поверхности нагрѣва $S_1$ въ случаѣ параллельныхъ токовъ.

Положимъ, что по вертикальному каналу какой угодно формы (черт. № 42) внутри матеріальныхъ стѣнокъ  $E_1E_2—F_1F_2$  по направленію стрѣлки движутся вверхъ горячіе дымовые газы, имѣющіе въ началѣ разсматриваемаго участка въ сѣченіи  $E_1F_1$

т-ру  $T_1$ , а въ пространствѣ окружающемъ каналъ  $E_1E_2—F_1F_2$  и ограниченномъ абсолютно нетеплопроводными стѣнками  $A_1A_2—B_1B_2$  въ томъ же, что и газы, направленіи движется воздухъ, имѣющій въ начальномъ сѣченіи  $A_1B_1$  участку канала нѣкоторую т-ру  $t_1$ ; стѣнки канала или трубы  $E_1E_2—F_1F_2$  способны воспринимать отъ горячихъ газовъ, проводить и отдавать теплоту попутно движущемуся нагрѣваемому воздуху—являются, поэтому, *нагрѣвательной поверхностью съ параллельными токами.*

Положимъ, что въ періодъ установившагося дѣйствія черезъ каждое поперечное сѣченіе канала  $E_1F_1—E_2F_2$  взятое между параллельными горизонтальными сѣченіями  $E_1F_1$  и  $E_2F_2$  въ ед-цу времени протекаетъ всегда одно и тоже вѣсовое количество  $G$  klgr. горячихъ дымовыхъ газовъ, имѣющихъ среднюю теплоемкость  $c = \text{const.}$ , а вдоль внѣшней поверхности этого канала за то же время протекаетъ также всегда одно и то же вѣсовое количество воздуха  $P$  klgr, имѣющагося въ начальномъ сѣченіи какъ уже сказано т-ру  $t_1$ , а въ конечномъ сѣченіи  $A_2B_2$  нѣкоторую большую т-ру  $t_2$ ; обозначимъ теплоемкость этого воздуха черезъ  $c_1$ ; конечную т-ру охлаждающихся

Черт. № 42-и



дымовыхъ газо́въ въ сѣченіи  $E_2F_2$  обозначаемъ черезъ  $T_2$ , слѣдовательно  $T_2 < T_1$  пусть, кромѣ того  $W_1$  и  $W_2$  обозначаютъ запасы теплоты имѣющіеся въ дымовыхъ газахъ въ сѣченіяхъ  $E_1F_1$  и  $E_2F_2$ , соответственно, причемъ  $W_1 > W_2$ ;

Произвольно взятымъ горизонтальнымъ сѣченіемъ АВ выдѣлимъ изъ полной поверхности нагрѣва часть равную  $S \text{ mtr}^2$ , считая отъ начального сѣченія  $E_1F_1$ . и обозначимъ для этого сѣченія  $t$ -ру горячихъ газо́въ черезъ  $T$ ,  $t$ -ру воздуха черезъ  $t$  запасъ теплоты въ газахъ черезъ  $W$ , а въ воздухѣ черезъ  $Q$ .

Для всякаго слѣдующаго за АВ сѣченія  $ab$  взятаго между АВ и  $A_2B_2$   $t$ -ра горячихъ газо́въ и запасъ теплоты въ нихъ должны быть меньше, чѣмъ въ сѣченіи АВ, а для воздуха эти же величины должны быть больше, поэтому, взявъ сѣченіе  $ab$  въ разстояніи бесконечно близко отъ АВ со стороны  $A_2B_2$ , такъ чтобы увеличеніе поверхности соотвѣтствующее поясу между АВ и  $ab$  было бесконечно мало, обозначимъ его черезъ  $dS$ ; бесконечно малое пониженіе  $t$ -ры горячихъ газо́въ сринвительно съ  $t$ -рою  $T$  въ сѣченіи АВ при переходѣ къ сѣченію  $ab$  и соотвѣтствующее увеличеніе поверхности на  $dS$ , обозначимъ черезъ  $-dT$ , а уменьшеніе запаса теплоты въ газахъ черезъ  $-dW$ ; для того же сѣченія  $ab$  бесконечно малое повышеніе  $t$ -ры воздуха обозначаемъ черезъ  $+dt$ , а возрастаніе запаса теплоты терезъ  $+dQ$ .

При этихъ обозначеніяхъ для запасовъ теплоты въ дымовыхъ газахъ въ сѣченіяхъ АВ и  $ab$  можемъ составить выраженія:

для сѣченія АВ:

$$W=c.G.T \text{ calor.} \dots \dots \dots (1)$$

для сѣченія  $ab$ :

$$W-dW=c.G [T-dT] \dots \dots \dots (2)$$

уменьшеніе запаса теплоты при переходѣ отъ сѣченія АВ къ бесконечному близкому сѣченію  $ab$ ., очевидно, равно:

$$dW=c.GdT \text{ calor.} \dots \dots \dots (3)$$

для запасовъ теплоты въ воздухѣ, точно также:

для сѣченія АВ:

$$Q=c_1.P.t \text{ cal.} \dots \dots \dots (4)$$

для сѣченія  $ab$ :

$$Q+dQ=c_1P[t+dt]. \text{ cal.} \dots \dots \dots (5)$$

прирость запаса теплоты:

$$dQ=c_1.P.dt \text{ cal.} \dots \dots \dots (6)$$

Уменьшеніе запаса теплоты въ дымовыхъ газахъ должно быть равно приросту запаса въ воздухѣ, поэтому:

$$-dW=dQ$$

или:

$$-dW=cGdT=c_1Pdt. \dots \dots \dots (7)$$

Количество теплоты, передаваемое въ единицу времени участкомъ  $dS$  нагрѣвательной поверхности отъ газовъ воздуху, какъ извѣстно, пропорціонально величинѣ поверхности  $dS$ , разности  $t$ -рѣ обоихъ потоковъ  $(T-t)$ , которая при безконечно маломъ  $dS$  можетъ быть принимаема за постоянную при переходѣ отъ  $m$  къ  $S+dS$ , и всеобщему коэффициенту теплопередачи  $K$ . Последняя величина, какъ уже выяснено въ главѣ II-й, зависитъ отъ формы, положенія, рода и состоянія поверхности, отъ физической природы потоковъ обмѣнивающихся теплотою, отъ скоростей ихъ движенія и, наконецъ, отъ разности ихъ  $t$ -рѣ. Столь сложная зависимость  $K$ , отъ переменныхъ величинъ входящихъ въ наши разсужденія, заставляетъ сдѣлать два произвольныхъ но неизбѣжныхъ допущенія: именно:  $K$  не зависитъ отъ скоростей и разностей  $t$ -рѣ и поэтому вводится въ ур-нія какъ постоянная величина  $K=Const$ ; въ дальнѣйшемъ же можетъ быть введена нѣкоторая поправка къ величинѣ  $K$ , взятой изъ таблицъ; при этомъ условіи, количество теплоты передаваемое въ единицу времени участкомъ поверхности  $dS$  отъ газовъ воздуху можетъ быть выражено въ формѣ:

$$N=K[T-t] dS \text{ cal.} \dots \dots \dots (8)$$

Этому количеству, очевидно, соотвѣтствуетъ убыль запаса теплоты въ газяхъ —  $dW$ , слѣдовательно, необходимо существуетъ равенство:

$$-dW=K[T-t] dS. \dots \dots \dots (9)$$

или (по ур-нью 7-му).

$$-dW=-cGdT=K[T-t] dS \dots \dots \dots (10)$$

рѣшая ур-нѣ (10) относительно  $dS$ , получаемъ:

$$dS = -\frac{dW}{K[T-t]} = -\frac{cG}{K} \cdot \frac{dT}{[T-t]} \dots \dots \dots (11)$$

Дифференціальное ур-нѣ (11) содержитъ три переменныя:  $S$ ,  $T$  и  $t$ ; для интегрированія его необходимо исключить одну изъ нихъ, напри- мѣръ  $t$ , выразивъ его черезъ  $T$ ; для этого воспользуемся ур-нѣемъ (7-мъ):

$$-dW = -cG dT = c_1 P dt,$$

проинтегрировавъ его въ предѣлахъ отъ  $W_1$  до  $W$ , отъ  $T_1$  до  $T$  и отъ  $t_0$  до  $t$ , т. е. между сѣченіями  $A_1B_1$  и  $AB$ , найдемъ послѣдовательно,

$$\begin{aligned} -\int_{w_1}^w dW &= -cG \int_{T_1}^T dT = c_1 P \int_{t_1}^t dt \text{ или:} \\ -[W]_{w_1}^w &= -cG [T]_{T_1}^T = c_1 P [t]_{t_1}^t \text{ откуда:} \end{aligned}$$

$$-[W - W_1] = -cG [T - T_1] = c_1 P [t - t_1] \dots \dots \dots (12)$$

рѣшая ур-нѣ (12) относительно  $t$ , находимъ:

$$t = \left( t_1 + \frac{cG}{c_1 P} T_1 \right) - \frac{cG}{c_1 P} T \dots \dots \dots (13)$$

Подставляя значение  $t$  из ур-нія (13) въ ур-ніе (11), имѣемъ:

$$dS = -\frac{cG}{K} \cdot \frac{dT}{T \left(1 + \frac{cG}{c_1 P}\right) - \left(t_1 + \frac{cG}{c_1 P} T_1\right)} \dots \dots \dots (14)$$

умножаемъ и дѣлимъ вторую часть ур-нія (14) на  $\left(1 + \frac{cG}{c_1 P}\right)$  и получаемъ:

$$dS = -\frac{cG}{K \left(1 + \frac{cG}{c_1 P}\right)} \cdot \frac{dT \left(1 + \frac{cG}{c_1 P}\right)}{T \left(1 + \frac{cG}{c_1 P}\right) - \left(t_1 + \frac{cG}{c_1 P} T_1\right)} \dots \dots \dots (15)$$

выполнивъ дѣленіе въ первомъ множителѣ правой части ур-нія (15), представляемъ его въ окончательной формѣ и интегрируемъ въ предѣлахъ отъ  $S=0$  до  $S=S_1$  и отъ  $T=T_1$  до  $T=T_2$ , т. е. между сѣченіями  $A_1 B_1$  и  $A_2 B_2$  что доставляетъ:

$$\int_{s=0}^{s=s_1} dS = -\frac{1}{K \left(\frac{1}{cG} + \frac{1}{c_1 P}\right)} \int_{T=T_1}^{T=T_2} \frac{dT \left(1 + \frac{cG}{c_1 P}\right)}{T \left(1 + \frac{cG}{c_1 P}\right) - \left(t_1 + \frac{cG}{c_1 P} T_1\right)} \dots (16)$$

откуда, по правиламъ интегрированія для данного рода интеграловъ:

$$S_1 = [S]_{s=0}^{s=s_1} = -\frac{1}{K \left(\frac{1}{cG} + \frac{1}{c_1 P}\right)} \cdot \lg \text{nat} \frac{T_2 \left(1 + \frac{cG}{c_1 P}\right) - \left(t_1 + \frac{cG}{c_1 P} T_1\right)}{T_1 \left(1 + \frac{cG}{c_1 P}\right) - \left(t_1 + \frac{cG}{c_1 P} T_1\right)} \dots (17)$$

ур-ніе (17) можетъ быть преобразовано и упрощено: для этого снова обратимся къ ур-нію (7) и проинтегрируемъ его въ предѣлахъ отъ  $A_1 B_1$  до  $A_2 B_2$ , иначе говоря въ предѣлахъ отъ  $W_1$  до  $W_2$ ; отъ  $T_1$  до  $T_2$  и отъ  $t_1$  до  $t_2$ :

Не производя дѣйствій, а лишь замѣняя въ ур-ніи (12-мъ)  $W_1$   $T$  и  $t$  черезъ  $W_2$ ,  $T_2$  и  $t_2$ , получаемъ:

$$W_1 - W_2 = cG [T_1 - T_2] = c_1 P [t_2 - t_1] \dots \dots \dots (18)$$

ур-ніе (18) доставляетъ рядъ выраженій:

$$\begin{aligned} \frac{1}{cG} &= \frac{T_1 - T_2}{W_1 - W_2}; & \frac{1}{c_1 P} &= \frac{t_2 - t_1}{W_1 - W_2}; \\ \frac{1}{K \left(\frac{1}{cG} + \frac{1}{c_1 P}\right)} &= \frac{W_1 - W_2}{K [T_1 - T_2 + t_2 - t_1]}; \\ 1 + \frac{cG}{c_1 P} &= 1 + \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_2} = \frac{T_1 - T_2 + t_2 - t_1}{T_1 - T_2}; \\ t_1 + \frac{cG}{c_1 P} T_1 &= t_1 + \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_2} \cdot T_1 = \frac{T_1 \cdot t_2 - T_2 \cdot t_1}{T_1 - T_2}; \end{aligned}$$

Подставляя въ ур-ніе (17) вмѣсто множителей при  $T_1$  и  $T_2$  ихъ новыя выраженія и мѣняя знакъ (—) на (+) во второй части находимъ:

$$S_1 = \frac{W_1 - W_2}{K [T_1 - T_2 + t_2 - t_1]} \times \lg_{\text{nat}} \frac{T_1 [T_1 - T_2 + t_2 - t_1] - [T_1 t_2 - T_2 t_1]}{T_2 [T_1 - T_2 + t_2 - t_1] - [T_1 t_2 - T_2 t_1]} \quad (19);$$

по раскрытіи скобокъ и послѣ сокращенія, получаемъ окончательно:

$$S_1 = \frac{W_1 - W_2}{K [T_1 - T_2 + t_2 - t_1]} \lg_{\text{nat}} \frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2} \quad (20)$$

Переходя отъ натуральныхъ логарифмовъ къ обыкновеннымъ, имѣемъ:

$$S_1 = \frac{W_1 - W_2}{K [T_1 - T_2 + t_2 - t_1]} \cdot 2,3026 \lg \frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2} \quad (21)$$

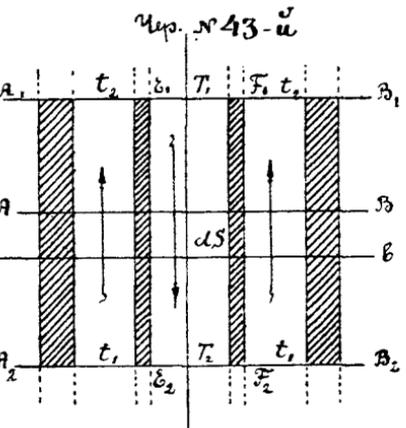
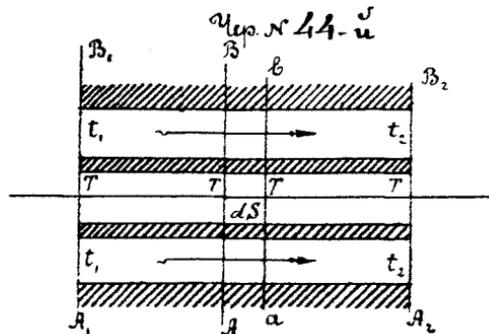
**5) Выраженіе для поверхности нагрѣва въ случаѣ противотоковъ.**

Пользуясь обозначеніями черт. № 43 и замѣчая, что въ случаѣ противотоковъ въ формулахъ (20) и (21)  $t_1$  и  $t_2$  мѣняются мѣстами и мѣняется знакъ (+) передъ  $dt$  на (—) можемъ, не производя выкладокъ, написать для поверхности нагрѣва  $S_2$  окончательныя выраженія, аналогичныя (20) и (21) именно:

$$S_2 = \frac{W_1 - W_2}{K [T_1 - T_2 - t_2 + t_1]} \lg_{\text{nat}} \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \quad (22)$$

а при обыкновенныхъ логарифмахъ:

$$S_2 = \frac{W_1 - W_2}{K [T_1 - T_2 - t_2 + t_1]} \cdot 2,3026 \lg \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \quad (23)$$



**6) Выраженіе для поверхности нагрѣва въ случаѣ неподвижности среды, отдающей теплоту. (Черт. 44).**

Если въ средѣ, отдающей теплоту, не замѣчается теченія въ обычномъ смыслѣ слова, а наблюдается лишь перемѣщеніе болѣе или менѣе нагрѣтыхъ частицъ (циркуляція) тогда въ любомъ сѣченіи АВ, со-

отвѣтствующемъ участку поверхности  $S$ , равно и въ безконечно къ нему близкомъ сѣченіи  $ab$ , соответствующемъ поверхности  $S + dS$

средняя  $t$ -ра среды отдающей теплоту, одинаковы и равны  $T$ ; таковы же должны быть  $t$ -ры и во всѣхъ прочихъ точкахъ и сѣченіяхъ отъ начальнаго  $A_1B_1$  до конечнаго  $A_2B_2$

$$\text{т.-е. } T_1 = T_2 = T; \quad T_1 - T_2 = 0.$$

При этихъ условіяхъ ур-ніе (20) доставляетъ;

$$S_3 = \frac{W_1 - W_2}{K(t_2 - t_1)} \cdot \lg_{\text{nat}} \frac{T - t_1}{T - t_2} \dots \dots \dots (24)$$

а при обыкновенныхъ логарифмахъ:

$$S_3 = \frac{W_1 - W_2}{K(t_2 - t_1)} \cdot 2,3026 \lg \frac{T - t_1}{T - t_2} \dots \dots \dots (25)$$

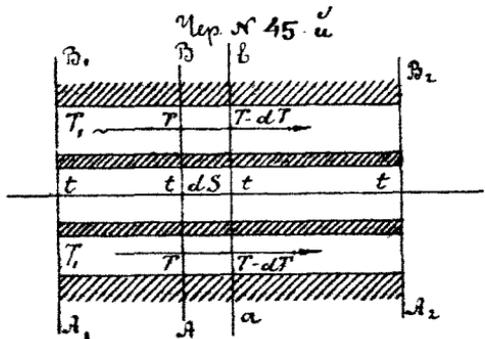
Подобныя условія осуществляются при нагрѣваніи воздуха въ вентиляціонныхъ камерахъ цилиндрическими горизонтальными нагрѣвательными приборами большой теплоемкости. Для каждаго разсматриваемаго момента времени, говоря теоретически, средняя  $t$ -ра воды въ цилиндрѣ и  $t$ -ра всѣхъ точекъ его поверхности одинаковы и равны  $T$ , тогда какъ  $t$ -ра нагрѣваемаго воздуха мѣняется отъ  $t_1$  до  $t_2$ .

**6) Выраженіе для поверхности нагрѣва  $S_4$  съ неподвижной средой, воспринимающей теплоту. (Черт. 45).**

Въ этомъ случаѣ ур-ніе (20) доставляетъ: при  $t = \text{const}$  и при  $t_1 = t_2 = t = \text{const}$   $t_2 - t_1 = 0$ ;

$$S_4 = \frac{W_1 - W_2}{K[T_1 - T_2]} \lg_{\text{nat}} \frac{T_1 - t}{T_2 - t} \dots \dots \dots (26)$$

или  $S_4 = \frac{W_1 - W_2}{K[T_1 - T_2]} \cdot 2,3026 \lg \frac{T_1 - t}{T_2 - t} \dots \dots \dots (27)$



Это есть случай котельной поверхности, воспринимающей теплоту отъ протекающихъ вдоль нея дымовыхъ газовъ.

$T$ -ра газовъ отъ  $T_1$  понижается до  $T_2$  къ концу поверхности,  $t$ -ра же воды въ котлѣ и его поверхности для всѣхъ точекъ ея одинакова и равна  $t$ .

Анализъ выражений (20), (22) и (26) показываетъ, что наибыгод-

нѣйшія условія теплопередачи осуществляются въ случаѣ встрѣчнаго течения потоковъ, обмѣнивающихся теплотою, за нимъ слѣдуетъ случай параллельнаго течения и самымъ невыгоднымъ является случай котельной поверхности.

7) Способъ приближеннаго вычисленія всеобщаго коэффиціента теплопередачи  $K_{ср}$  въ случаѣ перешитныхъ т-рѣ срединъ, обѣтвивающихся теплою и при значительныхъ разностяхъ т-рѣ по обѣ стороны раздѣлительной стѣнки.

Во всѣхъ тѣхъ случаяхъ, когда по одну сторону нагрѣвательной поверхности движутся горячіе дымовые газы, а по другую находится воздухъ, воспринимающій теплоту, намъ приходится имѣть дѣло съ очень значительными т-рами дымовыхъ газовъ, а слѣдовательно и съ столь значительными температурными разностями, при которыхъ формулы Ньютона, Дюлонга и Пекле перестаютъ давать результаты годные для техническихъ вычисленій.

За отсутствіемъ какихъ-нибудь другихъ, хотя бы относительно точныхъ способовъ, приходится до сихъ поръ довольствоваться приближеннымъ способомъ вычисленія  $K$ , основаннымъ на слѣдующемъ разсужденіи, примененномъ нами къ случаю противотоковъ.

Горячіе дымовые газы съ начальной т-рой  $T_1$  движутся сверху внизъ; длину пути проходимаго газами въ нисходящемъ движеніи въ предѣлахъ высоты нагрѣвательной поверхности обозначимъ черезъ  $h$ .

Пусть въ концѣ этого пути, покидая поверхность нагрѣва, газы имѣютъ нѣкоторую значительно низшую т-ру  $T_2$ .

Навстрѣчу нисходящему потоку дымовыхъ газовъ снизу вверхъ движется нагрѣваемый воздухъ въ руслѣ огражденномъ матеріальными абсолютно не теплопроводными стѣнками.

Внизу въ началѣ соприкосновенія съ нагрѣвательной поверхностью начальная т-ра воздуха пусть будетъ  $t_1$ , а послѣ прохождения пути  $h$  при отходѣ отъ нагрѣвательной поверхности пусть т-ра воздуха равна высшей т-рѣ  $t_2$ .

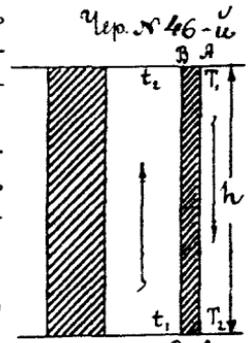
Положимъ, что стѣнка однородна и состоитъ только изъ одного слоя толщины  $e$ ; коэффиціентъ внутренней теплопроводности матеріала стѣнки обозначимъ черезъ  $\lambda$ :

Не принимая пока во вниманіе вліяніе большой температурной разности, можемъ написать для  $K$  общее выраженіе въ случаѣ простой вертикальной стѣнки въ формѣ:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q_2}} \dots \dots \dots (1)$$

Такъ какъ въ силу большой т-рной разности нельзя воспользо-ваться для выраженія коэффиціентовъ  $Q_1$  и  $Q_2$  ни формулой Ньютона, ни формулой Пекле и такъ какъ въ числѣ данныхъ имѣется высота  $h$  и задана форма и родъ поверхности, то можемъ воспользо-ваться данною въ главѣ I-й формулою Дюлонга въ русскихъ мѣрахъ.

Воспріятіе теплоты поверхностью  $AA$  и отдача ея поверхностью  $BB$  въ данныхъ условіяхъ совершаются только путемъ соприкосновенія; поэтому, обозначивъ черезъ  $k_1'$  и  $k_1''$  коэффиціенты воспріяті-



тія и отдачи теплоты соприкосновеніемъ съ вертикальной плоскостью высоты  $h$ , имѣемъ:  $Q_1 = k_1'$ ;  $Q_2 = k_1''$ ; такъ какъ обѣ поверхности стѣнки имѣютъ одинаковую высоту  $h$  и обѣ суть вертикальныя плоскости то, по смыслу коэффиціентовъ въ таблицахъ Дюлонга; надо положить

$$k_1' = k_1'' = Q_1 = Q_2 \dots \dots \dots (a)$$

Что доставляетъ для  $K_1$  значеніе:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{2}{Q_1} + \frac{e}{\lambda}} = \frac{1}{\frac{2}{k_1'} + \frac{e}{\lambda}} \dots \dots \dots (c)$$

Далѣе, для начала поверхности вверху имѣемъ  $t$ —ру дымовыхъ газовъ  $T_1$  и воздуха  $t_2$ ; обозначимъ для начала же поверхности неизвѣстныя намъ пока:  $t$ —ру поверхности  $\overline{AA}$ , со стороны дымовыхъ газовъ черезъ  $T'$ , а поверхности  $\overline{BB}$ —со стороны воздуха черезъ  $t'$ , и тогда для періода установившагося дѣйствія теплопередачи количества теплоты *воспринимаемой* въ ед—цу времени, ед—цей поверхности  $\overline{AA}$ , *проводимой* сквозь толщю стѣнки  $\overline{AB}$  и *отдаваемой* воздуху ед—цей поверхности  $\overline{BB}$  должны быть равны; обозначивъ ихъ черезъ  $n$ , можемъ написать:

$$n = Q_1(T_1 - T'); n = \frac{\lambda}{e}(T' - t'); n = Q_2(t' - t_2) \dots \dots \dots (d)$$

зная же всеобщій коэффиціентъ  $K_1$  это же количество теплоты  $n$  можемъ выразить черезъ:

$$n = K_1[T_1 - t_2] \dots \dots \dots (e)$$

Первое изъ ур—ній системы (d) и ур—ніе (e) доставляютъ:

$$Q_1(T_1 - T') = K_1[T_1 - t_2]$$

откуда:

$$T_1 - T' = \frac{K_1[T_1 - t_2]}{Q_1} \dots \dots \dots (f)$$

Точно также изъ третьяго ур—нія системы (d) и ур—ніе (f) находимъ:

$$Q_2(t' - t_2) = K_1[T_1 - t_2] \dots \dots \dots (k)$$

откуда:

$$t' - t_2 = \frac{K_1[T_1 - t_2]}{Q_2}$$

При  $Q_1 = Q_2$  ур—нія (f) и (k) доставляютъ:

$$T_1 - T' = t' - t_2 = \frac{K_1[T_1 - t_2]}{k_1'} \dots \dots \dots (l)$$

имѣя первыя, приближенныя значенія температурныхъ разностей срединъ и поверхностей

$$T_1 - T' = t' - t_2$$

можем воспользоваться ими для определения болѣе точнаго второго приближеннаго значенія для  $K_2$  дѣйствительно:

Принимая во вниманіе вліяніе этихъ разностей на величину основныхъ коэффициентовъ, мы должны для вертикальной плоскости AA вмѣсто  $Q_1 = k_1$ : написать по Дюлонгу:

$$Q_1 = \alpha_1' k_1'$$

гдѣ значеніе  $k_1'$  прежнее, значеніе же коэффициента  $\alpha_1'$  должно быть взято по таблицѣ № 5-й въ зависимости отъ величины  $(T_1 - T')$ .

Точно также вмѣсто  $Q_2$  слѣдуетъ принимать:

$$Q_2 = \alpha_1'' k_1''$$

гдѣ  $\alpha_1''$  зависитъ отъ разности  $(t' - t_2)$ ; въ данномъ случаѣ въ силу равенства:

$$T_1 - T' = t' - t_2$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_1' = \alpha_1'' \\ k_1' = k_1'' \end{array} \right\} \text{поэтому и } Q_1 = Q_2 = \alpha_1' k_1'$$

При этихъ данныхъ, новое выраженіе для  $K_2$  имѣетъ видъ:

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q_2}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1' k_1'} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1' k_1'}} = \frac{1}{\frac{2}{\alpha_1' k_1'} + \frac{e}{\lambda}} \dots (2)$$

Повторяя подобныя операціи нѣсколько разъ, найдемъ въ концѣ концовъ два такихъ, слѣдующихъ другъ за другомъ значенія, для  $K_{n-1}$  и  $K_n$ , которыя будутъ различаться одно отъ другого безконечно мало: послѣднее изъ нихъ и слѣдуетъ принять за расчетное.

Путемъ совершенно аналогичныхъ разсужденій и выкладокъ находится значеніе всеобщаго коэффициента  $K'_n$  для конца поверхности. Наконецъ, взявъ среднее арифметическое изъ коэффициентовъ  $K_n$  и  $K'_n$  найдемъ:

$$K_{cp} = \frac{K_n + K'_n}{2} \dots \dots \dots (3)$$

Значеніе  $K_{cp}$  и слѣдуетъ подставить въ соотвѣтствующее ур—ніе для поверхности нагрѣва—въ данномъ случаѣ въ ур—ніе противотоковъ.

Таковъ общій ходъ отысканія всеобщаго коэффициента теплопередачи  $K_{cp}$ .

Нами взятъ былъ сравнительно простой случай, когда воспріятіе и отдача теплоты совершаются только соприкосновеніемъ, въ общемъ же случаѣ отдача тепла можетъ совершаться, кромѣ соприкосновенія еще и путемъ лучеиспусканія; тогда, конечно  $Q_1$  не равно  $Q_2$  и въ выраженіе для  $Q_2$  должны быть введены члены, характеризующіе это осложненіе въ формѣ, данной Дюлонгомъ. (См. главу I-ю).

Нижеслѣдующій численный примѣръ поможетъ уясненію механизма вычисленій, данныхъ выше въ общемъ видѣ.

Численный примѣръ № 1.

Въ печи большой теплоемкости, назначенной исключительно для нагрѣванія вентиляціоннаго воздуха, вводимаго въ печную камеру у ея пола при  $t_1 = -15^\circ\text{C}$ . и выпускаемаго у потолка при  $t_2 = +20^\circ\text{C}$ . нагрѣвательная поверхность представляет собою внѣшнія стѣнки опускныхъ дымоходовъ—колодцевъ.

Печь должна пропустить въ часъ 50 куб. саж. воздуха, подогрѣвая его отъ  $t_1 = -15^\circ\text{C}$ . до  $t_2 = +20^\circ\text{C}$ . Слѣдовательно, камерная поверхность нагрѣва  $S_2$  должна доставлять ежечасно количество теплоты равное:

$$W = 7,2(t_2 - t_1)50 = 7,2 \times [20 - (-15)]50 = 12600 \text{ ф/ц. ед.}$$

Стѣнки опускныхъ колодцевъ сложены изъ 8-ми фунтового гжельскаго кирпича на бѣлой глинѣ толщиною въ  $\frac{1}{2}$  кирпича; ( $e = 4,5$  дюйм.  $= 0,375$  фут.) безъ всякой облицовки.

Требуется вычислить необходимую поверхность нагрѣва  $S_2$ . (Случай противотоковъ). Топливо—березовыя дрова; стѣнки топливника и I-го восходящаго дымохода въ передачѣ теплоты не участвуютъ \*). Зададимся, хотя бы приблизительноной  $t$ -рой дымовыхъ газовъ у начала нагрѣвательной поверхности.

По формулѣ Пересвѣтъ-Солтана (см. II отд. стр. 248—249) при дровахъ  $t$ -ра въ топливникѣ при двойномъ впускѣ воздуха:

$$T = 850 - (2 - 2)150 = +850^\circ\text{C}.$$

Средняя  $t$ -ра въ восходящемъ дымоходѣ

$$T_1 = 0,70T = 0,70 \times 850 = +595^\circ\text{C} \approx +600^\circ\text{C}.$$

Положимъ, что при короткой длинѣ восходящаго дымохода  $t$ -ра дымовыхъ газовъ у начала поверхности нагрѣва всюду одинакова и равна средней  $t$ -рѣ въ восходящемъ дымоходѣ, т. е.

$$T_1 = +600^\circ\text{C}.$$

примемъ  $t$ -ру дымовыхъ газовъ при оставленіи ими колодцевъ и при переходѣ въ дымовой борозѣ  $T_2 = +250^\circ\text{C}$ ., (полагая  $t$ -ру у задвижки у основанія трубы не болѣе  $+200^\circ\text{C}$ .).

Высоту поверхности нагрѣва  $h$  назначаемъ равной 8 фут.

*a) Для начала поверхности.*

Не принимая во вниманіе вліянія температурныхъ разностей при данныхъ условіяхъ имѣемъ для перваго опредѣленія  $K_1$  выраженіе:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q_2}};$$

\*) Это ограниченіе введено для того, чтобы упростить формулы, устранивъ воспріятіе теплоты лученспускаемъ пламени въ топливникѣ и I-мъ дымоходѣ, точно также предполагается, что всѣ участки поверхности нагрѣва прогрѣты одинаково и не лученспускаютъ въ стѣнкамъ камернаго огражденія.

длѣ:

$Q_1 = k_1' =$  (для вертикальной плоскости  $h = 8$  фут.)  $= 0,4926$ ;  
(Табл. № 3-й).

$$Q_2 = k_1'' = k_1' = 0,4926;$$

$$e = 0,375 \text{ фут.}$$

$\lambda =$  (для плотной обожженной глины въ среднемъ  $=$

$$= \frac{0,69 + 0,51}{2} = 0,60; \text{ (Табл. № 1-й).}$$

Поэтому:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{0,4926} + \frac{0,375}{0,60} + \frac{1}{0,4926}} = \frac{1}{4,625} \cong 0,22 \text{ ф/ц.}$$

$$T_1 - T' = t' - t_2 = \frac{K_1(T_1 - t_2)}{k_1'} = \frac{0,22(600 - 20)}{0,4926} = 260^\circ\text{C.}$$

дальѣ:

$$Q_1 = Q_2 = \alpha_1' k_1' = \alpha_1'' k_1'';$$

при

$$T_1 - T' = t' - t_2 = 260^\circ\text{C.}$$

$$\alpha_1' = 1,9673; \text{ (Табл. № 5-й).}$$

поэтому:

$$Q_1 = Q_2 = 1,9673 \times 0,4926 = 0,98;$$

новое значеніе:

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{0,98} + \frac{0,375}{0,60} + \frac{1}{0,98}} = \frac{1}{2,67} \cong 0,40 \text{ ф/ц.}$$

дальѣ:

$$T_1 - T' = t' - t_2 = \frac{0,40(600 - 20)}{0,98} = 236^\circ\text{C.}$$

при

$$T_1 - T' = t' - t_2 = 236^\circ\text{C.}$$

$$\alpha_1' = 1,9134;$$

$$Q_1 = Q_2 = \alpha_1' k_1' = 1,9134 \times 0,4926 = 0,94.$$

Третье значеніе для  $K_3$

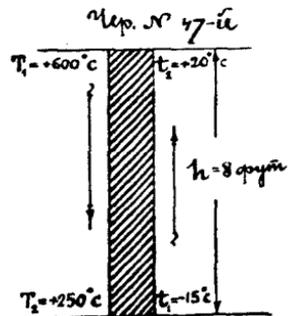
$$K_3 = \frac{1}{\frac{1}{0,94} + 0,625 + \frac{1}{0,94}} = \frac{1}{2,75} = 0,363 \text{ ф/ц.}$$

$$T_1 - T' = t' - t_2 = \frac{0,36(600 - 20)}{0,94} = 222^\circ\text{C.}$$

дальѣ:

$$\alpha_1' = 1,8940;$$

$$Q_1 = Q_2 = \alpha_1' k_1' = 1,8940 \times 0,4926 = 0,93;$$



четвертое значение для  $K_4$

$$K_4 = \frac{1}{\frac{1}{0,93} + 0,625 + \frac{1}{0,93}} = \frac{1}{2,775} = 0,36 \text{ ф/ц.}$$

Въ виду близости послѣднихъ двухъ значений для  $K$  принимаемъ четвертое:

$$K_4 = 0,36 \text{ ф/ц.}$$

b) Для конца поверхности.

$$K_1' = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{Q_2}};$$

первое значение для  $K_1'$ :  
 $K_1' = 0,22 \text{ ф/ц.}$

попрежнему имѣемъ:  
 $Q_1 = Q_2 = k_1' = 0,4926$   
 $e = 0,375 \text{ фут.}; \lambda = 0,60;$

$$T_2 - T'' = t'' - t_1 = \frac{K_1'(T_2 - t_1)}{k_1'} = \frac{0,22[250 - (-15)]}{0,4926} = 121^\circ\text{C.}$$

$$\alpha_1' = 1,6463; Q_1 = Q_2 = \alpha_1' k_1' = 1,6463 \times 0,4926 = 0,81$$

второе значение для  $K_2'$ :

$$K_2' = \frac{1}{\frac{2}{0,81} + 0,625} = \frac{1}{3,09} = 0,323;$$

дальше:

$$T_2 - T'' = t'' - t_1 = \frac{K_2'(T_2 - t_1)}{\alpha_1' k_1'} = \frac{0,323 \times 270}{0,81} \cong 108^\circ\text{C.}$$

$$\alpha_1' = 1,6029; Q_1 = Q_2 = \alpha_1' k_1' = 1,6029 \times 0,4926 = 0,79;$$

третье значение для  $K_3'$ :

$$K_3' = \frac{1}{\frac{2}{0,79} + 0,625} = \frac{1}{3,156} = 0,32;$$

принимаемъ послѣднее значение, какъ очень мало отличающееся отъ предыдущаго.

Среднее значение для всей поверхности

$$K_{\text{ср.}} = \frac{K_4 + K_3'}{2} = \frac{0,36 + 0,32}{2} = 0,34 \text{ ф/ц.}$$

Коэффициенту  $K_4$  соответствуют температурныя разности.

$$T_1 - T' = t' - t_2 = 222^\circ\text{C.}$$

при

$$T_1 = +600^\circ\text{C.}$$

$$t_2 = +20^\circ\text{C.}$$

т-ра поверхности вверху  
со стороны дымовыхъ газ-  
зовъ:

$$T' = 600 - 222 = +378^\circ\text{C.}$$

т—ра же со стороны камеры:

$$t' = 222 + 20 = + 242^{\circ}\text{C.}$$

Коэффициенту  $K_3'$  соответствуют разности т—ры:

$$T_2 - T'' = t'' - t_1 = 108^{\circ}\text{C.};$$

поэтому т—ра поверхности со стороны дымовыхъ газовъ внизу:

$$T'' = T_2 - 108 = 250 - 108 = + 142^{\circ}\text{C.}$$

со стороны же камеры:

$$t'' = 108^{\circ} + t_1 = 108 - 15 = + 93^{\circ}\text{C.}$$

Средняя т—ры поверхностей:

Со стороны дымовыхъ газовъ:

$$T = \frac{T' + T''}{2} = \frac{378 + 142}{2} = + 260^{\circ}\text{C.}$$

Со стороны камеры:

$$t = \frac{t' + t''}{2} = \frac{242 + 93}{2} = + 167,5^{\circ}\text{C.}$$

Для подстановленія въ ур—ніе поверхности нагрѣва съ противотоками имѣемъ слѣдующія величины:

$$W = W_1 - W_2 = 12600 \text{ ф/ц.}$$

$$K_{\text{ср}} = 0,34 \text{ ф/ц.}$$

$$T_1 = + 600^{\circ}\text{C.}$$

$$T_2 = + 250^{\circ}\text{C.}$$

$$t_1 = - 15^{\circ}\text{C.}$$

$$t_2 = + 20^{\circ}\text{C.}$$

Уравненіе для поверхности съ противотоками было выведено выше и имѣетъ видъ:

$$S_2 = \frac{W_1 - W_2}{K_{\text{ср}} [T_1 - T_2 - t_2 + t_1]} 2,3026 \lg \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1};$$

По подстановленіи получаемъ:

$$S_2 = \frac{12600}{0,34 [600 - 250 - 20 - 15]} 2,3026 \lg \frac{600 - 20}{250 + 15};$$

откуда:

$$S_2 = \frac{12600}{107,10} \cdot 2,3026 \lg \frac{580}{265} = 271,4 \lg 2,185 = 271,40 \times 0,33945 = 92,276 \text{ кв. фут.}$$

Печь даннаго въ примѣрѣ типа является массивнымъ калориферомъ; для такихъ поверхностей по Лукашевичу среднее часовое доставленіе теплоты съ 1 кв. фута составляетъ 120 ф/ц. ед.

Увеличивая, согласно указанія Веденяпина найденную выше поверхность  $S_2$  на 10% для компенсаціи потери теплоты тѣхъ частей

стѣнокъ дымоходовъ, которыя не являются нагрѣвательными, но нужны по конструктивнымъ соображеніямъ, найдемъ такую поверхность:

$$S_2' = 1,10 S_2 = 1,10 \times 92, 276 = 101,51 \text{ кв. фут.}$$

и среднее часовое доставленіе теплоты:

$$w = \frac{W}{S_2'} = \frac{12600}{101,51} \cong 124 \text{ ф/ц.}$$

Такимъ образомъ, съ помощью даннаго выше пріема, не претендующаго на строгую точность, все же получаются результаты, близко согласующіеся съ выводами, основанными на прямыхъ опытахъ.

Указаній данныхъ въ этой главѣ достаточно для рѣшенія большинства вопросовъ, касающихся поверхностей нагрѣва въ печномъ дѣлѣ, съ точностью, удовлетворяющей практическимъ потребностямъ.

## ГЛАВА IV.

### Процессъ горѣнія.

#### 1) Экзотермическіе и эндотермическіе процессы въ химіи.

Современная химія различаетъ два рода существенно различныхъ процессовъ, именно: во всѣхъ процессахъ перваго рода сумма запасовъ энергіи въ тѣлахъ, вступающихъ другъ съ другомъ въ химическую реакцію, превышаетъ количество энергіи въ продуктахъ реакціи, поэтому избытокъ энергіи освобождается и проявляется, обыкновенно въ формѣ теплоты. Подобнаго рода реакціи не требуютъ, очевидно, притока энергіи извнѣ, такъ какъ сами ее освобождаютъ.

Химическіе процессы, сопровождающіеся *выдѣленіемъ теплоты*, получили въ наукѣ названіе „*экзотермическихъ*“. Процессы втораго рода, въ виду недостаточности запасовъ энергіи въ самихъ реагирующихъ другъ съ другомъ тѣлахъ, могутъ протекать только при условіи доставленія извнѣ недостающей энергіи, въ формѣ, напримѣръ, сообщенія реагирующимъ тѣламъ извѣстнаго количества теплоты.

При химическихъ реакціяхъ этого рода *теплота поглощается*.

Химическіе процессы, сопровождающіеся *поглощеніемъ теплоты*, названы «эндотермическими».

#### 2) Горѣніе, какъ экзотермическій процессъ.

Въ самомъ общемъ смыслѣ слова всякая энергично и быстро протекающая экзотермическая реакція, сопровождающаяся обильнымъ выдѣленіемъ теплоты, а часто и свѣтовыми эффектами, можетъ быть разсматриваема какъ процессъ горѣнія, независимо отъ природы реагирующихъ тѣлъ.

Съ этой общей точки зрѣнія приходится разсматривать какъ процессы горѣнія, напримѣръ, слѣдующія экзотермическія реакціи: реакцію соединенія водорода съ кислородомъ, протекающую по ур—нію:



Продуктомъ этой реакціи является вода.

Реакцію соединенія металлической сурьмы съ хлоромъ, по ур—нію:



равно и реакція соединенія металлическаго магнія съ углекислотою по ур—нію:



Точно также экзотермической явилась бы и реакція соединенія того же металлическаго магнія съ кислородомъ; вся разница была бы только въ большей интенсивности процесса, болѣе обильномъ выдѣленіи теплоты и болѣе напряженныхъ свѣтовыхъ явленіяхъ, чѣмъ въ случаѣ соединенія его съ углекислотою.

### 3) Соединеніе тѣлъ съ кислородомъ есть частный случай въ ряду экзотермическихкихъ процессовъ.

Изъ приведенныхъ выше примѣровъ легко усмотрѣть, что экзотермическія реакціи могутъ совершаться при взаимодействіи самыхъ разнообразныхъ тѣлъ, каковы хлоръ, углекислота, кислородъ и проч. Соединеніе тѣлъ съ кислородомъ или окисленіе ихъ есть лишь одна изъ экзотермическихкихъ реакцій; особенностью этого частнаго случая является интенсивность реакцій, сопровождающихся обильнымъ выдѣленіемъ теплоты и часто накаливаніемъ окисляющагося тѣла до свѣченія, напримѣръ: горѣніе желѣза или лучины въ струѣ кислорода.

Изъ всѣхъ экзотермическихкихъ реакцій реакція окисленія должна была раньше другихъ получить практическое примѣненіе уже потому, что одинъ изъ реагентовъ, именно окислитель — кислородъ, является повсемѣстно распространеннымъ элементомъ, входя въ составъ атмосфернаго воздуха.

Окислительные процессы подъ вліяніемъ кислорода воздуха въ громадномъ масштабѣ непрерывно совершаются въ природѣ, насъ окружающей, и въ каждомъ животномъ организмѣ.

Процессы тлѣнія и гніенія органическихкихъ веществъ являются въ полной мѣрѣ процессами окисленія.

Понятіе о горѣніи обычно соединяется съ такими случаями окисленія, когда реакція сопровождается сильнымъ повышеніемъ температуры, свѣченіемъ окисляющагося тѣла; быстротою протеканія и отдѣленіемъ большого количества теплоты.

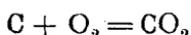
Вещества, способныя окисляться подъ вліяніемъ кислорода воздуха, называются *горючими*.

Изъ всѣхъ составныхъ частей горючаго тѣла наибольшей способностью къ окисленію съ выдѣленіемъ теплоты обладаютъ углеродъ (С), водородъ (Н) и сѣра (S), и эти вещества и являются собственно горючими элементами.

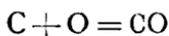
#### 4) Схематическое представленіе процесса горѣнія.

Итакъ, въ практическомъ значеніи слова, горѣніемъ называется быстро протекающая реакція соединенія углерода, водорода и сѣры, содержащихся въ горючихъ веществахъ съ кислородомъ воздуха.

Полное окисленіе углерода происходитъ по ур—нію:



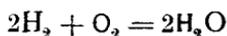
при чемъ продуктомъ горѣнія является углекислота (CO<sub>2</sub>), неполное же окисленіе протекаетъ по ур—нію:



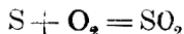
и даетъ въ результатѣ окись углерода, способную еще къ дальнѣйшему горѣнію въ углекислоту въ присутствіи свободнаго кислорода по ур—нію:



водородъ при сгораніи по ур—нію:



даетъ какъ продуктъ окисленія воду, а сѣра при окисленіи превращается въ сѣрнистый газъ:



Такова простая схема процесса горѣнія.

Въ практическихъ условіяхъ, однакоже, явленія, сопровождающія процессъ окисленія горючихъ элементовъ, неизмѣримо сложнѣе, чѣмъ это представляется вначалѣ.

Изученіе всѣхъ побочныхъ явленій, осложняющихъ процессъ горѣнія, далеко нельзя назвать законченнымъ и въ настоящее время.

Относительно процессовъ, происходящихъ при сжиганіи горючихъ веществъ, приходится допускать болѣе или менѣе вѣроятныя гипотезы и искать путемъ непосредственныхъ измѣреній ихъ подтвержденія, замѣняя неизвѣстные намъ еще законы явленій поправочными коэффициентами.

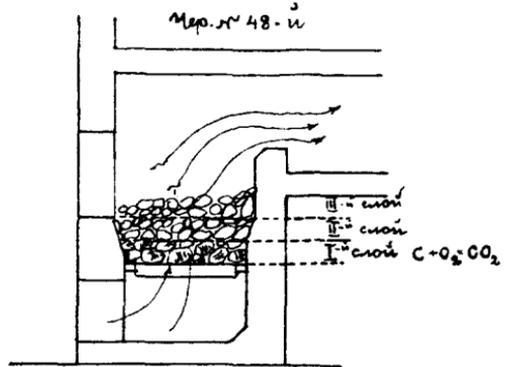
#### 5) Явленія, сопровождающія процессъ горѣнія въ случаяхъ практическаго сжиганія горючихъ веществъ.

Горючія вещества, примѣняемая въ качествѣ топлива, содержатъ кромѣ углерода, водорода и сѣры еще азотъ, влагу и минеральныя вещества, напримѣръ: фосфоръ, кремнекислоту, окись желѣза, окись алюминія, окиси щелочныхъ и щелочноземельныхъ металловъ и др.

Реакція окислення обусловлюється присутствієм кислорода воздуха; недостатокъ или избытокъ кислорода вліяють на полноту окислення и интенсивность реакції; легкость доступа кислороду ко всей массѣ горючаго вещества или наоборотъ, затрудненность его прониканія существенно вліяють на характеръ промежуточныхъ реакцій.

Оставляя пока въ сторонѣ всѣ осложняющія вопросъ обстоятельства, прослѣдимъ процессы, происходящіе при практическомъ сжиганіи такого воображаемаго топлива, въ составъ котораго входитъ изъ горючихъ веществъ только углеродъ и водородъ \*).

Представимъ себѣ, что слой топлива расположенъ на горизонтальной рѣшеткѣ топki см. черт. № 48-й, причеиъ необходимый для горѣнія воздухъ притекаетъ черезъ поддувальное отверстие подъ рѣшетку снизу и силою механической тяги или силою разреженія дымовой трубы протягивается сквозь всю толщуг топлива.



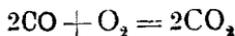
Въ настоящее время техника представляет себѣ послѣдовательность явленій въ слѣдующемъ порядкѣ: въ са-момъ нижнемъ I-мъ слоѣ раскаленнаго топлива (если разсматривать процессъ установившагося дѣйствія) прилегающемъ непосредственно къ поверхности колосниковъ, кислородъ воздуха притекаетъ подъ рѣшетку въ избыткѣ, быстро соединяется съ раскаленнымъ углеродомъ и поэтому послѣдній полностью сгораетъ въ углекислоту по ур—нію:



Эта углекислота въ смѣси съ избыткомъ кислорода воздуха и азотомъ попадаетъ въ слѣдующій II-й слой также раскаленнаго углерода C и возстановляется въ окись углерода по ур—нію:



Въ слѣдующемъ слоѣ, если тяга воздуха сквозь толщуг топлива достаточно велика, чтобы преодолѣвать сопротивленія слоевъ, окись углерода легко соединяется съ избыткомъ кислорода, сгорая снова и окончательно въ углекислоту по ур—нію:

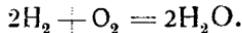


\*) Къ такому идеальному топливу ближе всѣхъ видовъ по своимъ свойствамъ приближается антрацитъ, содержащій до 93% углерода, около 4% водорода и около 3% кислорода и азота при ничтожномъ содержаніи влаги.

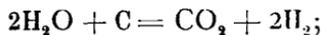
надъ послѣднимъ верхнимъ слоемъ въ предѣлахъ топочнаго пространства.

Одновременно съ описанными процессами идетъ процессъ горѣнія водорода.

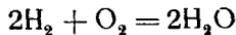
Въ нижнихъ раскаленныхъ слояхъ непосредственно надъ рѣшеткой при избыткѣ кислорода водородъ сгораетъ въ водяной паръ по ур—нію:



Въ слѣдующемъ слое раскаленного углерода (С) водяной паръ при 1000°С. разлагается согласно равенству:

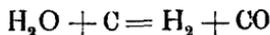


доставляя углекислоту и освобождаетъ снова водородъ, послѣдній же при избыткѣ кислорода (хорошая тяга) снова сгораетъ въ водяной паръ по ур—нію:



удаляющагося пространства вмѣстѣ съ углекислотою какъ окончательнымъ продуктомъ полного сгорания углерода.

Если водяной паръ  $2\text{H}_2\text{O}$  попадаетъ при восходящемъ своемъ движеніи въ слой раскаленного углерода съ температурою, превышающей 1200°С. то разлагается по ур—нію:



Водородъ  $\text{H}_2$  въ дальнѣйшемъ соединеніи съ кислородомъ сгораетъ въ водяной паръ, а окись углерода въ углекислоту.

Взятый нами простой случай наглядно показываетъ сложность процессовъ горѣнія въ практикѣ.

Введемъ теперь еще неизбѣжныя побочныя явленія, зависящія отъ физическихъ и химическихъ свойствъ топлива т.-е. отъ его состава.

Прежде всего въ составѣ топлива присутствуетъ вода  $\text{H}_2\text{O}$ , которая испаряется въ первомъ періодѣ процесса горѣнія, т.-е. въ періодѣ его нагрѣванія при температурѣ около  $+100^\circ\text{C}$ .

Такъ какъ всѣ виды топлива содержатъ въ своемъ составѣ органическую часть, состоящую изъ водорода, кислорода и азота, то при температурѣ близкой къ  $+150^\circ\text{C}$ . начинается распадение этой органической части въ слѣдующей формѣ: водородъ выдѣляется въ свободномъ видѣ, частью соединяется съ кислородомъ въ водяной паръ и частью съ углеродомъ въ тяжелые углеводороды.

Эти тяжелые углеводороды подѣ дѣйствіемъ высокой температурѣ вновь распадаются, освобождая углеродъ, и переходятъ въ соединенія метанъ (болотный газъ) и этиленъ (маслородный газъ); болѣе устойчивыя, какъ  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ , различныя смолы и проч.

Иногда же водородъ можетъ соединяться съ углеродомъ и кле-

лородомъ въ стойкія кислородныя соединенія уксусную кислоту  $C_2H_4O_2$ , древесный спиртъ  $CH_4O$  и феноль  $C_6H_6O$ .

Азотъ, вообще, содержится въ топливѣ въ незначительныхъ количествахъ и въ присутствіи раскаленного топлива даетъ амміакъ и синеродистыя соединенія.

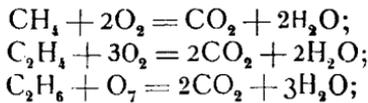
Совокупность летучихъ продуктовъ распада органической части топлива представляетъ собою составъ свѣтильнаго газа, сгорающаго совмѣстно съ прочими продуктами въ предѣлахъ точнаго пространства.

Кромѣ газообразныхъ горючихъ продуктовъ распада органической части топлива получаютъ при разложеніи и твердыя вещества, каковъ углеродъ въ формѣ древеснаго угля или кокса.

Вещества эти сгораютъ съ остальной массой топлива.

Углеводороды, получившіеся въ результатѣ распада органической части горячаго вещества.

Метанъ ( $CH_4$ ); этиленъ ( $C_2H_4$ ) и этанъ ( $C_2H_6$ ) при достаточномъ притокѣ кислорода воздуха сгораютъ полностью въ углекислоту и воду по ур-ніямъ:

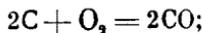


И такъ, въ концѣ концовъ при достаточной тягѣ и избыткѣ кислорода воздуха, вводимаго въ топку подъ рѣшетку, процессъ горѣнія при всей своей сложности заканчивается образованіемъ продуктовъ  $CO_2$  и  $2H_2O$ .

### б) Неполное горѣніе.

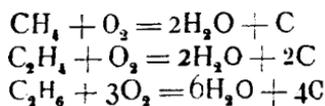
Въ томъ случаѣ, когда свободному прониканію кислорода воздуха въ толщу слоя топлива встрѣчаются препятствія и количество его недостаточно для окисленія картина горѣнія нѣсколько иная:

а) Часть углерода топлива при этомъ можетъ сгорать только въ окись углерода по ур-нію:



б) Углеводороды, образовавшіеся послѣ распада органической части топлива:  $CH_4$ ;  $C_2H_4$ ;  $C_2H_6$ , не могутъ сгорать полностью: изъ нихъ прежде всего выгораетъ весь водородъ; углеродъ же освобождается, не успѣвая сгорать и даетъ газообразнымъ продуктамъ горѣнія желтую и сѣрую окраску (густой, темный дымъ);

Реакціи неполнаго окисленія этихъ углеводородовъ могутъ протекать по слѣдующимъ ур-ніямъ:



Процессъ неполнаго горѣнія характеризуется присутствіемъ продуктовъ неполнаго окисленія, способныхъ при надлежащей температурѣ и притокѣ кислорода къ дальнѣйшему сгоранію.

Если представить себѣ, что теченіе процесса горѣнія все время нарушается неравномѣрнымъ притеканіемъ воздуха подъ рѣшетку, впускомъ воздуха поверхъ слоя топлива при открываніи загрузочной дверцы введеніемъ порцій свѣжаго топлива, непостоянствомъ состава отдѣльныхъ загрузокъ, колебаніями тяги въ топкѣ, измѣненіемъ толщины слоя топлива и температуры въ различныхъ мѣстахъ слоя и въ пространствѣ надъ топливомъ, то легко понять на сколько сложна картина горѣнія даже въ самыхъ простыхъ случаяхъ.

### 7) Температура воспламененія.

Въ природѣ непрерывно совершается безчисленное множество окислительныхъ процессовъ, которые, однакоже, не могутъ быть подведены подъ опредѣленіе горѣнія въ тѣсномъ смыслѣ слова, такъ: массы угля, торфа, дровъ и проч. лежащихъ на открытомъ воздухѣ, несомнѣнно окисляются подъ вліяніемъ атмосфернаго кислорода, но настолько медленно, что ходъ процесса неуловимъ въ теченіе очень большихъ періодовъ времени. Точно также, заключенная въ герметически закрытый сосудъ, газовая смѣсь водорода и кислорода не обнаруживаетъ при обыкновенныхъ температурныхъ условіяхъ никакихъ признаковъ реакціи неопредѣленно долгое время, но уже при  $+450^{\circ}\text{C}$  для образованія изъ названной газовой смѣси воды достаточно нѣсколькихъ дней.

При  $+600^{\circ}\text{C}$  реакція заканчивается въ нѣсколько секундъ.

Горѣніе куска антрацита при  $+700^{\circ}\text{C}$  будетъ только начинаться и протекать очень медленно, тотъ же антрацитъ очень быстро сгоритъ при  $+1200^{\circ}\text{C}$ .

Такимъ образомъ одни и тѣ же горючія вещества способны окисляться при очень различныхъ температурахъ при чемъ скорость реакціи находится въ прямой зависимости отъ этихъ температуръ, т. е. съ пониженіемъ температуры замедляется процессъ окисленія и наоборотъ, ускоряется съ повышеніемъ послѣдней.

Для каждаго горючаго тѣла существуетъ тотъ minimum температуры, при которомъ начинается окисленіе на столько интенсивное, что его можно назвать горѣніемъ въ практическомъ смыслѣ слова.

Этотъ нижній предѣлъ температуры горѣнія  $T_{\min}$  называется «температурою воспламененія».

Важную роль температуры въ процессѣ воспламененія объясняютъ слѣдующимъ образомъ.

Такъ какъ горѣніе разсматривается какъ соединеніе молекулъ углерода, водорода и прочихъ горючихъ элементовъ съ молекулами кислорода воздуха, то соединеніе это будетъ тѣмъ быстрѣе и легче, чѣмъ тѣснѣе соприкасаются между собою реагирующія молекулы; дисгрегация

топлива состоитъ въ разложеніи его на составныя части и на превращеніе его горючихъ элементовъ въ вещества газообразныя—этотъ процессъ предшествуетъ горѣнію.

По ученію кинетической теоріи, частицы разнородныхъ газовъ находятся въ непрерывномъ движеніи, при чемъ газы способны проникать другъ въ друга или диффундировать. При этомъ явленіи взаимной диффузіи молекулы ихъ и могутъ сближаться.

Извѣстно, что скорость движенія газовыхъ молекулъ возрастаетъ съ повышеніемъ температуры, слѣдовательно, при этомъ увеличивается и число столкновеній молекулъ разнородныхъ реагирующихъ газовъ, т. е. быстрѣе достигается ихъ перемѣшиваніе и повышается интенсивность процесса соединенія т. е. горѣнія.

Въ нижеслѣдующей таблицѣ указаны температуры воспламененія нѣкоторыхъ тѣлъ.

**Т а б л и ц а № 18-й**

температуръ воспламененія  $T_{\min}$  для нѣкоторыхъ тѣлъ.

Вещества.	$T_{\min}$ °C		Вещества.	$T_{\min}$ °C.
	въ кислородѣ.	въ воздухѣ.		
<b>1) Газообразныя.</b>			<b>2) Твердыя и жидкія.</b>	
Водородъ (H) . . . . .	+585	+585	Сухое дерево. . . . .	+300
Окись углерода (CO) . . . . .	+650	+651	Древесный уголь . . . . .	+370
Метанъ (CH <sub>4</sub> ) . . . . .	+628	+700	Торфъ сухой. . . . .	+200
Этиленъ (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) . . . . .	+510	+543	Лигнитъ . . . . .	+450
Ацетиленъ (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ) . . . . .	+428	+429	Гартаульск. уголь. . . . .	+408
Сѣроводородъ . . . . .	+227	+364	Карлифъ . . . . .	+477
Цианъ . . . . .	+811	+856	Донецкій уголь. . . . .	
Воздухъ . . . . .	+580°С	—	Антрацитъ. . . . .	+700
			Коксъ . . . . .	+700
			Сырая нефть. . . . .	+25°С
			Мазуть. . . . .	+80°С+170°С
			Фосфоръ . . . . .	+60
			Сѣра. . . . .	+285

для того, чтобы процессъ горѣнія, разъ начавшись, въ моментъ достиженія температуры воспламененія не прерывался, необходимо, чтобы въ дальнѣйшемъ температура не была ниже  $T_{\min}$  въ противномъ

случаѣ для горѣнія понадобился бы притокъ теплоты изъ посторонняго источника и рассматриваемое вещество перестало бы удовлетворять основному требованію: выдѣлять, а не поглощать извнѣ теплоту— перестало бы быть горючимъ веществомъ.

Графитъ или алмазъ могутъ загорѣться по достиженіи соотвѣтствующаго  $T$  min, но ихъ горѣніе не можетъ продолжаться безъ доставленія теплоты извнѣ.

### 8) Пламя.

Газообразные продукты распада топлива при своемъ горѣніи даютъ пламя.

Свѣтимость пламени объясняется присутствіемъ въ струѣ горящихъ газовъ частицъ раскаленнаго углерода; свѣтимость пламени наблюдается всегда при горѣніи углеводородовъ; иногда имѣетъ мѣсто окрашиваніе пламени парами различныхъ металловъ, напримѣръ: калия, натрія и др.

Длина пламени, какъ указываетъ проф. Бляхеръ, зависитъ отъ многихъ причинъ, часть которыхъ еще недостаточно изучена. Главнѣйшими, повидимому, являются:

а) Средняя длина пути поступательнаго движенія газовыхъ молекулъ. При прочихъ равныхъ условіяхъ длина пламени будетъ больше у газовъ съ большей длиной пути.

Займствуемъ изъ книги проф. Бляхера данныя относительно молекулярныхъ скоростей и среднихъ длинъ пути нѣкоторыхъ газовъ:

	Молекулярная скорость:	Средняя длина пути:
Для углекислоты при 0°С .	361 mtr./sec.	680 × 10 <sup>3</sup> ст.
„ окиси углерода „ „ .	454 „	985 × „
„ водорода „ „ .	1698 „	1855 × „
„ кислорода „ „ .	425 „	1059 × „
„ воздуха „ „ .	477 „	950 × „
„ паровъ воды „ „ .	566 „	649 × „

б) Количество кислорода, необходимое для сжиганія одной молекулы газа, очень замѣтно отражается на длинѣ пламени: чѣмъ больше требуется кислорода въ этомъ случаѣ, тѣмъ длиннѣе пламя, такъ какъ частицы газа должны пройти большій путь, чтобы соединиться съ достаточнымъ количествомъ кислорода.

в) Избытокъ воздуха, а слѣдовательно и кислорода въ немъ, обуславливаетъ укороченіе пламени, уменьшая длину пути газовыхъ молекулъ, соединяющихся съ достаточнымъ количествомъ кислорода.

д) Примѣсъ негорючихъ газовъ растягиваетъ пламя, затрудняя соединеніе молекулъ горючихъ газовъ съ кислородомъ и тѣмъ удлиняя путь этихъ молекулъ.

е) Напряженіе свѣта пламени зависитъ отъ температуры и избытка воздуха (кислорода).

Тусклое, коптящее пламя обуславливается недостатком кислорода: углерод не успевает сгорать и часть его в видѣ мелкихъ твердыхъ частицъ увлекается съ пламенемъ, образуя копотъ и окрашивая летучіе продукты горѣнія въ темный цвѣтъ.

Уменьшеніе яркости пламени можетъ быть достигнуто и избыткомъ холоднаго воздуха, такъ какъ послѣдній, отнимая большое количество теплоты на нагрѣваніе своего азота, сильно понижаетъ температуру горѣнія.

Желто-красное пламя при слабо окрашенномъ въ сѣрый цвѣтъ дымѣ указываетъ на достаточность притока кислорода.

Яркое бѣлое и синеватое пламя при безцвѣтномъ дымѣ характеризуетъ избытокъ кислорода.

f) Форма пламени зависитъ отъ конструкціи топливника.

h) По отношенію къ длинѣ пламени топлива раздѣляются на три класса:

Топлива горящія безъ пламени: коксъ, древесный уголь, антрацитъ; всѣ они характеризуются малымъ содержаніемъ водорода и кислорода въ своемъ составѣ.

Топлива съ короткимъ пламенемъ, на примѣръ, жирный полуантрацитовый кардифскій уголь, содержащій не свыше 5%, по вѣсу водорода и не болѣе 1% кислорода.

Длиннопламенные топлива, къ которымъ принадлежатъ всѣ древесные и растительные виды, торфъ и длинно-пламенные угли. Всѣ эти виды содержатъ много водорода и кислорода.

### 9. Температура горѣнія.

Выше было указано, что температура воспламененія  $T_{\min}$  есть нижній предѣлъ температуры, при которомъ начинается устойчивое горѣніе.

При установившемся процессѣ горѣнія температура необходимо должна быть гораздо выше начальной.

Температура горѣнія *прямо зависитъ отъ избытка кислорода, отъ величины абсолютной теплопроизводительной способности топлива  $K$ ; она также обратно пропорціональна теплоемкости и вѣсу продуктовъ горѣнія.*

Для каждаго вида топлива существуетъ *максимальная температура горѣнія  $T_{\max}$ ; достиженіе этой температуры зависитъ отъ относительнаго впуска воздуха и отъ массы другихъ условий. Теоретически максимальная температура достигается при теоретически необходимомъ объемѣ воздуха, совершенно сухомъ топливѣ, достаточной тягѣ и при отсутствіи потери теплоты стѣнками очага.* Этотъ теоретическій ( $T_{\max}$ ) максимум температуры горѣнія называется *теоретической жаропроизводительной способностью топлива.*

Само собою понятно, что въ условіяхъ практическаго сжиганія теоретическій  $T_{\max}$  недостижимъ. Потери всякаго рода неизбѣжны,

и поэтому техника интересуется практически достижимым предельмъ—*практической жаропроизводительностью топлива.*

При сжиганіи топлива можно преслѣдовать разнообразныя цѣли: можно, напримѣръ, стремиться получить изъ 1 вѣсовой ед-цы топлива и утилизировать возможно большее количество ед-цы теплоты. Эту задачу ставить себѣ техника отопленія—достиженіе цѣли въ этомъ случаѣ вознаграждается *высшимъ калориметрическимъ эффектомъ.* Во многихъ отрасляхъ промышленности преслѣдуется другая задача; получить возможно болѣе высокую температуру горѣнія  $T_{\max}$  — это значитъ *достичь высшаго пирометрическаго эффекта.*

### 10. Выраженіе для температуры горѣнія и условія достиженія $T_{\max}$ .

Выше уже было указано, что т-ра горѣнія  $T$ , завися отъ полезной теплопроизводительной способности топлива  $K_2$ , вѣсового количества дымовыхъ газовъ  $Q$  и ихъ средней теплоемкости  $C$ , является ихъ функцией, т. е. что:

$$T = f(K_2, Q, C) \dots \dots \dots (1)$$

Выразимъ эту зависимость въ ясной формѣ для самаго общаго случая:

Положимъ, что при полномъ сжиганіи въ воздухѣ 1 klgr. топлива получилось  $Q$  klgr. дымовыхъ газовъ, средняя теплоемкость которыхъ равна  $C$  cal, а т-ра  $T^\circ\text{C}$ . Если, кромѣ того, полезная теплопроизводительность топлива равна  $K_2$ , то всегда существуетъ зависимость:

$$K_2 = T \times Q \times C \dots \dots \dots (a)$$

выражающая собою запасъ теплоты въ продуктахъ горѣнія.

Температура горѣнія изъ этого равенства:

$$T = \frac{K_2}{Q \times C} \dots \dots \dots (2)$$

далѣе, обозначимъ черезъ  $q_1, q_2 \dots q_n$  въ klgr. вѣса отдѣльныхъ газовъ ( $\text{CO}_2$ ), (N), (O), ( $\text{SO}_2$ ) и др., вошедшихъ въ составъ общаго вѣса  $Q$  дымовыхъ газовъ, а ихъ теплоемкости при постоянномъ давленіи обозначимъ черезъ  $c_1, c_2, c_3 \dots c_n$  въ cal, тогда, снова имѣемъ зависимость:

$$K_2 = T [q_1 c_1 + q_2 c_2 + q_3 c_3 + \dots + q_n c_n] \dots \dots (b)$$

откуда, получаемъ для т-ры горѣнія выраженіе:

$$T = \frac{K_2}{q_1 c_1 + q_2 c_2 + \dots + q_n c_n} \dots \dots \dots (3)$$

Наконецъ, обозначимъ черезъ  $V_{(\text{необх.})}$  въ klgr. теоретическій вѣсъ воздуха, необходимый для сжиганія 1 klgr. топлива, а черезъ  $n$  коэффициентъ избытка, т. е. число, показывающее во сколько разъ дѣйствительно участвовавшій въ горѣніи объемъ воздуха превышаетъ

теоретически необходимый  $V_{\text{(необх.)}}$ , тогда: вѣсь исходныхъ продуктовъ, изъ которыхъ послѣ сжиганія образовалось  $Q$  klg. дымовыхъ газовъ, очевидно, составитъ изъ: 1 klg. топлива и  $n \times V_{\text{(необх.)}}$  klg. воздуха, т. е. будетъ равенъ:

$$[1 + n \times V_{\text{(необх.)}}] \text{ klg.}$$

Запасъ теплоты въ первоначальныхъ продуктахъ, очевидно, равенъ полезной теплопроизводительности  $K_2$ , т.-е.:

$$T [1 + n \times V_{\text{(необх.)}}] \cdot C = K_2 \dots \dots \dots (4)$$

Изъ этого ур-нія, для т-ры горѣнія  $T$  получаемъ еще одно выраженіе:

$$T = \frac{K_2}{[1 + n \times V_{\text{(необх.)}}] \cdot C} \dots \dots \dots (5)$$

Сравнивая ур-нія (2, 3 и 5), получаемъ:

$$\begin{aligned} T &= \frac{K_2}{Q \times C} = \frac{K_2}{(q_1 c_1 + q_2 c_2 + \dots \dots \dots + q_n c_n)} = \\ &= \frac{K_2}{[1 + n \times V_{\text{(необх.)}}] \cdot C} \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

Ур-ніе (6) показываетъ, что при всѣхъ условіяхъ т-ра горѣнія  $T$  прямо пропорціональна полезной теплопроизводительности топлива, т.-е. чѣмъ большее количество ед-цъ теплоты въ состояніи выдѣлить вѣсовая ед-ца даннаго топлива, тѣмъ болѣе имѣется оснований при всѣхъ прочихъ равныхъ условіяхъ, ожидать болѣе высокой т-ры горѣнія  $T$ .

Знаменатель 1-го выраженія показываетъ, что *ростъ т-ры горѣнія обратно пропорціоналенъ вѣсу  $Q$  и средней теплоемкости  $C$  дымовыхъ газовъ*, т.-е. чѣмъ меньшее вѣсовое количество дымовыхъ газовъ образуется при горѣніи какого-либо вида топлива и чѣмъ ниже ихъ средняя теплоемкость  $C$ , тѣмъ выше должна быть т-ра горѣнія и наоборотъ.

Тоже подтверждается и знаменателемъ второго выраженія, именно: *чѣмъ меньше число и вѣса составляющихъ газовъ въ продуктахъ горѣнія и чѣмъ меньше ихъ теплоемкости при постоянномъ давленіи, тѣмъ выше должна быть т-ра горѣнія*.

Наконецъ, послѣднее выраженіе даетъ возможность сказать, что *наибольшая т-ра горѣнія можетъ получиться только тогда, когда сжиганіе ведется при теоретически необходимомъ притоке воздуха*, т.-е. при  $n = 1$  ед. цѣ, такъ какъ при этомъ условіи дробное выраженіе:

$$T = \frac{K_2}{[1 + n \times V_{\text{(необх.)}}] \cdot C}$$

получаетъ максимумальное значеніе, т.-е.: при  $n = 1$ -цѣ

$$T_{\text{max}} = \frac{K_2}{[1 + V_{\text{(необх.)}}] \cdot C} \dots \dots \dots (7)$$

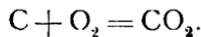
Этот вывод подтверждает и предыдущія заключенія, такъ какъ *наименьшее количество дымовыхъ газовъ можетъ получиться лишь при минимальномъ впускѣ воздуха*, т.-е. при В (необх).

Послѣднее выраженіе  $T_{\max}$  есть теоретическая жаропроизводительная способность топлива или наивысшая т-ра горѣнія, которая могла бы быть достигнута, если бы горѣніе происходило безъ потерь теплоты черезъ стѣнки очага путемъ лучеиспусканія и конвекціи и безъ особыхъ осложняющихъ обстоятельствъ, препятствующихъ росту т-ры горѣнія и достиженію ею наивысшаго значенія  $T_{\max}$ .

Отсюда понятно, что горѣніе съ чистымъ кислородомъ должно дать болѣе высокую жаропроизводительность, чѣмъ съ воздухомъ.

Примѣръ.

1 klgr. углерода сжигается въ чистомъ кислородѣ: по формулѣ:



Продуктъ горѣнія ( $CO_2$ ) составляетъ по вѣсу:

$$q_1 = \frac{11}{3} \text{ klgr.}$$

Такъ какъ вообще температура горѣнія въ кислородѣ очень высока и такъ какъ теплоемкость газовъ возрастаетъ съ повышеніемъ температуры горѣнія, то для теплоемкости  $CO_2$  надо взять цифру, соответствующую температурѣ, на примѣръ, въ  $+2000^\circ C$ , т.-е.  $c_1 = 0,409 \text{ cal.}$  (вмѣсто  $0,217 \text{ cal.}$  соответствующихъ т-рѣ въ  $+200^\circ C$  по табл. № 19-й).

Полагая начальную температуру топлива и кислорода, равной  $0^\circ C$ , найдемъ:

$$T = \frac{K_2}{q_1 c_1} = \frac{8100 \times 3}{11 \times 0,409} = + 5400^\circ C;$$

При сжиганіи 1 klgr. (C) съ воздухомъ, въ качествѣ продуктовъ горѣнія получаемъ:

$$\frac{11}{3} \text{ klgr. (CO}_2) \text{ и}$$

$$\frac{8 \times 77}{3 \times 23} \text{ (N)} = \frac{616}{69} \text{ klgr. (N);}$$

принимая для азота (N)  $c_2 = 0,290$ , получимъ:

$$T = \frac{K_2}{q_1 c_1 + q_2 c_2} = \frac{8100}{\left(\frac{11}{3} \times 0,409\right) + \left(\frac{616}{69} \times 0,290\right)} = + 1960^\circ C.$$

Совершенно понятно также, почему при впускѣ въ топку сильно подогрѣтаго воздуха достигается болѣе высокая жаропроизводительность:

Въ этомъ случаѣ расходуется изъ топлива гораздо меньше теплоты на нагрѣваніе азота, переходящаго цѣликомъ въ продукты горѣнія.

### 11. Причины, препятствующія росту т-ры горѣнія.

а) *Измѣняемость удѣльныхъ теплотъ газовъ при постоянномъ давленіи.*

Теплоемкости газовъ при постоянномъ давленіи: (CO<sub>2</sub>), (N), (O), (H), (CO) воздуха и водяныхъ паровъ (H<sub>2</sub>O), входящихъ въ составъ газообразныхъ продуктовъ горѣнія не являются постоянными величинами, а измѣняются съ измѣненіями т-ры, увеличиваясь съ ихъ ростомъ, что влечетъ за собою увеличеніе знаменателей въ 1-мъ и 2-мъ выраженіяхъ ур-нія (6)-го, а слѣдовательно уменьшеніе значенія для т-ры горѣнія T.

Менделѣевъ выразилъ зависимость между удѣльной теплотой при постоянномъ давленіи главнѣйшихъ составныхъ частей продуктовъ горѣнія и температурой нижеслѣдующими формулами:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для углекислоты} \quad (\text{CO}_2) \quad c_1 = 0,189 + 0,000095 \text{ T}; \\ \text{» паровъ воды} \quad (\text{H}_2\text{O}) \quad c_2 = 0,41 + 0,000206 \text{ T}; \\ \text{» азота} \quad (\text{N}) \quad c_3 = 0,239 + 0,00005 \text{ T}; \\ \text{» кислорода} \quad (\text{O}) \quad c_4 = \frac{7}{8} c_3; \end{array} \right\} \quad (8)$$

Теплоемкость сѣрнистаго газа (SO<sub>2</sub>) считается величиной постоянной и равной c<sub>5</sub> = 0,15;

Точно также, для золы принимаютъ c<sub>6</sub> = 0,20;

Формулы Менделѣева даютъ возможность при извѣстномъ значеніи полной K<sub>1</sub>, или полезной K<sub>2</sub> теплопроизводительности даннаго топлива вычислить температуру горѣнія, если данъ составъ продуктовъ горѣнія.

Дѣйствительно, обозначимъ, какъ показано ниже, вѣса и удѣльныя теплоты составныхъ частей продуктовъ горѣнія, по даннымъ анализа.

(CO <sub>2</sub> )	по вѣсу: q <sub>1</sub> klg.	теплоемкость: c <sub>1</sub> ;
(H <sub>2</sub> O)	" q <sub>2</sub> "	" c <sub>2</sub> ;
( N )	" q <sub>3</sub> "	" c <sub>3</sub> ;
( O )	" q <sub>4</sub> "	" c <sub>4</sub> ;
(SO <sub>2</sub> )	" q <sub>5</sub> "	" c <sub>5</sub> ;
Золы	" q <sub>6</sub> "	" c <sub>6</sub> ;

Примемъ для общности, что начальная т-ра, вмѣсто 0°c равна t°c, пусть абсолютная теплопроизводительная способность даннаго горючаго обозначена черезъ K<sub>1</sub>, а полезная черезъ K<sub>2</sub> = K<sub>1</sub> - k<sub>1</sub>, гдѣ k<sub>1</sub> есть теплота, унесенная парами воды, тогда, согласно равенства (b) № 10-го можемъ составить выраженіе:

$$K_2 = K_1 - k_1 = (T - t) \cdot [q_1 c_1 + q_2 c_2 + q_3 c_3 + q_4 c_4 + q_5 c_5 + q_6 c_6] \quad . \quad . \quad 9$$

Такъ какъ вѣсъ паровъ воды равенъ q<sub>2</sub> klg., то k<sub>1</sub> = 600 q<sub>2</sub>; подставляя въ ур-ніе (q) значенія теплоемкостей, выраженныя черезъ T въ формулахъ Менделѣева, получимъ:

$$K_2 = K_1 - 600q_2 = (T - t) \left\{ q_1 [0,189 + 0,000095(T - t)] + q_2 [0,41 + 0,000206(T - t)] + q_3 [0,239 + 0,00005(T - t)] + q_4 \cdot \frac{7}{8} [0,239 + 0,00005(T - t)] + 0,15q_5 + 0,20q_6 \right\} \quad (10)$$

для упрощенія вычисленій выраженія  $(T-t)$  въ большихъ скобкахъ замѣняются обыкновенно множителемъ  $T$  и тогда ур-ніе принимаетъ болѣе простой видъ:

$$K_2 = K_1 - 600q_2 = (T-t) \cdot \{ q_1[0,189 + 0,000095T] + q_2[0,41 + 0,000206T] + q_3[0,239 + 0,00005T] + q_4^{7/8}[0,239 + 0,00005T] + 0,15q_5 + 0,20q_6 \} \dots \dots \dots (11)$$

При извѣстномъ  $K_2$  или  $K_1$  ур-ніе (11) можетъ быть рѣшено относительно искомой т-ры  $T$ .

Задача о вычисленіи т-ры горѣнія можетъ быть рѣшена не только тогда, когда даны вѣса продуктовъ горѣнія, но и въ томъ случаѣ, когда данъ химическій анализъ пробы горячаго и коэффициентъ избытка воздуха  $n$ .

Рѣшимъ эту задачу въ приложеніи къ одному частному случаю.

**Численный примѣръ.**

Положимъ, по даннымъ анализа въ 100 klgr. лежалаго антрацита, оказалось:

- ( C ) — 89,91 klgr.
- ( H ) — 1,25 »
- ( N ) — 0,64 »
- ( O ) — 1,00 »
- ( S ) — 1,00 »
- воды — 4,20 »
- зола — 2,00 »

Сожиганіе антрацита произведено при двойномъ противъ теоретически необходимаго впускѣ воздуха, т.-е. при  $n=2$ .

Вычислимъ для одного klgr. антрацита вѣса составляющихъ продуктовъ горѣнія:

Вѣсъ углекислоты ( $CO_2$ ):  $q_1 = \frac{11}{3} \text{ klgr. } (CO_2) + \frac{89,91}{100} = 3,297 \text{ klgr.}$

Вѣсъ водяныхъ паровъ ( $H_2O$ ) отъ сгоранія водорода (H) и изъ гигроскопической воды топлива:

$$q_2' = \frac{1,25 \times 9 \text{ klgr } (H_2O) + 4,20}{100} = 0,155 \text{ klgr.}$$

Вѣсъ водяныхъ паровъ ( $H_2O$ ) изъ воздуха, притекавашаго для горѣнія, полагая его относительную влажность въ 70%, а т-пу  $t = +15^\circ c$ , найдется, если предварительно будетъ вычисленъ вѣсъ впушеннаго воздуха; этотъ вѣсъ равенъ:

$$2 \frac{[(89,91 \times \frac{8}{3}) + (1,25 \times 8) + (1,00 \times 1,00) - 1,00] \times 100}{100 + 23} = 2 \times 10,86 = 21,72 \text{ klgr.}$$

Поэтому, вѣсъ паровъ:

$$q_2'' = 0,0105 \times 0,70 \times 21,72 = 0,160 \text{ klgr.}$$

Полный вѣсъ паровъ:

$$q_2 = q_2' + q_2'' = 0,155 + 0,160 = 0,315 \text{ klgr.}$$

Вѣсъ азота (N):

$$q_3 = \frac{21.72 + 77}{100} + 0,0064 = 16,72 + 0,0064 = \underline{16.73 \text{ klgr.}}$$

Вѣсъ кислорода (O) изъ воздуха (кислородъ топлива весь соединился съ водородомъ въ пропорціи воды)

$$q_4 = 21.72 \times \frac{23}{100} = 4.996 \approx \underline{5,00 \text{ klgr.}}$$

Вѣсъ сѣрнистаго газа (SO<sub>2</sub>):

$$q_5 = \frac{1,00 \times 2}{100} = \underline{0,02 \text{ klgr.}}$$

Вѣсъ золы

$$q_6 = \frac{2,00}{100} = \underline{0,02 \text{ klgr.}}$$

Принявъ для лежалого антрацита  $K_1 = 7650 \text{ cal.}$ , подставляем найденные вѣса продуктовъ горѣнія въ формулу (11), находимъ:

$$K_2 = 7650 - (600 \times 0,315) = (T - 15) \times \{ 3,297(0,189 + 0,000095T) + \\ + 0,315(0,41 + 0,000206T) + 16,73(0,239 + 0,00005T) + 7,8 \times 5,00(0,239 + \\ + 0,00005T) + (0,02 \times 0,15) + (0,02 \times 0,20) \};$$

рѣшая это ур-ніе относительно искомой т-ры горѣнія T, приходимъ къ квадратному ур-нію:

$$0,00068T^2 + 5,794T = 7551,06;$$

Откуда получаемъ:

$$T = -2,90 \pm \sqrt{8,4^2 + 7551,06};$$

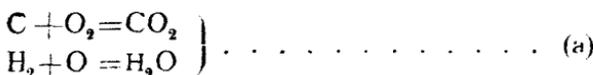
что при положительномъ значеніи корня доставляетъ:

$$T = + \underline{866,50^\circ\text{C.}}$$

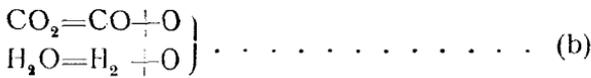
Въ данномъ случаѣ нами былъ предположенъ двойной впускъ воздуха; если бы расчетъ былъ произведенъ при одиночномъ впускѣ, то для т-ры горѣнія получилось бы по расчету тахіт'альное значеніе ( $T_{\text{max}}$ ) для случая сжиганія въ воздухѣ, съ принятіемъ во вниманіе увеличенія теплоемкостей газовъ, входящихъ въ составъ продуктовъ горѣнія.

*б) Явленіе диссоціаціи.*

Второю причиною пониженія т-ры горѣнія оказывается диссоціація CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, проявляющаяся при высокиихъ т-рахъ и обусловленная обратимостью реакцій углекислоты и водяныхъ паровъ. Совершенное горѣніе углерода (C) и водорода (H) протекаетъ по ур-ніямъ:



Въ дальнѣйшемъ, если углекислота и водяной паръ попадаютъ въ пространство высокой т-ры, происходитъ обратная реакція разложенія  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  по ур-ніямъ:



Реакціи (а), какъ экзотермическія, сопровождаются выдѣленіемъ теплоты, реакціи же (b), какъ эндотермическія, наоборотъ, требуютъ затраты теплоты, отнимая ее у горящаго топлива и тѣмъ уменьшая ее количество въ дымовыхъ газахъ, что выражается пониженіемъ т-ры горѣнія Т. Математически это обстоятельство выражается уменьшеніемъ числителя  $K_2$  въ ур-ніяхъ (6), такъ какъ расходъ теплоты на диссоціацію надо считать произведеннымъ за счетъ уменьшенія полезной теплопроизводительности топлива; коэффициенты въ формулахъ (8) Менделѣева для  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  взяты уже съ принятіемъ во вниманіе явленія диссоціаціи.

Въ настоящее время считаютъ, что диссоціація понижаетъ температуру горѣнія на  $35^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}$  если вводится въ топку холодный воздухъ.

При введеніи горячаго воздуха пониженіе температуры по причинѣ диссоціаціи ( $\text{CO}_2$ ) и ( $\text{H}_2\text{O}$ ) можетъ доходить до  $160^\circ\text{C} - 220^\circ\text{C}$ .

Трудами русскихъ и иностранныхъ изслѣдователей получены цифры для теплоемкостей газовъ при постоянномъ давленіи въ зависимости отъ т-ры. Здѣсь прилагается таблица этихъ величинъ, составленная проф. Бляхеромъ и взятая изъ книги проф. Дементьева.

Таблица № 19-й

удѣльной теплоты нѣкоторыхъ газовъ при постоянномъ давленіи, по даннымъ Курнакова, Менделѣева, Блясса, Фишера и др.

Температура t°c.	Г А З Ы.								
	Углекислота (CO <sub>2</sub> ).			Водородъ (H).	Кислородъ (O).	Окись углерода (CO) и азотъ (N).	Воздухъ.	Пары воды (H <sub>2</sub> O).	
	По Курнакову.	По Менделѣеву.	по Блясу и Фишеру.	По Курнакову.	По Курнакову.	По Курнакову.	По Курнакову.	По Курнакову.	По Менделѣеву.
+ 200°	0,217	0,204	0,216	3,409	0,217	0,244	0,237	0,480	0,451
500	0,252	0,227	—	3,550	0,222	0,253	0,246	0,511	0,513
1000	0,295	0,265	0,289	3,700	0,231	0,261	0,256	0,605	0,616
1500	0,327	0,303	0,318	3,850	0,244	0,275	0,268	0,694	0,718
2000	0,409	0,341	0,329	4,000	0,250	0,286	0,278	0,844	0,822
2500	0,434	0,379	—	4,050	0,253	0,289	0,281	0,911	0,925
3000	0,402	0,417	—	4,150	0,261	0,276	0,288	1,017	1,028
3500	0,398	0,455	—	4,550	0,284	0,325	0,325	1,050	1,130

с) третьей причиной, препятствующей достижению на практикѣ высокой жаро-производительности являются разнообразныя потери тепла. Если обозначить сумму ихъ черезъ  $\Sigma k_2$ , то для  $T$  практ. можемъ написать выраженіе:

$$T_{\text{практ.}} = \frac{K_2 - \Sigma k_2}{Q_1 C_1 + Q_2 C_2 + \dots + Q_n C_n};$$

## 12. Температура печного пространства.

Температура печного пространства зависитъ кромѣ жаропроизводительности топлива еще отъ массы привходящихъ условий, среди которыхъ очень важную роль играетъ цѣлесообразность конструкціи очага по отношенію къ данному рода топливу. Вопросу объ этой цѣлесообразности отведено мѣсто въ II-мъ отдѣлѣ книги при описаніи топливниковъ печей, здѣсь же дадимъ приближенное выраженіе для средней т-ры печного пространства, обозначивъ черезъ  $K_2$  количество теплоты, вводимое въ топку съ однимъ klgr. топлива; черезъ  $p$  вѣсъ топлива, сгорающаго въ теченіе часа; черезъ  $V$  вѣсъ воздуха, вводимаго для горѣнія на 1 klgr. топлива; черезъ  $C$  теплоемкость продуктовъ горѣнія и черезъ  $\phi$  нѣкоторую постоянную величину, зависящую отъ конструкціи топочнаго аппарата—коэффициентъ совершенства топки. При этихъ обозначеніяхъ средняя т-ра въ очагѣ:

$$T = \frac{K_2}{(1 + V) C + \frac{\phi}{p}};$$

достижимая въ топочномъ пространствѣ т-ра опредѣляется приближенною формулою:

$$T = \frac{K_2}{0.24(1 + V)};$$

Здѣсь 0,24—количество углерода, необходимое для нагрѣванія 1 klgr. газовъ на  $1^\circ\text{C}$ . количества же воздуха для горѣнія берутся изъ таблицы Пекле.

Таблица № 20-й.

На 1 klgr. горючаго:	Наименьшее теоретическое количество воздуха.		Практический расходъ воздуха для горѣнія въ klgr.	Практический коэффициентъ избытка п.
	з въ mt.	въ klgr.		
Дерево воздушной сушки . . . . .	3,60	4,65	9,30	2
Древесный уголь . . . . .	7,64	10,30	20,60	2
Торфъ воздушной сушки . . . . .	4,51	5,83	11,66	2
Каменный уголь . . . . .	8,35	10,80	21,60	2
Коксъ . . . . .	7,50	9,70	19,40	—

Считаемъ полезнымъ привести здѣсь цифры теоретической жаро-производительности  $T_{\max}$ , полученныя вычисленіемъ при коэффициентѣ избытка  $n = 1$  цѣ.

Таблица № 21-й.

теоретической жаро-производительности  $T_{\max}$   
при  $n = 1$ -цѣ.

Вещества.	По Курнакову:	По Менделѣву.
	$T_{\max}^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}^{\circ}\text{C}$
Твердый углеродъ (с) въ воздухѣ . . . . . кислородъ. . . . .	1900—1990 2900—3300	1901
Дерево. . . . .	—	1542
Каменный уголь . . . . .	—	1820
Древесный уголь . . . . .	—	1840
Коксъ . . . . .	—	1840
Торфъ (сухой) . . . . .	—	1660
Нефть . . . . .	—	1830
Водородъ (въ кислородѣ) . . . . . въ воздухѣ . . . . .	2500—2700 1900	1814
Свѣтильный газъ въ воздухѣ . . . . .	1811—1823	—
Окись углерода . . . . .	2040	1957
Метанъ . . . . .	—	1662
Ацетиленъ . . . . .	—	2130

Измѣреніе высокихъ т-ръ въ топочныхъ устройствахъ составляетъ предметъ технической термометрии и пирометрии. Здѣсь приводимъ цифры нѣкоторыхъ измѣренныхъ высокихъ т-ръ.

Таблица № 22-й.

нѣкоторыхъ практически измѣренныхъ высокихъ т-ръ.		
Пламя спиртовой лампы: около . . . . .		+ 800°с.
Бунзеновская горѣлка . . . . .	отъ 1090 до 1575°с.	
Электрическая лампочка накаливанія . . . . .	" 1800 " 2100°с.	
Плавленіе бѣлаго чугуна . . . . .		1135°с.
" сѣраго " . . . . .		1220°с.
" желѣза . . . . .	" 1455 " 1475°с.	
" мѣди . . . . .		1076°с.
" серебра . . . . .		962°с.
" золота . . . . .		1065°с.
" платины . . . . .		1710°с.
" никкеля . . . . .		1496°с.
Вольтова дуга . . . . .	" 3700°с "	4100°с.
Огнеупорная глина . . . . .	" 1670 "	1700°с.
Кирпичеобжигательная печь Гофмана . . . . .		1100°с.
Печь для обжига каменной посуды . . . . .		1142°с.
Доменная печь (противъ фурмы) . . . . .		1930°с.
Паяльная лампа (maximum) . . . . .		1400°с.

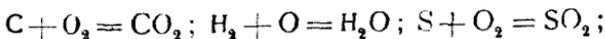
## ГЛАВА V.

### Дымовые газы.

#### 1. Необходимый для полнаго сгоранія топлива теоретическій объемъ воздуха.

Правильно протекающій процессъ горѣнія всякаго топлива долженъ заканчиваться сгораніемъ всего содержавшагося въ топливѣ углерода (С) въ углекислоту (CO<sub>2</sub>), водорода (Н) — въ пары воды (Н<sub>2</sub>O) и сѣры (S) — въ сѣрнистый газъ (SO<sub>2</sub>).

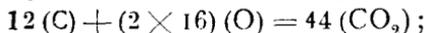
Реакціи горѣнія этихъ элементовъ, какъ уже указано, протекаютъ по ур-ніямъ:



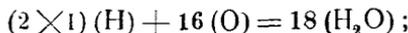
атомные вѣса элементовъ, участвующихъ въ реакціяхъ горѣнія, суть:

- для углерода (С) — 12;
- » водорода (Н) — 1;
- » сѣры (S) — 32;
- » кислорода (O) — 16;

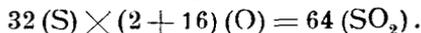
Поэтому, при горѣніи углерода по ур-нію:  $C + O_2 = CO_2$ , 12 вѣсовыхъ частей углерода (C) соединяются съ  $(2 \times 16) = 32$  частями кислорода (O), образуя 44 вѣсовыхъ части углекислоты  $CO_2$ :



точно также, при горѣніи водорода по ур-нію  $H_2 + O = H_2O$ ,  $(2 \times 1) = 2$  вѣсовыя части водорода (H) соединяются съ 16-ю частями кислорода (O), образуя 18 вѣсовыхъ частей водяныхъ паровъ ( $H_2O$ );



при сгораніи сѣры по ур-нію:  $S + O_2 = SO_2$ , 32 вѣсовыя части сѣры (S), соединяясь съ  $(2 \times 16) = 32$  частями кислорода (O), даютъ 64 вѣсовыя части сѣрнистаго газа ( $SO_2$ ):



Принявъ за вѣсовую ед-цу klgr., находимъ, что для полного сожиганія 1 klgr. углерода (C) въ углекислоту требуется:  $\frac{32}{12} = \frac{8}{3}$  klgr. кислорода (O), при чемъ въ результатѣ горѣнія должно получиться

$$\frac{44}{12} = \frac{11}{3} \text{ klgr. углекислаго газа } (CO_2).$$

Точно также, для сожиганія 1 klgr. водорода (H) оказывается необходимымъ затратить:  $\frac{16}{2} = 8$  klgr. кислорода (O) съ тѣмъ, чтобы получить въ качествѣ продукта горѣнія  $\frac{18}{2} = 9$  klgr. водяного пара ( $H_2O$ ).

Наконецъ, сожиганіе 1 klgr. сѣры (S) въ сѣрнистый газъ ( $SO_2$ ) требуетъ затраты  $\frac{32}{32} = 1$  klgr. кислорода (O) при чемъ вѣсъ продукта горѣнія сѣрнистаго газа ( $SO_2$ ) равенъ 2 klgr.

Если намъ извѣстно въ ‰-ахъ содержаніе горючихъ элементовъ (C), (H) и (S) и кислорода (O) въ одной вѣсовой части, напримѣръ, въ 1 klgr. даннаго топлива, то легко можетъ быть вычисленъ вѣсъ кислорода, необходимаго для сгоранія топлива.

Положивъ въ одномъ klgr. топлива:

Содержаніе углерода	= (C)	‰
» водорода	= (H)	‰
» сѣры	= (S)	‰
» кислорода	= (O)	‰

Необходимый вѣсъ кислорода можемъ выразить формулою:

$$O_{\text{необх.}} = \frac{\frac{8}{3}(C) + 8(H) + 1.00(S) - (O)}{100} \text{ klgr. . . . . (1)}$$

Въ практикѣ сожиганіе ведется не съ чистымъ кислородомъ, а съ кислородомъ, извлекаемымъ изъ атмосфернаго воздуха. Въ составѣ воздуха кислородъ (O) по вѣсу составляетъ только 23‰, остальные

77% вѣса относятся на азотъ (N), не принимающій участія въ горѣнїи; слѣдовательно, вѣсовое количество воздуха ( $V_{\text{необх.}}$ ), способное доставить ( $O_{\text{необх.}}$ ) klgr. кислорода должно быть больше вѣса этого

последняго въ отношенїи  $\frac{100}{23}$ , т. е.

$$V_{\text{(необх.)}} = \frac{100}{23} O_{\text{(необх.)}} = \frac{100 \left[ \frac{8}{3} (C) + 8 (H) + 1,00 (S) - (O) \right]}{23 \times 100} \text{ klgr.} \quad (2)$$

раздѣливъ  $V_{\text{(необх.)}}$  на вѣсъ 1 mtr.<sup>3</sup> воздуха при давленїи въ 760 мм. ртутнаго столба и 0°с. т. е. на 1,293 klgr. найдемъ объемъ воздуха  $L_{\text{(необх.)}}$  необходимый для сгоранїя 1 klgr. топлива указаннаго выше состава:

$$L_{\text{(необх.)}} = \frac{V_{\text{(необх.)}}}{1,293} = 3,36 \frac{\left( \frac{8}{3} (C) + 8 (H) + 1,00 (S) - (O) \right)}{100} \dots (3)$$

Вѣсъ воздуха  $V_{\text{(необх.)}}$ , опредѣленный по формулѣ (2) въ klgr. или объемъ ( $L_{\text{необх.}}$ ) въ mtr.<sup>3</sup>-ахъ называются **теоретическимъ расходомъ** и представляютъ тотъ minimum, при которомъ, разсуждая теоретически, можетъ произойти полное сгоранїе одного klgr. топлива. Въ дѣйствительности, почти никогда сожиганїе твердаго топлива не производится при теоретическомъ (одиночномъ) объемѣ воздуха, такъ какъ имѣется много причинъ затрудняющихъ, правильное теченїе процесса горѣнїя. Практика установила для твердыхъ видовъ горючаго 2-хъ кратный объемъ воздуха, для жидкихъ — полуторный, одиночный же считаютъ возможнымъ только при топливѣ газообразномъ.

2) Численные примѣры опредѣленїя теоретическаго расхода воздуха ( $V_{\text{необх.}}$ ) и ( $L_{\text{необх.}}$ ) для сожиганїя 1 klgr. топлива.

Примѣръ № 1-й.

Топливо — дрова воздушной сушки; химическій составъ:

въ 1 klgr. топлива:	по Менделѣву:
углерода (C) . . . . .	40,0% »
водорода (H) . . . . .	4,8% »
кислорода (O) . . . . .	34,5% »
воды (H <sub>2</sub> O) . . . . .	20% »
золы . . . . .	0,7% »

Всего 100 % по вѣсу.

Теоретическій вѣсъ воздуха ( $V_{\text{необх.}}$ ) по формулѣ (2):

$$V_{\text{(необх.)}} = \frac{100 \left( \frac{8}{3} (C) + 8 (H) + 1,00 (S) - (O) \right)}{23 \times 100} =$$

$$= \frac{\left( \frac{8}{3} \times 40 \right) + (8 \times 4,8) - 34,50}{23} = \frac{106,66 + 38,40 - 34,50}{23} =$$

$$= \frac{110,56}{23} = 4,80 \text{ klgr. воздуха.}$$

$$L_{\text{необх.}} = \frac{V_{\text{необх.}}}{1,293} = \frac{4,800}{1,293} = 3,71 \text{ mtr.}^3 \text{ воздуха.}$$

Примѣръ № 2-й.

Топливо—грушевскій антрацитъ кошкнскихъ копей, по анализу проф. Алексѣева.

въ 1 klgr. топлива:

углерода (C) . . . . .	89.91	%
водорода (H) . . . . .	1.25	%
кислорода (O) . . . . .	1.00	%
азота (N) . . . . .	0.64	%
сѣры (S) . . . . .	1.00	%
воды (H <sub>2</sub> O) . . . . .	4.20	%
зола . . . . .	2.00	%
Всего: 100		% по вѣсу.

Согласно той же формулы (2) находимъ:

$$\begin{aligned}
 V(\text{необх.}) &= \frac{\left(\frac{8}{3} \times 89,91\right) + (8 \times 1,25) + (1,00 \times 1,00) - 1,00}{23 \times 100} \cdot 100 = \\
 &= \frac{239,76 + 10,00 + 1,00 - 1,00}{23} = \frac{249,76}{23} = 10,86 \text{ klgr. воздуха.}
 \end{aligned}$$

и по формулѣ (3):

$$L(\text{необх.}) = \frac{10,86}{1,293} = 8,40 \text{ mtr.}^3 \text{ воздуха.}$$

**3) Количество газообразныхъ продуктовъ горѣнія, получаемое при сжиганіи 1 klgr. топлива.**

а) при сгораніи 1 klgr. углерода (C) въ углекислоту (CO<sub>2</sub>) образуется  $\frac{11}{3}$  klgr. этого газа при чемъ содержаніе углерода (C) равно  $\frac{3}{8} = 1$  klgr. а кислорода (O)  $\frac{8}{3}$  klgr. Для полученія  $\frac{8}{3}$  klgr. кислорода необходимо было ввести съ нимъ азота:

$$\frac{8}{3} \times \frac{77}{23} = 8,93 \text{ klgr.}$$

Продукты горѣнія (CO<sub>2</sub>) имѣютъ вѣсъ:  $\frac{11}{3} = 3,67$  klgr.

введенный съ кислородомъ азотъ (N) воздуха вѣситъ 8,93 klgr. поэтому, полный вѣсъ дымовыхъ газовъ:

$$3,67 \text{ klgr. (CO}_2\text{)} + 8,93 \text{ klgr. (N)} = 12,60 \text{ klgr.}$$

Провѣрить этотъ результатъ можемъ слѣдующимъ образомъ: вѣсъ углерода (C) составляетъ 1 klgr.

для сжиганія его требуется воздуха:

$$\begin{aligned}
 V(\text{необх.}) &= \frac{\frac{8}{3}(C)100}{23 \times 100}; \text{ принявъ } C = 100 \%, \text{ имѣемъ:} \\
 V_{\text{необх.}} &= \frac{\frac{8}{3} \times 100}{23} = 11,60 \text{ klgr.}
 \end{aligned}$$

Всего: 1 klgr. (C) + 11,60 klgr. (воздуха) = 12,60 klgr.

Такъ какъ удѣльный вѣсъ углекислоты ( $\text{CO}_2$ ) равенъ 1,98 а азота— 1,257, то объемъ продуктовъ горѣнія равенъ:  $\frac{3,67}{1,98} + \frac{8,93}{1,257} = 8,95 \text{ mtr.}^3$

при теоретически необходимомъ (одиночномъ) объемѣ воздуха.

б) При сгораніи одного klgr. водорода (H) въ пары воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ) получается послѣднихъ по вѣсу: 9 klgr. при чемъ съ 8-ю klgr. кисло-

$$\text{рода введено } \frac{8 \times 77}{23} = 26,8 \text{ klgr. азота.}$$

Вѣсъ продуктовъ горѣнія: 9 klgr. ( $\text{H}_2\text{O}$ ) + 26,8 klgr. (N) = 35,8 klgr.;

$$\text{объемъ ихъ: } \frac{9,00}{0,805} + \frac{26,80}{1,257} = 11,18 + 21,32 = 32,50 \text{ mtr.}^3$$

Повѣрка: для сожиганія 1 klgr. водорода (H) надо ввести воздуха:

$$B_{\text{(необх.)}} = \frac{8 \times 100}{23} = 34,80 \text{ klgr.}$$

Общій вѣсъ 1 klgr. (H) + 34,80 klgr. (воздуха) = 35,80 klgr.

с) При сожиганіи 1 klgr. сѣры (S) въ сѣрнистый газъ ( $\text{SO}_2$ ) требуется 1 klgr. кислорода (O).

Съ этимъ кислородомъ вводится  $\frac{77}{23} \times 1,00 = 3,35 \text{ klgr. азота.}$

Вѣсъ продуктовъ горѣнія:

$$2 \text{ klgr. (SO}_2\text{)} + 3,35 \text{ klgr. (N)} = 5,35 \text{ klgr.}$$

Объемъ ихъ:

$$\frac{2}{2,86} + \frac{3,35}{1,257} = 0,70 + 2,66 = 3,36 \text{ mtr.}^3.$$

Повѣрка:

для сожженія 1 klgr. (S) требуется ввести воздуха:

$$B_{\text{(необх.)}} = \frac{1,00 \times 100}{23} = 4,35 \text{ klgr.}$$

Общій вѣсъ:

$$1 \text{ klgr. (S)} + 4,35 \text{ klgr. (воздуха)} = 5,35 \text{ klgr.}$$

Итакъ, при сожиганіи 1 klgr. углерода (C) при теоретически необходимомъ объемѣ воздуха получается 8,95 mtr.<sup>3</sup> дымовыхъ газовъ;

Тоже — 1 klgr. водорода (H) . . . . . 32,50 mtr.<sup>3</sup>;

Тоже — 1 klgr. сѣры (S) . . . . . 3,36 mtr.<sup>3</sup>.

Если данъ химическій составъ топлива, то количество дымовыхъ газовъ при теоретическомъ объемѣ воздуха можетъ быть вычислено на основаніи разсужденій, подобныхъ только что изложеннымъ. Раз-

смотримъ здѣсь два численныхъ примѣра, воспользовавшись данными выше приведенныхъ примѣровъ.

Примѣръ № 1 й.

Вычислить вѣсъ и объемъ дымовыхъ газовъ, образующихся отъ сжиганія 1 klgr. дровъ при теоретически необходимомъ объемѣ воздуха.

Данный химическаго анализа: на 100 klgr. дровъ;

Углерода (C) . . . . .	40 <sup>0</sup> / <sub>100</sub>	} Всего 100 вѣсовыхъ %.
Водорода (H) . . . . .	4,8 <sup>0</sup> / <sub>100</sub>	
Кислорода (O) . . . . .	34,5 <sup>0</sup> / <sub>100</sub>	
Азота (N) . . . . .	1,0 <sup>0</sup> / <sub>100</sub>	
Воды (H <sub>2</sub> O) . . . . .	19,0 <sup>0</sup> / <sub>100</sub>	
Золы . . . . .	0,7 <sup>0</sup> / <sub>100</sub>	

Расчетъ расхода кислорода на сжиганіе (C) и (H).

а) На сжиганіе (C):

$$40,00 \times \frac{8}{3} = 106,66 \text{ klgr.}$$

б) На сжиганіе (H):

$$4,80 \times 8 = 38,40 \text{ klgr.}$$

Всего требуется кислорода . . . . . 145,06 klgr.

А за вычетомъ кислорода топлива . . . . . 34,50 klgr.

Всего необходимо кислорода . 110,56 klgr.

Расчетъ вѣса воздуха:

110,56 klgr. кислорода могутъ быть доставлены вѣсомъ воздуха равнымъ:

$$\frac{110,56 \times 100}{23} = 481 \text{ klgr.}$$

Расчетъ дымовыхъ газовъ:

Изъ 40 klgr. (C) получается:

$$\frac{40 \times 11}{3} = 146,66 \text{ klgr. (CO}_2\text{).}$$

Изъ 4,8 klgr. (H) . . 4,8  $\times$  9 = 43,20 klgr. (H<sub>2</sub>O) въ видѣ паровъ.

Въ топливѣ содержится воды: 19,00

Всего: . . . 62,20 klgr.

Изъ 480 klgr. воздуха освобождается азота:

$$\frac{480 \times 77}{100} = 369,60 \text{ klgr. (N).}$$

Въ самомъ топливѣ содержится азота: 1,00 klgr.

Всего: . . 370,60 klgr. (N).

Всего изъ 100 klgr. топлива образуется газообразныхъ продук- товъ и паровъ по вѣсу:

Углекислоты (CO <sub>2</sub> ) . . . . .	146,66 klgr.
Паровъ воды (H <sub>2</sub> O) . . . . .	62,20 »
Азота (N) . . . . .	370,60 »
Всего . . . . .	<u>579,46 klgr.</u>

Тоже — по объему:

Углекислоты (CO <sub>2</sub> ) . . . . .	$\frac{146,66}{1,98} = 74,07 \text{ mtr.}^3;$
Паровъ воды (H <sub>2</sub> O) . . . . .	$\frac{62,20}{0,805} = 77,26 \text{ mtr.}^3;$
Азота (N) . . . . .	$\frac{370,60}{1,257} = 294,00 \text{ mtr.}^3;$
Всего на 100 klgr. топлива получается . .	<u>445,33 mtr.}^3.</u>

газообразныхъ продуктовъ или

на 1 klgr 4,45 mtr.<sup>3</sup> холодныхъ (при 0°C) дымовыхъ газовъ.

Повѣрка: 579,46 klgr. дымовыхъ газовъ состоятъ изъ вѣса топ- лива за вычетомъ золы:

$$(100 - 0,70) + 481 \text{ klgr. воздуха} = 579,30 \text{ klgr.}$$

Примѣръ № 2-й.

Вычислить вѣсъ и объемъ дымовыхъ газовъ, образующихся при сжиганіи 1 klgr. антрацита Грушевскихъ копей Кошкина при теоре- тически необходимомъ объемѣ воздуха.

Составъ 100 klgr. антрацита, согласно апализа проф. Алексѣва, слѣдующій:

Въ 100 klgr. антрацита содержится

Углерода (C) . . . . .	89,91 klgr.
Водорода (H) . . . . .	1,25 »
Сѣры (S) . . . . .	1,00 »
Кислорода (O) . . . . .	1,00 »
Азота (N) . . . . .	0,64 »
Воды (H <sub>2</sub> O) . . . . .	4,20 »
Золы . . . . .	2,00 »
Всего . . . . .	<u>100 klgr.</u>

а) Расчетъ расхода кислорода:

Для сжиганія: 89,91 klgr. (C) въ (CO <sub>2</sub> ) —	$89,91 \times 8 = 239,76 \text{ klgr.};$
» 1,25 „ (H) въ (H <sub>2</sub> O) (пары воды)	$1,25 \times 8 = 10,00 \text{ „}$
» 1,00 „ (S) въ (SO <sub>2</sub> ) „ „	$1,00 \times 1,00 = 1,00 \text{ „}$

Итого требуется кислорода . . . . . 250,76 klgr.,

а за вычетомъ кислорода топлива . . . . .	<u>1,00</u>
Всего . . . . .	<u>249,76 klgr.</u>

b) Расчетъ расхода воздуха.

Вѣсь воздуха, способный доставить это количество кислорода равенъ:

$$\frac{249,76 \times 100}{23} = 1086 \text{ klgr.}$$

Это есть теоретически необходимый (одиночный) расходъ воздуха.

c) Расчетъ вѣса дымовыхъ газовъ.

Изъ 89,91 klgr. (C) получается  $89,91 \times \frac{11}{3} (\text{CO}_2) = 329,67 \text{ klgr.}, (\text{CO}_2);$

„ 1,25 „ (H) „  $1,25 \times 9 (\text{H}_2\text{O}) = 11,25 \text{ klgr.} (\text{H}_2\text{O})$  въ видѣ паровъ въ топливѣ содержится влаги 4.20 klgr.

Всего . . 15,45 klgr. (H<sub>2</sub>O) паровъ воды.

Изъ 1086 klgr. воздуха освобождается:  $\frac{1086 \times 77}{23} = 836,22 \text{ (N) азота.}$

Въ топливѣ содержится . . . . . 0,64 (N)  
Всего . . . 836,86 (N) азота.

Изъ 1,00 klgr. сѣры получается:  $1,00 \times 2 = 2,00 \text{ klgr.} (\text{SO}_2);$

Всего изъ 100 klgr. топлива получается: 1183,98 klgr. дымовыхъ газовъ.

Повѣрка: 1183,98 klgr. газовъ состоятъ изъ вѣса 100 klgr. топлива за вычетомъ 2,00 klgr. золы и изъ 1086 klgr. воздуха:

$$(100 - 2,00) + 1086 = 1184 \text{ klgr.}$$

d) Расчетъ объема дымовыхъ газовъ.

Объемъ углекислоты (CO<sub>2</sub>):  $\frac{329,67}{1,98} = 166,50 \text{ mtr.}^3;$

„ паровъ воды (H<sub>2</sub>O):  $\frac{15,45}{0,805} = 19,19 \text{ mtr.}^3;$

„ азота (N):  $\frac{836,86}{1,257} = 665,76 \text{ mtr.}^3;$

„ сѣрнистаго газа (SO<sub>2</sub>):  $\frac{2,00}{2,80} = 0,70 \text{ mtr.}^3;$

Полный, приведенный къ 0°С объемъ дымовыхъ газовъ на 100 klgr. антрацита . . . 852,15 mtr.<sup>3</sup>.

Объемъ дымовыхъ газовъ на 1 klgr. антрацита:

$$q = \frac{852,15}{100} = 8,5215 \text{ mtr.}^3.$$

*Примѣчаніе.* Практически сожиганіе твердаго топлива ведется при двойномъ притокѣ воздуха, поэтому, объемъ и вѣсь дымовыхъ газовъ въ этихъ условіяхъ будутъ больше. Въ нашемъ, напримѣръ, послѣднемъ примѣрѣ, при двойномъ притокѣ воздуха

къ исчисленнымъ выше количествамъ прибавится еще 1086 klgr. воздуха;

$$\text{или } \frac{1086}{1,293} = 840 \text{ mtr.}^3; \text{ на } 100 \text{ klgr. топлива,}$$

а на 1 klgr. 8,40 mtr.<sup>3</sup>; такимъ образомъ полный объемъ холодныхъ дымовыхъ газовъ будетъ равенъ:

$$8,5215 + 8,40 = 16,9215 \text{ mtr.}^3 \approx 17 \text{ mtr.}^3; \text{ на } 1 \text{ klgr. антрацита;}$$

или 245 куб. фут. на 1 фунтъ антрацита.

Объемъ вводимаго воздуха на 1 фунтъ антрацита при двойномъ впускѣ составляетъ 243 куб. фута.

Вѣсъ 1 mtr.<sup>3</sup> дымовыхъ (холодныхъ) газовъ равенъ:

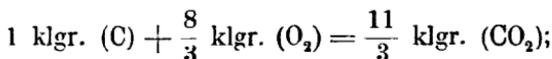
$$\frac{2270}{1692,15} = 1,34 \text{ klgr.}$$

### Потеря теплоты дымовыми газами.

#### 1) Зависимость потери теплоты дымовыми газами отъ избытка воздуха.

Прослѣдимъ процессъ горѣнія 1 klgr. углерода (C) при теоретическомъ расходѣ воздуха.

Реакція горѣнія протекаетъ по ур-нію:



т.-е. на 1 klgr. углерода требуется  $\frac{8}{3}$  klgr. кислорода.

Черная кислородъ для горѣнія изъ атмосфернаго воздуха, мы должны ввести его въ количествѣ:

$$\frac{8 \times 100}{3 \times 23} = 11,60 \text{ klgr.}$$

т.-е. на каждые 23 klgr. кислорода 100 klgr. воздуха.

Вѣсъ веществъ, вступающихъ въ реакцію, очевидно равенъ:

$$1 \text{ klgr. (C)} + 11,60 \text{ klgr. (воздуха)} = 12,60 \text{ klgr.}$$

Въ качествѣ продуктовъ горѣнія являются:

$$\frac{11}{3} \text{ klgr. (CO}_2\text{)}$$

и вѣсъ азота (N), переходящаго изъ воздуха въ дымовые газы безъ всякихъ измѣненій въ вѣсѣ.

Количество этого азота равно:

$$\frac{77}{100} \times 11,60 = 8,93 \text{ klgr.}$$

Полный вѣсъ дымовыхъ газовъ:

$$\frac{11}{3} \text{ klgr. (CO}_2\text{)} + 8,93 \text{ klgr. (N)} = 3,67 + 8,93 = 12,60 \text{ klgr.}$$

т.-е. вѣсь продуктовъ горѣнія и вѣсь исходныхъ веществъ равны между собою.

Вычислимъ объемы:

Объемъ воздуха равенъ при 0°C.

$$\frac{11,60}{1,293} = 8,96 \text{ mtr.}^3;$$

Объемъ дымовыхъ газовъ:

$$(\text{CO}_2) \dots\dots\dots \frac{3,67}{1,98} = 1,853 \text{ mtr.}^3;$$

$$(\text{N}) \dots\dots\dots \frac{8,93}{1,257} = 7,104 \text{ mtr.}^3.$$

---


$$\text{Всего.} \dots\dots 8,96 \text{ mtr.}^3.$$

Оказывается, что и объемъ дымовыхъ газовъ, приведенныхъ къ 0°C въ точности равенъ объему воздуха, взятому также при 0°C.

Для вычисленія количества теплоты, уносимой дымовыми газами, необходимо задать себѣ температуру T, при которой газы переходятъ въ дымовую трубу. Въ среднемъ, эта температура можетъ быть принята въ +250°C.

Теплоемкости углекислоты (CO<sub>2</sub>), азота (N) и другихъ газовъ, обозначаемыя черезъ C, зависятъ отъ температуры и вычисляются по формуламъ Мольера и Лешателье. Нѣкоторыя ихъ значенія даны въ соответственныхъ мѣстахъ разчета.

Теплота, уносимая дымовыми газами при этихъ условіяхъ вычисляется слѣдующимъ образомъ:

Теплота, уносимая углекислотою (CO<sub>2</sub>) въ объемѣ 1,853 mtr.<sup>3</sup>

$$1,853 \times T \times c_v = 1,853 \times 250 \times 0,439 = 205 \text{ Cal.}$$

Азотомъ — въ объемѣ 7,104 mtr.<sup>3</sup>:

$$7,104 \times T \times c_v = 7,104 \times 250 \times 0,306 = 543,45 \text{ Cal.}$$

$$\text{Всего теряется теплоты } 748,45 \text{ Cal.}$$

Такъ какъ абсолютная калориметрическая теплопроизводительность 1 kgr. углерода принята равною 8140 Cal. (по Фавру и Зильберману), то потеря теплоты въ дымовыхъ газахъ при теоретическомъ расходѣ воздуха составляетъ:

$$\frac{748,45 \times 100}{8140} = 9,2\%.$$

Найдемъ составъ и объемъ дымовыхъ газовъ при сжиганіи 1 kgr. углерода съ двойнымъ противъ теоретически необходимаго впускомъ воздуха.

Въ этомъ случаѣ объемъ углекислоты останется безъ измѣненія равнымъ 1,853 mtr.<sup>3</sup>.

Къ исчисленному же выше объему азота, 7,104 mtr.<sup>3</sup>, еще прибавится объемъ кислорода (O) и азота (N) изъ состава воздуха въ объемъ 8,96 mtr.<sup>3</sup>.

Именно:

Объемъ азота (N) . . . . .	7,104 mtr. <sup>3</sup> .
„ кислорода (O) . . . . .	1,856 mtr. <sup>3</sup> .

Полный объемъ дымовыхъ газовъ:

(CO <sub>2</sub> ) . . . . .	1,853 mtr. <sup>3</sup> .
(N) . . . . .	7,104 × 2 = 14,208 mtr. <sup>3</sup> .
(O) . . . . .	1,856 mtr. <sup>3</sup> .
Всего . . . . .	17,917 mtr. <sup>3</sup> .

Теплота, уносимая дымовыми газами:

(CO <sub>2</sub> ) . . . . .	1,853 × 250 × 0,439 = 205 Cal.
(N) . . . . .	543,45 × 2 = 1086,90 Cal.
(O) . . . . .	1,856 × 250 × 0,311 = 144,31 Cal.

Всего теряется теплоты . . . . 1436,20 Cal.

или:

$$\frac{1436,20 \times 100}{8140} = 17,6\%.$$

Изъ сопоставленія двухъ расчетовъ оказывается, что съ увеличеніемъ вдвое объема вводимая воздуха почти вдвое увеличивается и потеря теплоты въ дымовыхъ газахъ.

На этомъ основаніи приходится признать, что всякій избытокъ воздуха сверхъ необходимаго для горѣнія понижаетъ степень использования теплоты, выдѣляемой топливомъ, поэтому, техника должна принимать мѣры къ возможному уменьшенію этого избытка путемъ правильнаго, согласнаго съ условіями горѣнія, ухода за топкою и къ контролю избытка непрерывному или періодическому.

## 2) Способы опредѣленія избытка воздуха.

**А) Способъ прямого измѣренія** объема воздуха, поступившаго въ единицу времени, вообще говоря, возможенъ.

Если извѣстно поперечное сѣченіе поддуваемаго канала  $\omega$ , въ mtr.<sup>2</sup> средняя секундная скорость воздушнаго потока  $v$ , въ mtr. температура притекающаго воздуха  $t$  и продолжительность промежутка времени  $m$  въ часахъ, начиная съ момента начала впуска до момента закрытія поддувальной дверцы, то объемъ  $Q$  въ mtr.<sup>3</sup> протекшаго воздуха, отнесенный къ 0° C. выразится формулою:

$$Q = \frac{(m \times \omega \times v \times 3600)}{(1 + \alpha t)};$$

вычисливъ далѣе на основаніи данныхъ химическаго анализа теоретически необходимый объемъ воздуха  $Q_0$  можемъ найти отношеніе:

$$n = \frac{Q}{Q_0}$$

называемое коэффициентомъ избытка.

Численный примѣръ:

Положимъ, что въ теченіе 1 часа ( $m = 1$ -цѣ) на рѣшеткѣ топливника сгораеть 10 klgr. антрацита. Химическій составъ его извѣстенъ. Теоретически подсчитанный расходъ воздуха составляетъ по вѣсу: 108,6 klgr., а по объему при  $0^\circ\text{C}$ .

$$Q_0 = \frac{108,60}{1,293} = 84,00 \text{ mtr.}^3;$$

положимъ, что сѣченіе поддувального канала:

$$\omega = 0,15 \text{ mtr.} \times 0,30 \text{ mtr.} = 0,045 \text{ mtr.}^2;$$

измѣренная анемометромъ секундная скорость воздушнаго потока въ каналѣ равна:

$$v = 1,20 \text{ mtr. въ сек.}$$

Температура притекающаго воздуха  $t = +15^\circ\text{C}$ .

При этихъ данныхъ часовой объемъ воздуха, притекающаго черезъ поддувальный каналъ въ топку при  $0^\circ\text{C}$  равенъ:

$$Q = \frac{1 \times 0,045 \times 1,20 \times 3600}{(1 + 0,00363 \times 15)} = \frac{194,40}{(1 + 0,06)} = 183,39 \text{ mtr.}^3;$$

$$\text{Отношеніе: } \frac{Q}{Q_0} = \frac{183,39}{84,00} = n = 2,183;$$

### В) Химическій способъ опредѣленія избытка воздуха, основанный на составѣ дымовыхъ газовъ.

Способъ непосредственнаго измѣренія объема воздуха  $Q$  можетъ давать только мало надежные результаты, поэтому наука и техника предпочитаютъ пользоваться косвеннымъ способомъ, основаннымъ на опредѣленіи химическаго состава дымовыхъ газовъ. Такъ какъ химическій составъ дымовыхъ газовъ находится въ опредѣленной зависимости отъ количества воздуха  $Q$  участвовавшаго въ горѣніи, то по процентному содержанію отдѣльныхъ составныхъ частей этихъ газовъ, т. е. ( $\text{CO}_2$ ), ( $\text{N}$ ) и ( $\text{SO}_2$ ) можно вычислить и точную величину  $Q$ .

Теоретическія основанія химическаго способа опредѣленія избытка воздуха заключаются въ слѣдующихъ положеніяхъ:

1) При сжиганіи одной вѣсовой ед-цы чистаго углерода ( $\text{C}$ ) съ воздухомъ, приведенный къ  $0^\circ\text{C}$  объемъ продуктовъ горѣнія (дымовыхъ газовъ ( $\text{CO}_2$ ) и ( $\text{N}$ )) въ точности равенъ объему воздуха участво-

вавшего въ горѣннн, не смотря на то, что часть кислорода (O) въ составѣ воздуха замѣщается углекислотою (CO<sub>2</sub>).

Фактъ этотъ объясняется закономъ Avogadro, по которому всѣ молекулы газообразныхъ тѣлъ занимаютъ равныя объемныя пространства.

Напримѣръ: Молекула кислорода [O<sub>2</sub>] (32 klgr.) имѣеть такой же объемъ какъ и молекула углекислоты [CO<sub>2</sub>] (44 klgr.) несмотря на присоединеніе къ O<sub>2</sub> одного атома углерода (C) (12 klgr.).

Профессоръ Бляхеръ очень наглядно представляетъ графически соотношеніе между составными частями воздуха (O) и (N) и дымовыхъ газовъ (CO<sub>2</sub>) и (N) при сжиганіи углерода съ теоретическимъ и избыточнымъ объемами воздуха.

а) Горѣнне углерода съ теоретическимъ объемомъ воздуха.

Коэффициентъ избытка  $n = 1$ .

Первоначальный составъ и объемъ дымовыхъ газовъ, и объемъ воздуха, приведенныхъ къ 0°С.

100 частей воздуха по объему при 0°С.	21% (O) по объему	100 частей дымовыхъ газовъ по объему при 0°С.	21% (CO <sub>2</sub> ) по объему	Весь кислородъ (O) перешелъ въ угле- кислоту (CO <sub>2</sub> ).
	79% (N) по объему		79% (N) по объему	

взявъ отношеніе объема кислорода къ объему углекислоты въ процентахъ, получаемъ:  $\frac{21}{21} = 1$ ;

в) Горѣнне углерода съ двойнымъ противъ теоретическаго объемомъ воздуха.

Коэффициентъ избытка  $n = 2$ .

Первоначальный составъ и объемъ дымовыхъ газовъ и объемъ воздуха, приведенныхъ къ 0°С.

100 частей воздуха по объему при 0°С.	21% (O) по объему	100 частей дымовыхъ газовъ по объему при 0°С.	10,5% (CO <sub>2</sub> ) по объему	Половина кислорода (O) по объ- ему, пере- шла въ углекисл. (CO <sub>2</sub> ).
	79% (N) по объему		10,5% (O) по объему.	

Отношеніе объема кислорода къ объему углекислоты

$$\frac{21}{10,5} = 2;$$

с) Горѣнне углерода съ тройнымъ объемомъ воздуха:

Коэффициентъ избытка  $n = 3$ .

Первоначальный состав  
и объемъ воздуха.

100 частей  
воздуха  
по объему  
при 0°C.

21% (O) по объему
79% (N) по объему

100 частей  
дымовыхъ  
газовъ  
по объему  
при 0°C.

Составъ и объемъ дымовыхъ газовъ,  
проведенныхъ къ 0°C.

7% (CO <sub>2</sub> ) по объему
14% (O) по объему.
79% (N) по объему.

Третья  
часть кис-  
лорода (O)  
перешла  
въ угле-  
кислоту.

Отношеніе первоначального объема кислорода къ объему углекислоты

$$\frac{21}{7} = 3;$$

Какъ видно изъ трехъ приведенныхъ примѣровъ, отношеніе первоначального объема кислорода въ составѣ воздуха къ объему углекислоты въ продуктахъ горѣнія представляетъ собою коэффициентъ избытка. На этомъ основаніи коэффициентъ избытка воздуха при сжиганіи углерода можетъ быть вычисленъ, если изъ состава дымовыхъ газовъ опредѣленъ объемъ углекислоты (CO<sub>2</sub>) по отношенію къ 100 объемнымъ частямъ этихъ газовъ.

2) При горѣніи водорода (H) не существуетъ найденнаго для углерода равенства объемовъ воздуха и дымовыхъ газовъ и вычисленіе коэффициента избытка воздуха затрудняется такъ какъ изъ одной молекулы кислорода O<sub>2</sub> образуются не одна, а двѣ молекулы водяныхъ паровъ 2 H<sub>2</sub>O по уравненію: 2 H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> = 2 H<sub>2</sub>O;

Кромѣ того въ приборахъ для анализа дымовыхъ газовъ происходитъ еще сокращеніе объема въ силу конденсаціи паровъ.

а) Горѣніе чистаго водорода съ теоретическимъ объемомъ воздуха n = 1.

Представимъ процессъ графически.

Первоначальный составъ и  
объемъ воздуха.

100 частей  
воздуха  
по объему  
при 0°C.

21% (O) по объему
97% (N) по объему

42% (H <sub>2</sub> O) по объему
79% (N) по объему

Такъ какъ изъ одной молекулы кислорода (O<sub>2</sub>) получаютъ при сгораніи водорода двѣ молекулы (H<sub>2</sub>O), то по закону Avogadro объемъ водяныхъ паровъ долженъ быть вдвое больше объема кислорода участвовавшего въ горѣніи, т. е. если изъ 100 объемныхъ частей воздуха 21% кислорода вступилъ въ реакцію горѣнія съ водородомъ, то объемъ водяныхъ паровъ долженъ быть равенъ 42%, по объему и слѣдовательно, объемъ дымовыхъ газовъ долженъ на 21% превышать первоначальный объемъ воздуха.

Взявъ 100 объемных частей продуктов горѣнія водорода, состоящихъ изъ водяныхъ паровъ ( $H_2O$ ) и азота (N), найдемъ, что эти вещества находятся другъ къ другу въ слѣдующихъ процентныхъ отношеніяхъ:

100 частей дымовыхъ газовъ по объему	34,7% ( $H_2O$ ) по объему.
	65,3% (N) по объему.

водяные пары ( $H_2O$ ):

$$\frac{42 \times 100}{121} = 34,7\%$$

азотъ (N):

$$\frac{79 \times 100}{121} = 65,3\%$$

Если не принимать во вниманіе объемъ водяныхъ паровъ, то при теоретическомъ объемѣ воздуха, т. е. при  $n = 1$ -цѣ въ составѣ дымовыхъ газовъ получится одинъ только азотъ (N).

в) Горѣніе водорода съ двойнымъ объемомъ воздуха

$$n = 2.$$

Первоначальный составъ  
и объемъ воздуха.

Составъ и объемъ дымовыхъ газовъ  
изъ 100 объемныхъ частей воздуха.

100 частей воздуха по объему при 0°C.	21% (O) по объему
	79% (N) по объему

89,5% сухихъ дымовыхъ газовъ на 100 частей воз- духа по объ- ему.	{	21% ( $H_2O$ ) по объему
		10,5% (O) по объему
		79% (N) по объему

При двойномъ объ-  
емѣ воздуха только  
половина его кисло-  
рода, т. е. 10,5%  
вступаютъ въ реак-  
цію и дадутъ послѣ

сгорания водорода 21% ( $H_2O$ ) водяныхъ паровъ.

Всего получится 110,5% по объему дымовыхъ газовъ по отношенію къ первоначальнымъ 100 частямъ воздуха.

Въ 100 частяхъ дымовыхъ газовъ указанного состава ( $H_2O$ ), (O) и (N) будутъ содержаться въ процентахъ:

( $H_2O$ ) . . . . .	$\frac{21 \times 100}{110,5} = 19\%$	<table border="1"> <tr> <td>19% (<math>H_2O</math>)</td> </tr> <tr> <td>9,5% (O).</td> </tr> <tr> <td>71,5% (N).</td> </tr> </table>	19% ( $H_2O$ )	9,5% (O).	71,5% (N).
19% ( $H_2O$ )					
9,5% (O).					
71,5% (N).					
(O) . . . . .	$\frac{10,5 \times 100}{110,5} = 9,5\%$				
(N) . . . . .	$\frac{74 \times 100}{110,5} = 71,5\%$				

въ 100 объ-  
емныхъ час-  
тяхъ влаж-  
ныхъ дымо-  
выхъ газовъ.

Если игнорировать водяные пары то окажется, что при двойномъ впускѣ воздуха на 100 объемныхъ частей воздуха приходится 10,5% (O) и 79% (N) т. е. всего 89,5% сухихъ дымовыхъ газовъ.

Слѣдовательно, на 100 объемных частей сухих дымовых газовъ придется:

100 объемных частей сухих дымовых газовъ.	$\frac{11,7^{\circ}_0 (O)}{\text{по объему}}$	$\frac{10,5 \times 100}{89,5} = 11,7^{\circ}_0$ кислорода (O) по объему
	$\frac{88,3^{\circ}_0 (N)}{\text{по объему}}$	$\frac{79 \times 100}{89,5} = 88,3^{\circ}_0$ азота (N) . . . . .

с) Горѣніе водорода съ тройнымъ объемомъ воздуха при  $n = 3$ .

Представимъ процессъ также диаграммами, аналогичными съ выше-приведенными.

Первоначальный составъ и объемъ воздуха.	Объемъ продуктовъ горѣнія, получающійся изъ 100 объемных частей воздуха.	
$\frac{21^{\circ}_0 (O)}{\text{по объему}}$	$\frac{14^{\circ}_0 (H_2O)}{\text{по объему}}$	} $93^{\circ}_0$ Изъ $21^{\circ}_0$ кислорода сухихъ въ реакцію горѣнія дымовыхъ вступаетъ только $\frac{1}{3}$ газовъ. т. е. $7^{\circ}_0$ по объему и
$\frac{79^{\circ}_0 (N)}{\text{по объему}}$	$\frac{14^{\circ}_0 (O)}{\text{по объему}}$	
100 частей воздуха по объему	$\frac{79^{\circ}_0 (N)}{\text{по объему}}$	

даетъ вдвое большій объемъ водяныхъ паровъ, т. е.  $14^{\circ}_0$ . Кромѣ того  $14^{\circ}_0$  кислорода и  $79^{\circ}_0$  азота переходятъ непосредственно въ продукты горѣнія.

Такимъ образомъ объемъ, влажныхъ дымовыхъ газовъ увеличивается до  $107^{\circ}_0$ ,

Въ 100 объемныхъ частяхъ влажныхъ газовъ будетъ содержаться:

$(H_2O)$ . . . . .	$\frac{14 \times 100}{107} = 13,08^{\circ}_0$	$13,08^{\circ}_0 (H_2O)$	въ 100 объемныхъ частяхъ влажныхъ дымовыхъ газовъ.
$(O)$ . . . . .	$\frac{14 \times 100}{107} = 13,08^{\circ}_0$	$13,08^{\circ}_0 (O)$	
$(N)$ . . . . .	$\frac{79 \times 100}{107} = 73,84^{\circ}_0$	$73,84^{\circ}_0 (N)$	

При тройномъ впускѣ воздуха на 100 объемныхъ его частей приходится  $93^{\circ}_0$  сухихъ дымовыхъ газовъ по объему, поэтому, въ 100 объемныхъ частяхъ сухихъ дымовыхъ газовъ должно содержаться:

$\frac{14 \times 100}{93} = 15,10^{\circ}_0$ (O) по объему	} въ 100 объемныхъ частяхъ сухихъ дымовыхъ газовъ.
$\frac{79 \times 100}{93} = 84,90^{\circ}_0$ (N) „	

Для того, чтобы нагляднѣе представить зависимость состава дымовыхъ газовъ отъ избытка воздуха, и процентнаго содержанія въ топливѣ (С) и (Н) разберемъ нѣсколько численныхъ примѣровъ.

Численный примѣръ № 1-й.

Англійскій каменный (уголь (Кардифъ) имѣетъ химическій составъ:

(С) . . 88,23%	по вѣсу въ 100 частяхъ угля.
(Н) . . 4,66	Полагая, что часть кислорода воздуха,
(О) . . 1,00	соединена съ водородомъ топлива въ про-
(N) . . 1,26	порціи воды и что участвуетъ въ горѣніи
(S) . . 1,27	только $(Н - \frac{О}{8})$ кислорода воздуха,
Воды (H <sub>2</sub> O) 0,68	
Зола . . 2,90	имѣетъ составъ горючихъ элементовъ
<hr/>	даннаго топлива въ видѣ:
Всего 100,00%	

$$\left. \begin{aligned} (С) &= 88,23\% ; \\ \left( Н - \frac{О}{8} \right) &= \left( 4,66 - \frac{1,00}{8} \right) = 4,54\% . \\ (S) &= 1,27\% . \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Положимъ коэффициентъ из-} \\ \text{бытка } n = 2. \end{array}$$

Изъ 100 объемныхъ частей воздуха, въ этомъ случаѣ половина его кислорода т. е. 10,5% по объему превращается въ (СО<sub>2</sub>), (Н<sub>2</sub>О) и (SO<sub>2</sub>).

Количества кислорода, участвующія въ образованіи этихъ газовъ, завися отъ состава топлива, могутъ быть вычислены слѣдующимъ образомъ:

для образованія (СО<sub>2</sub>) требуется по вѣсу кислорода:

$$88,23 \times \frac{8}{3} = 235,28 \text{ klgr} = \frac{235,28}{1,43} = 164,53 \text{ mtr}^3;$$

для образованія водяныхъ паровъ (Н<sub>2</sub>О) изъ водорода:

$$4,54 \times 8 = 36,32 \text{ klgr} = \frac{36,32}{0,805} = 45,11 \text{ mtr}^3;$$

для образованія (SO<sub>2</sub>):

$$1,27 \times 1,60 = 1,27 \text{ klgr} = \frac{1,27}{2,86} = 0,45 \text{ mtr}^3;$$

Всего образуется:

$$164,53 + 45,11 + 0,45 = 210,09 \text{ mtr}^3;$$

кислорода въ дымовыхъ газовъ.

Пропорціоально этимъ объемнымъ количествамъ распредѣляются и цифры расхода кислорода, состояющаго въ общемъ 10,5% отъ

100 объемных частей воздуха, т. е. на образование (CO<sub>2</sub>) пойдет:

$$\frac{10,5 \times 164,53}{210,09} = 8,22\% \text{ кислорода по объему;}$$

$$\text{На образование (H}_2\text{O): } \frac{10,5 \times 45,11}{210,09} = 2,25\%.$$

$$\text{На образование (SO}_2\text{): } \frac{10,5 \times 0,45}{210,09} = 0,03\%.$$

---

Всего . 10,5% кислорода по объему.

При анализѣ дымовыхъ газовъ въ специальныхъ приборахъ пары воды конденсируются и выпадаютъ, поэтому составъ и объемъ сухихъ дымовыхъ газовъ, получающихся изъ 100 объемныхъ частей воздуха будутъ выражаться слѣдующими цифрами въ процентахъ:

Неизмѣнное количество азота (N) . . . . .	79%	по объему.
Кислорода (O) не участвовавшего въ горѣнн. . . . .	10,50%	»
Образовавшейся углекислоты (CO <sub>2</sub> ): . . . . .	8,22%	»
Сѣрнистаго газа . . . . .	0,03%	»

---

Всего сухихъ дымовыхъ газовъ . . 97,75% по объему.

процентное содержаніе дымовыхъ газовъ (CO<sub>2</sub>), (N), (O) и (SO<sub>2</sub>) въ 100 объемныхъ частяхъ сухихъ продуктовъ равно:

$$\text{азота (N): } . . . . . \frac{79 \times 100}{97,75} = 80,81\%$$

$$\text{кислорода (O): } . . . \frac{10,5 \times 100}{97,45} = 10,74\%$$

$$\text{углекислоты (CO}_2\text{): } \frac{8,22 \times 100}{97,75} = 8,40\%$$

$$\text{сѣрнистаго газа (SO}_2\text{): } \frac{0,03 \times 100}{97,75} = 0,05\%$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{CO}_2 + \text{O} = 19,14\%$$

---

Всего . . 100% по объему.

Разсмотренный нами примѣръ даетъ возможность вывести формулу для опредѣленія коэффициента избытка n, если извѣстны цифры анализа 100 объемныхъ частей сухихъ дымовыхъ газовъ. Положимъ, что анализъ газовъ далъ найденныя выше цифры, именно:

Въ 100 объемныхъ частяхъ сухихъ дымовыхъ газовъ оказалось:

Азота (N) . . . . .	80,81%
Кислорода (O) . . . . .	10,74%
Углекислоты (CO <sub>2</sub> ) . . . . .	8,40%
Сѣрнистаго газа (SO <sub>2</sub> ) . . . . .	0,05%

Въ объемъ влажныхъ газовъ, образовавшихся изъ 100 объемныхъ частей воздуха азота могло быть только 79%, а въ 100 объемныхъ

частяхъ сухихъ газовъ 80,81%, слѣдовательно надо уменьшить цифры анализа въ отношеніи  $\frac{79}{80,81}$ , тогда свободный кислородъ въ дымовыхъ газахъ по отношенію къ первоначальнымъ 100 объемнымъ частямъ воздуха составитъ:

$$\frac{10,74 \times 79}{80,81} = \frac{(O) \times 79}{(N)} = 10,5\%.$$

Такъ какъ первоначальное содержаніе кислорода въ 100 объемныхъ частяхъ воздуха составляло 21%, то, слѣдовательно объемъ сгорѣвшаго кислорода составляетъ:  $21 - 10,5 = 10,5\%$  (O).

Слѣдовательно, коэффициентъ избытка воздуха  $n$  можетъ быть найденъ изъ выраженія:

$$n = \frac{21}{21 - \frac{(O) \times 79}{(N)}} = \frac{21}{21 - 10,5} = 2.$$

Составъ формулы подсказываетъ методъ опредѣленія коэффициента избытка по даннымъ анализа дымовыхъ газовъ, именно:

а) Все вычисленіе основывается на способности азота (N) дѣликомъ переходить въ составъ дымовыхъ газовъ изъ состава воздуха. По процентному объемному содержанію азота въ дымовыхъ газахъ сравнительно съ первоначальнымъ содержаніемъ его въ воздухѣ, т.е. съ 79%, вычисляють процентное по объему содержаніе дымовыхъ газовъ получившихся изъ 100 объемныхъ частей воздуха.

б) Вычисляють объемъ оставшагося въ дымовыхъ газахъ кислорода по отношенію къ 100 объемнымъ частямъ воздуха и находятъ объемное количество кислорода, т.е. разницу сравнительно съ 21%.

с) дѣленіемъ первоначальнаго количества (O) т.е. 21 на количество сгорѣвшаго (O), т.е. на разницу  $21 - \frac{(O) \times 79}{(N)}$ , находятъ коэффициентъ избытка  $n$ .

### Численный приѣръ № 2.

Положимъ, что химическій анализъ дымовыхъ газовъ далъ слѣдующія цифры:

въ 100 объемныхъ частяхъ сухихъ дымовыхъ газовъ оказалось:

азота (N) . . . . .	79,20%
кислорода (O) . . . . .	14,03%
углекислоты (CO <sub>2</sub> ) . . . . .	6,77%

Всего 100%, по объему.

Опредѣлить коэффициентъ избытка воздуха  $n$ . Объемъ азота въ 100 первоначальныхъ объемныхъ частяхъ воздуха составлялъ 79%, поэтому цифры анализа надо уменьшить въ отношеніи  $\frac{79}{79,20}$ ; тогда объ-

емь кислорода въ продуктахъ горѣнія по отношенію къ 100 объемнымъ частямъ воздуха будетъ равенъ:  $\frac{14,03 \times 79}{79,20} = 14,00\%$

или по формулѣ:  $\frac{(O) \times 79}{(N)} = 14,00\%$ .

Разница между первоначальнымъ содержаніемъ кислорода и окончательнымъ равна  $21 - \frac{(O) \times 79}{(N)} = 21 - 14 = 7\%$ .

Отношеніе первоначальнаго  $\%$ -наго содержанія кислорода (21%) къ сгорѣвшему (7%) равна  $\frac{21}{7} = 3$ ; слѣдовательно, коэффициентъ избытка воздуха равенъ  $n = 3$ .

### Примѣръ № 3 й.

Анализъ дымовыхъ газовъ далъ цифры:  
въ 100 объемныхъ частяхъ сухихъ дымовыхъ газовъ содержится:

(N) . . . . .	80,7%	}	Вычислить коэффициентъ избытка воздуха n.
(O) . . . . .	4,8%		
CO <sub>2</sub> . . . . .	13,8%		
CO . . . . .	0,7%		

$$n = \frac{21}{21 - \frac{(O) \times 79}{(N)}} = \frac{21}{21 - \frac{4,8 \times 79}{80,7}} = \frac{21}{16,3} = 1,29.$$

При маломъ избыткѣ воздуха, равномъ 1,29, въ дымовыхъ газахъ оказался продуктъ неполнаго горѣнія (CO); при вычисленіи количество (CO) не принято во вниманіе по своей малой величинѣ.

Приведенными примѣрами достаточно уясняется химическій способъ опредѣленія избытка воздуха при горѣніи по даннымъ химическаго анализа дымовыхъ газовъ.

## ГЛАВА VI.

### О топливѣ.

#### 1. Опредѣленіе понятія о топливѣ вообще.

Всякое горючее вещество, способное вступать въ экзотермическую реакцію съ кислородомъ воздуха, т.-е. окисляться съ выдѣленіемъ значительнаго количества теплоты можетъ быть названо топливомъ, но лишь въ самомъ общемъ смыслѣ слова.

Съ этой точки зрѣнія топливомъ могъ бы быть названъ, напри-

мѣръ, металлическій магній (Mg) способный ярко и съ выдѣленіемъ теплоты горѣть на воздухѣ, при чемъ реакція горѣнія протекаетъ по ур-нію:  $2M + O_2 = 2MgO$ ;

точно также сѣра (S), окисляясь при соединеніи съ кислородомъ воздуха по ур-нію:  $S + O_2 = SO_2$ , выдѣляетъ теплоту въ значительномъ количествѣ.

Однако же ни магній, ни сѣра не могутъ считаться топливомъ въ обыденномъ смыслѣ слова.

Металлическій магній рѣдокъ и дорогъ, сѣра является даже въ небольшихъ количествахъ вредной примѣсью другихъ видовъ горючихъ веществъ; продуктъ ея сгорания—сѣрнистый газъ—вреденъ для животныхъ организмовъ и для металловъ. Слѣдовательно, далеко не всякое горючее вещество можетъ быть подведено подъ понятіе топлива. Для этого требуется, чтобы горючее удовлетворяло нѣкоторымъ особымъ условіямъ.

## 2. Коммерческія и техническія условія, которымъ должно удовлетворять промышленное топливо.

Промышленнымъ или техническимъ всякое топливо становится лишь тогда, когда удовлетворяетъ нижеслѣдующимъ главнѣйшимъ требованіямъ рынка.

### А) Коммерческія условія:

а) Запасы естественнаго горючаго въ природѣ должны быть обширными, добыча и предварительная обработка—технически просты и дешевы.

б) Центры добычи горючаго не должны быть слишкомъ удалены отъ раіоновъ потребления, дабы стоимость транспорта не препятствовала выгоды потребления.

в) Въ раіонахъ добычи естественное горючее не должно имѣть другого, болѣе выгоднаго техническаго примѣненія.

г) Пути сообщенія раіоновъ добычи топлива съ центрами потребления должны быть надежны и обильно снабжены средствами транспорта, дабы всегда могли обеспечивать достаточные запасы на мѣстахъ потребления.

д) Рыночныя цѣны на 1-цу вѣса даннаго горючаго должны оправдываться величиною его полезной теплопроизводительной способности по сравненію съ другими видами топлива въ данномъ раіонѣ.

е) Всѣ виды искусственнаго топлива по возможности должны представлять собою малоцѣнные во всѣхъ другихъ отношеніяхъ отбросы различныхъ видовъ фабрично-заводской и сельско-хозяйственной промышленности.

В) Техническія условія:

а) Всѣ виды твердаго и жидкаго горючаго должны выдерживать транспортъ безъ ухудшенія своихъ физическихъ свойствъ; давать возможно меньше отбросовъ и убыли въ пути.

б) Содержаніе углерода въ топливѣ должно быть возможно высокимъ, такъ какъ имъ обусловливается теплопроизводительность топлива.

в) Горючее не должно содержать въ своемъ составѣ элементовъ, разрушительно дѣйствующихъ на материалы очаговъ и котловъ, въ которыхъ оно сжигается.

г) Продукты горѣнія должны получаться въ газообразномъ видѣ и не должны содержать ядовитыхъ примѣсей, опасныхъ для здоровья людей и животныхъ.

е) Топливо должно легко и быстро загораться; процессъ горѣнія долженъ протекать устойчиво, т.-е. не прекращаться разъ начавшись; уходъ за процессомъ сжиганія долженъ быть простъ, чтобы не требовать сложныхъ техническихъ приспособленій и большого персонала машинистовъ и кочегаровъ.

и) Способы хранения запасовъ горючаго должны быть дешевыми.

к) Физическія свойства топлива должны исключать возможность самовозгоранія на складахъ.

Само собою разумѣется, что топливо, удовлетворяющее всѣмъ этимъ условіямъ, можетъ быть названо идеальнымъ. Такого топлива въ природѣ не существуетъ. Всѣ извѣстные до сихъ поръ виды естественнаго и искусственнаго горючаго могутъ удовлетворить, да и то не полностью, только нѣкоторымъ изъ этихъ требованій.

Понятно, что въ зависимости отъ степени, въ которой данное топливо приближается къ намѣченному выше идеалу, опредѣляется его техническая и рыночная цѣнность.

### 3. Классификація видовъ топлива.

Всѣ весьма разнообразныя виды горючаго могутъ быть классифицированы, прежде всего, съ точки зрѣнія происхожденія его, раздѣляясь на *естественное* и *искусственное*.

Въ свою очередь *естественное топливо* дѣлится по *физическому состоянію* на *твердое*, *жидкое* и *газообразное*.

Дальнѣйшая классификація по отношенію къ *твердому топливу* различаетъ *растительное* (древесное и травянистое) и *ископаемое* топливо и т. д.

Весьма удобно и просто дальнѣйшая классификація видовъ топлива представляется на прилагаемой здѣсь таблицѣ.

Таблица № 23 я.

Классификация различных видов топлива.

Физическое состояние горючего.	Естественное топливо.		Искусственное топливо.	
	Растительные виды.	Ископаемые виды.	Продукты обработки отходов различных производств и ископаемых видов горючего.	Ископаемых.
Твердое горючее.	1) Древесное: а) дрова б) сучья, хворостъ в) валежникъ д) пни, корчаги. 2) Травянистое: а) камышь б) бурьянъ.	1) Торфъ 2) бурые угли 3) каменные угли 4) антрациты.	1) Древесные: а) стружки, опилки, корье б) древесный уголь. 2) Растительные: а) солома б) шелуха подсолнечника и гречихи в) жмыхи д) кизякъ	1) Торфяной коксъ 2) каменноугольный коксъ 3) брикеты изъ угольной мелочи и пыли
	Жидкое горючее.	—	1) Нефть 2) нефтяные остатки (Мазуть).	а) деготь б) алкоголь в) древесная смола д) древесный смъртъ е) животные жиры.
Газообразное горючее.		—	1) Природный газъ (Пенсильванія) Апшеронскій полуостровъ, Самарская губ. и др. мѣсторожденія.	—

Пользуясь порядкомъ этой таблицы, рассмотримъ техническія свойства главнѣйшихъ видовъ горючего.

**Твердое топливо.**

Согласно приложенной выше таблицы къ твердымъ видамъ естественнаго горючаго отнесены всѣ растительныя (древесныя и травя-

нистыя породы и ископаемые виды: торфъ, бурые и каменные угли и антрациты.

**1. Химическій составъ естественнаго твердаго горючаго.**

Элементы, составляющіе вещество горючаго, раздѣляются на двѣ группы: *органическую и минеральную*; первую группу составляютъ такъ называемые «Органогены»: водородъ (H), углеродъ (C), кислородъ (O), азотъ (N). Во вторую группу входятъ: сѣра, фосфоръ, кремне-кислота, окиси желѣза и алюминія, щелочныхъ и щелочно-земельныхъ металловъ.

Кромѣ того, всѣ виды твердаго топлива содержатъ влагу ( $H_2O$ ) въ большемъ или меньшемъ количествѣ.

Изъ органогеновъ горючими элементами являются углеродъ (C) и водородъ (H), кислородъ (O) самъ по себѣ не горитъ и считается связаннымъ съ водородомъ въ пропорціи воды. Азотъ (N) совершенно нейтраленъ по отношенію къ реакціи горѣнія.

Изъ минеральныхъ веществъ горючими являются сѣра (S) и фосфоръ (Ph), содержаніе послѣдняго во всѣхъ видахъ твердаго топлива ничтожно и можетъ быть не принимаемо во вниманіе.

Негорючіе элементы минеральной группы послѣ сгоранія органогеновъ и сѣры даютъ твердый минеральный остатокъ—*золу*.

Продуктами же горѣнія органогеновъ и сѣры являются пары воды ( $H_2O$ ) и различныя газообразныя вещества, главнымъ образомъ, углекислота ( $CO_2$ ) и сѣрнистый газъ ( $SO_2$ ).

Процентное содержаніе органогеновъ, влаги и золы въ различныхъ видахъ твердаго топлива приведено въ прилагаемой здѣсь таблицѣ.

**Таблица № 24-й.**

Химическаго состава твердыхъ видовъ естественнаго топлива.

Родъ твердаго горючаго.	ОРГАНОГЕНЫ:			МИНЕРАЛЬНЫЯ ВЕЩЕСТВА:			Абсолютная тепло- творная способ- ность (при полномъ охлажде- ніи) $K_1$ .
	Углеродъ (C).	Водородъ (H).	Кислородъ и азотъ (O + N).	Горючія.		Не горючія.	
				Сѣра (S.)	Вода ( $H_2O$ ).		
Дрова (естественной воздушной сушки)	42,50	5,10	35,70	0,55	15,00	0,85	3700
Торфъ (лежащий на воздухѣ)	46,00	4,70	29,00	0,60	14,00	5,70	3950
Бурый уголь	40,00	3,50	10,00	2,00	36,00	8,50	3720
Каменный уголь	76—85,5	5,00—4,00	10,00—3,50	1,00—2,00	2,00—0,80	6,00—4,20	7250—8000
Антрацитъ	93—00	3,00	2,20	0,80	—	1,00	8300

Эта таблица указываетъ на полную аналогію составныхъ элементовъ растительнаго и ископаемаго твердаго горючаго.

Разница только количественная.

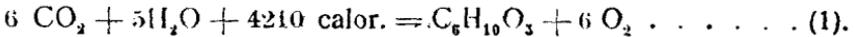
Данныя этой таблицы въ извѣстной мѣрѣ подкрѣпляютъ господствующую въ современной наукѣ теорію объ общности происхожде-

нія всѣхъ выше перечисленныхъ видовъ горючаго изъ одного первоначальнаго основнаго вещества растительнаго происхожденія.

**Теорія органическаго происхожденія ископаемыхъ видовъ твердаго горючаго.**

Основой всякой растительной ткани является клѣтчатка (целлюлёза); химическій составъ чистой клѣтчатки ( $C_6H_{10}O_5$ ).

Клѣтчатка образуется въ зеленыхъ клѣточкахъ листьевъ растений, при условіи поглощенія солнечной энергіи изъ углекислоты и воды, по ур-нію:



Процессъ образованія клѣтчатки, какъ видимъ, эндотермичень, т.-е., сопровождается поглощеніемъ теплоты извнѣ и ея преобразованіемъ.

Въ составѣ чистой клѣтчатки органогены заключаются въ пропорціи

$$44,44 (C) + 6,17 (H) + 49,39 (O) \dots \dots (2).$$

По возрѣніямъ органической теоріи всего ближе къ составу чистой клѣтчатки долженъ подходить химическій составъ различныхъ древесныхъ и трааянистыхъ породъ, при чемъ колебанія въ цифрахъ содержанія органогеновъ должны быть незначительными, такъ какъ, повторяемъ, главнѣйшей составной частью всѣхъ ихъ является клѣтчатка.

Прежде всего, изслѣдованіями Віолетта доказано постоянство состава отдѣльныхъ частей одной и той же древесной породы, какъ это видно изъ прилагаемой таблицы.

**Таблица № 25-й.**

Состава частей одной и той же древесной породы:

Части древесной породы.		Органогены высушеннаго вещества.			З О Л А.
		Углеродъ (С).	Водородъ (Н).	Кислородъ и азотъ (О + N).	
Стволь	Кора . . .	46,26	5,90	44,70	2,60
	Древесина.	48,90	6,40	44,30	0,29
Вѣтви . . .	Листья . .	45,00	6,97	40,90	7,12
	Кора . . .	48,80	6,30	41,10	3,68
	Древесина.	49,90	6,60	43,30	0,13
Корни . . .	Кора . . .	50,30	6,07	41,90	1,60
	Древесина.	47,40	6,26	46,10	0,20

Точно также изслѣдованія, произведенныя надъ различными древесными породами показали незначительныя колебанія процентнаго содержанія въ нихъ органигеновъ. Приводимъ здѣсь таблицу данныхъ Фишера.

Таблица № 26-я.

Сравнительнаго содержанія органигеновъ въ различныхъ древесныхъ породахъ.

Древесныя породы.	О Р Г А Н О Г Е Н Ы.			З О Л А.
	Углеродъ (С).	Водородъ (Н).	Кислородъ и азотъ (О + N).	
Сосна . . . . .	50,1	6,00	43,2	0,70
Береза . . . . .	48,5	5,9	45,3	0,30
Дубъ . . . . .	49,8	5,8	44,00	0,40
Букъ . . . . .	46,6	5,8	45,00	0,60
Аиация . . . . .	49,2	5,9	43,1	0,80

Кромѣ того, въ нижеслѣдующей сравнительной таблицѣ приводимъ содержаніе однихъ органигеновъ въ совершенно высушенной древесинѣ за удаленіемъ зола.

Сравнительная таблица № 27-я.

Содержанія органигеновъ въ 100 частяхъ обеззоленной и совершенно высушенной древесины.

ДРЕВЕСНАЯ ПОРОДА.	Углеродъ (С).	Водородъ (Н).	Кислородъ (О) азотъ (N).
Дубъ . . . . .	50,64	6,03	42,05 + 1,28
Букъ . . . . .	49,48	6,08	44,44
Кленъ . . . . .	49,80	6,31	43,89
Береза . . . . .	50,60	6,23	42,04 + 1,12
Ильмъ . . . . .	50,19	6,43	43,39
Ива . . . . .	51,75	6,19	41,08 + 0,98
Ольха . . . . .	49,19	6,22	44,59
Ель . . . . .	49,95	6,40	43,65
Сосна . . . . .	49,94	6,25	43,81
Лиственница . . . . .	56,11	6,31	43,58

Считая, что всѣ виды ископаемаго топлива произошли изъ клѣтчатки, органическая теорія указываетъ, что содержаніе органигеновъ въ различныхъ ископаемыхъ горючихъ должно слѣдовать опредѣленному закону, именно: расположивъ всѣ вещества, начиная съ клѣтчатки, въ рядъ: клѣтчатка, древесныя породы, торфъ, бурые угли, каменные угли, антрациты въ восходящемъ по древности образованія порядкѣ, мы заранѣе должны допустить:

- а) Увеличеніе содержанія углерода (С) въ томъ же порядкѣ.
- б) Уменьшеніе содержанія водорода (Н).
- с) Уменьшеніе содержанія кислорода (О) и азота (N).

Нижеслѣдующія цифры, какъ нельзя лучше подтверждаютъ выводы теоріи, напримѣръ:

Клѣтчатка . . . . .	44,44 (С) + 6,17 (Н) + 49,39 (О).
Дерево (въ среднемъ)	49,20 (С) + 6,10 (Н) + 44,70 (О + N).
Антрацитъ . . . . .	93,00 (С) + 3,00 (Н) + 2,20 (О + N).

Въ этой цѣпи антрацитъ является послѣднимъ звеномъ—онъ самое древнее по времени образованія горючее. Еще болѣе древнимъ является графитъ—чистый углеродъ—тѣло не горючее.

Торфъ, бурые и каменные угли разсматриваются какъ промежуточные стадіи преобразованія и минерализаціи клѣтчатки.

На вопросъ, какими процессами органическая теорія объясняетъ послѣдовательныя преобразованія клѣтчатки вплоть до антрацита и графита, теорія отвѣчаетъ слѣдующее.

Образованіе торфа происходитъ на нашихъ глазахъ на торфяныхъ болотахъ. Происхожденіе торфа изъ частей болотныхъ растений не подлежитъ никакому сомнѣнію.

Главнѣйшими растениями, изъ которыхъ образуется торфъ, являются различные виды мховъ:

*Sphagnum*, *Hypnum*, *Sph. cymbifolium*, *recurvum*, *cuspidatum*.

Осенью отмершія части растений погружаются въ стоячую болотную воду, заливаются и весенними водами. При содѣйствіи особыхъ микроорганизмовъ начинается процессъ торфяного броженія при недостаточномъ притокѣ кислорода и соотвѣтствующей температурѣ среды (6° С. — 8° С); ходъ процесса не заканчивается полнымъ разложеніемъ, полной минерализаціей органическаго (азотъ—содержащаго вещества), а замираетъ въ стадіи лишь его расщепленія—неполной минерализаціи. Продуктомъ этого незакончившагося процесса является торфъ.

Важное значеніе указаннаго выше maximum'a температуры подтверждается тѣмъ обстоятельствомъ, что жаркій климатъ не благоприятствуетъ образованію торфа, такъ какъ обиліе теплоты способствуетъ быстрому и полному окончанію процесса окисленія органическихъ веществъ и ихъ минерализаціи.

Болѣе труднымъ представляется распространить воззрѣнія теоріи на причины и условія образованія углей.

Доказательства по отношенію къ происхожденію углей распадаются на прямыя и косвенныя.

Къ числу непосредственныхъ доказательствъ относятся:

а) Остатки и отпечатки частей растений, зародыши и споры, обнаруженные въ кускахъ угля микроскопическими изслѣдованіями.

б) Результаты химическаго анализа, устанавливающіе общность (и лишь количественное различіе) состава углей съ деревомъ и торфомъ.

в) Присутствіе въ пластахъ каменныхъ углей древеснаго угля, съ ясно сохранившимися слѣдами органическаго строенія растительныхъ клѣтокъ.

Косвенными доказательствами считаются лабораторныя опыты надъ древесиной. Такіе опыты были продѣланы Каньярь де-Лятуромъ и Виолеттомъ.

Каньярь де-Лятурь нагрѣвалъ до  $+360^{\circ}$  С. въ запаянной трубкѣ высушенную древесину различныхъ породъ деревьевъ съ водою. Въ результатѣ получалась черная масса, похожая на жирный каменный уголь, горящая коптящимъ пламенемъ.

Таковы же были результаты опытовъ Виолетта и другихъ ученыхъ.

Изложенные выше факты на ряду съ непосредственнымъ наблюденіемъ надъ кусками дерева находящагося подъ водою 2—3 года при высокой температурѣ (отъ  $+50^{\circ}$  до  $+80^{\circ}$  С.) и превращающагося въ подобіе бурога угля по внѣшнимъ признакамъ, дали основаніе предполагать, что и въ природѣ образованіе углей совершалось такимъ же путемъ, т.-е. что остатки растений доисторической флоры погружались въ воду и при высокой температурѣ подвергались процессу неполнаго окисленія. Предполагаютъ, что пласты каменнаго угля образовались изъ остатковъ хвощей, плауновъ и гигантскихъ папоротниковъ первобытной флоры.

Пласты этихъ отложений первоначально представляли по своему строенію подобіе современнаго торфа и лишь съ теченіемъ времени уплотнялись; процессъ внутренняго горѣнія медленно уменьшалъ количество азота, кислорода и водорода и увеличивалъ процентное содержаніе углерода.

Такимъ образомъ, по относительному содержанію элементовъ въ составѣ угля можно судить о степени его древности. Мукъ составилъ нижеслѣдующую таблицу химическаго состава горючихъ:

Таблица № 28-й.

В Е Ш Е С Т В А .	Углеродъ (С).	Водородъ (Н).	Кислородъ (О).	Азотъ (N).
Древесина . . . . .	50	6	43	1
Торфъ . . . . .	59	6	33	2
Бурый уголь . . . . .	69	5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	25	0,8
Каменный уголь . . . . .	82	5	13	0,8
Антрацитъ . . . . .	95	2,5	2,5	только слѣды.
Графитъ . . . . .	100	—	—	—

Эта таблица ясно указываетъ, какой процессъ совершался на пути отъ клѣтчатки до графита.

Съ химической точки зрѣнія процессъ образованія торфа характеризуется выдѣленіемъ изъ гниющей растительной массы метана  $\text{CH}_4$  (болотный газъ) и углекислоты  $\text{CO}_2$ . Окисленіе углерода въ обѣихъ этихъ случаяхъ происходитъ при недостаточномъ притока воздуха на счетъ отнятія кислорода у клѣтчатки. Слѣдовательно, чѣмъ больше прошло времени съ начала процесса, тѣмъ бѣднѣе кислородомъ и водородомъ должно быть вещество и тѣмъ выше въ немъ содержаніе углерода.

Распространивъ этотъ же взглядъ на угли, получимъ совершенно удовлетворительное объясненіе къ цифрамъ таблицы Мука.

Изложивъ въ бѣглыхъ чертахъ сущность органической теоріи происхожденія всѣхъ твердыхъ видовъ естественнаго топлива, рассмотримъ главнѣйшія техническія свойства видовъ наиболѣе употребительныхъ въ промышленности.

### Древесное топливо.

#### Средній химическій составъ дерева.

Данными предыдущихъ таблицъ доказано, что химическій составъ различныхъ частей одной и той же породы дерева почти одинаковъ; точно также выяснено, что содержаніе органическихъ и минеральныхъ примѣсей для различныхъ древесныхъ породъ колеблется въ очень тѣсныхъ предѣлахъ.

Средній составъ дерева послѣ просушки при  $+140^\circ \text{C}$ . по Пекле:  
 $50,00 (\text{C}) + 6,00 (\text{H}) + 41,00 (\text{O}) + 1,00 (\text{N}) + 2,00 (\text{зола}) = 100\%$ .

По Менделѣву: для высушеннаго дерева найдено:  
 $50,00 (\text{C}) + 6,00 (\text{H}) + 43,10 (\text{O}) + 0,30 (\text{N}) + 0,60 (\text{зола}) = 100\%$ .

**Содержаніе и химическій составъ золы.**

Содержаніе негорючихъ минеральныхъ примѣсей, образующихъ золу, въ среднемъ, для всѣхъ древесныхъ породъ не превышаетъ 2%, но въ различныхъ частяхъ одного и того же дерева оно можетъ доходить до 7%.

Такъ, согласно данныхъ табл. № 25-й корни содержатъ золы въ среднемъ 0,9%, при чемъ въ ихъ древесинѣ золы не болѣе 0,2%, въ корняхъ же до 1,6%, далѣе всѣ части ствола даютъ вмѣстѣ 1,45%, при чемъ на долю древесины приходится только 0,29%, а на кору—2,6%.

Наконецъ, части кроны содержатъ въ отдѣльности: листья 7,12%; кора 3,68% и древесина только 0,13%. Въ среднемъ крона даетъ 3,64% золы. Такимъ образомъ среднее содержаніе золы въ корняхъ 0,90%, въ стволѣ 1,45% и въ кронѣ 3,64%. Меньше всего даетъ золы древесина отъ 0,29%—0,13%, больше всего даютъ листья 7,12%.

Химическій составъ негорючей минеральной части, дающей золу, очень сложенъ и непостояненъ.

Важное вліяніе на характеръ золы имѣетъ почва, на которой росло дерево.

Henneberg составилъ интересную таблицу, наглядно показывающую, какъ и въ чемъ выражается вліяніе состава почвы на составъ золы.

**Таблица Henneberg'a № 29-й.**

Составныя части минеральной группъ (золы) въ деревѣ.	Преобладающій характеръ почвы.		
	Известнякъ.	Гипсъ.	Песчаникъ.
Угле-каліевая соль . . . . .	6,7	14,6	4,7
Угле-натріевая . . . . .	11,6		
Сѣрно-каліевая . . . . .	4,4	3,4	23,3
Хлористый натръ . . . . .	0,7	слизь	5,00
Растворы солей . . . . .	22,8	18,00	36,2
Угле-кальціевая . . . . .	27,4	30,9	21,1
Магnezія . . . . .	17,7	12,2	12,4
Соли фосфорной кислоты . . . . .	15,6	9,7	10,9
Кремнеземъ . . . . .	16,9	28,7	18,4
Нерастворимое . . . . .	77,60%	81,50%	61,00%

Содержаніе фосфора въ деревь вообще ничтожно и цѣликомъ зависитъ отъ свойства почвы. Хвойныя породы въ 4—5 разъ бѣднѣе фосфоромъ, чѣмъ лиственныя.

Содержаніе фосфора въ хвойныхъ породахъ при зимней рубкѣ больше, чѣмъ при весенней или лѣтней.

### Содержаніе влаги въ деревь.

Содержаніе влаги въ различныхъ породахъ дерева свѣже срубленнаго весьма различно и въ среднемъ согласно данныхъ таблицы № 30-й, составляетъ:

Таблица № 30-й.

Содержаніе влаги въ различныхъ древесныхъ породахъ.

Древесная порода.	Дубъ.	Букъ.	Красныя букъ.	Ильмъ.	Ольха.	Береза.	Ель.	Сосна.	Пихта.
% ое сод. влаги . . . . .	35	18	40	44	42	31	37		45

Въ частяхъ одной и той же породы содержаніе влаги очень различно: вѣтви, напримѣръ, могутъ иногда содержать до 60% воды, тогда какъ въ стволѣ оно не превышаетъ 35%, вообще чѣмъ ближе къ срединѣ дерева по высотѣ, тѣмъ меньшее содержаніе влаги надо ожидать.

Время рубки очень вліяетъ на содержаніе влаги въ деревь: дрова, зимней рубки гораздо суше, чѣмъ срубленные весною или лѣтомъ.

Способъ храненія и продолжительность пребыванія на складахъ также вліяетъ на содержаніе влаги въ деревь, такъ: если дерево свѣже срубленное зимою содержало 40% влаги, то черезъ 6 мѣсяцевъ нахожденія на складѣ на воздухѣ въ немъ останется только 25—20%, еще черезъ годъ не болѣе 17%.

Способъ транспорта также вліяетъ на содержаніе влаги: дрова, доставляемая воднымъ путемъ (сплавная), само собою разумѣется, содержать больше влаги, чѣмъ горная (доставляемая сухимъ путемъ). По отношенію къ содержанію въ деревь влаги установилась опредѣленная номенклатура:

Дерево сырое содержитъ влаги отъ 40% — 20%.

Дерево воздушной (естественной) сушки 20%.

Сухое (высушенное при +125° +140°) 0%.

При этомъ предполагается, что дерево воздушной сушки защищено отъ дождя и снѣга, дерево искусственно высушенное при высокой температурѣ (отъ +125° до +140° С) даетъ, такъ называемыя «Жаровыя» дрова.

### Техническія свойства древеснаго топлива.

Техническія свойства древеснаго топлива шѣликомъ зависятъ отъ химическаго состава его органической части, количества минеральныхъ примѣсей и содержанія влаги.

Горючими составными частями являются: углеродъ (С) и водородъ (Н); процентное содержаніе углерода въ деревѣ около 50%, меньше чѣмъ въ другихъ видахъ твердаго горючаго обуславливаетъ его малую теплопроизводительную способность: (абсолютная при полномъ охлажденіи теплопроизводительность совершенно сухого дерева равна

$$K_1 = 4730 \text{ cal.}, \text{ полезная же } K_2 = 4410 \text{ cal.}$$

Сравнительно большое (до 60%) содержаніе водорода служитъ причиною того, что при горѣніи дерева развивается длинное пламя, такъ какъ продукты горѣнія въ этомъ случаѣ богаты летучими продуктами сухой перегонки углеводородовъ и смоль. Обиліе кислорода способствуетъ полнотѣ горѣнія и отсутствію копоти въ пламени.

Словомъ, соотношеніе органогеновъ въ деревѣ таково, что обуславливаетъ легкую воспламеняемость, полноту сгорания и умеренную температуру горѣнія при длинномъ и чистомъ пламени.

Въ древесномъ топливѣ отсутствуетъ сѣра и почти отсутствуетъ фосфоръ, что дѣлаетъ его очень важнымъ топливомъ во многихъ специальныхъ случаяхъ.

Зола всѣхъ древесныхъ породъ трудно-плавка, поэтому при сгораніи дерева на топочной рѣшеткѣ не образуется шлаковъ, могущихъ затруднять доступъ воздуха подъ рѣшетку.

Очень неприятной примѣсью каждаго древеснаго топлива является вода.

Вліяніе ея на теплопроизводительность очень замѣтно.

Такъ, напримѣръ, для дерева искусственной сушки (при  $+140^\circ$ ) содержаніе влаги 0%, и его теплопроизводительность:

$$\text{абсолютная: } K_1 = 4730 \text{ cal.}$$

$$\text{полезная: } K_2 = 4410 \text{ cal.}$$

Если дерево высушено на воздухѣ и содержитъ 20% воды, то для него:

$$K_1 = 3790 \text{ cal.}$$

$$K_2 = 3400 \text{ cal.}$$

Наконецъ, для свѣже-срубленнаго сырого дерева при содержаніи влаги до 40%

$$K_1 = 2840 \text{ cal.}$$

$$K_2 = 2400 \text{ cal.}$$

Такое пониженіе теплопроизводительности объясняется, во первыхъ, тѣмъ, что присутствіе влаги уменьшаетъ въ 1 вѣсовой единицѣ

топлива содержаніе горючихъ веществъ и, кромѣ того, на испареніе влаги требуетъ затраты части теплоты горѣнія.

### Плотность древеснаго топлива.

Древесныя породы раздѣляются на твердыя, среднія и слабыя.

Къ твердымъ породамъ относятся, обыкновенно: дубъ, букъ, вязъ, грабъ, грушу, вишню.

Къ среднимъ: ясень, клень, акацію, березу, ольху, сосну, лиственницу, рябину; къ слабымъ причисляютъ: ель, пихту, липу, тополь, иву и осину.

По отношенію къ дереву надо различать удѣльный вѣсъ совершенно высушенной и освобожденной отъ воздуха древесины — онъ больше вѣса воды и колеблется въ предѣлахъ отъ 1.2 до 1.5; удѣльный вѣсъ дерева свѣже-срубленнаго или пролежавшаго уже на воздухѣ около 6 мѣсяцевъ всегда меньше вѣса воды и называется: «кажущимся удѣльнымъ вѣсомъ».

Кажущійся удѣльный вѣсъ значительно измѣняется для различныхъ древесныхъ породъ, такъ:

для дуба свѣже-срубленнаго .	1.07	воздушной сушки . . . . .	0.78
бѣлаго бука . . . . .	1.00	. . . . .	0.72
тополя . . . . .	0.86	. . . . .	0.53
липы . . . . .	0.73	. . . . .	0.46
ели . . . . .	0.74	. . . . .	0.48
сосны . . . . .	0.73	. . . . .	0.57

Плотныя древесныя породы характеризуются малымъ содержаніемъ смолистыхъ веществъ, трудно загораются, горятъ короткимъ пламенемъ быстро прекращающимся и даютъ плотный древесный уголь догорающій безъ пламени. Слабыя породы, обильныя смолами, легко загораются, даютъ длинное пламя, въ остаткѣ даютъ незначительное количество рыхлаго угля.

### Вѣсъ объемной ед-цы дровъ.

Теплопроизводительная способность различныхъ породъ дерева взятая при одинаковомъ содержаніи влаги, почти одинакова.

Слѣдовательно, при продажѣ дровъ по вѣсу всѣ породы были бы почти въ одной рыночной цѣнѣ, но такъ какъ у насъ дрова продаются по объему, то очевидно, что болѣе дорогими должны быть болѣе плотныя породы съ большимъ удѣльнымъ вѣсомъ, такъ какъ количество горючаго вещества, а слѣдовательно и теплопроизводительность 1-цы объема будетъ большая именно въ этихъ породахъ.

При хорошей укладкѣ объема промежутковъ не болѣе  $\frac{1}{3}$ , (20% всего объема, обыкновенно же около 25—30%).

Таблица № 31-я вѣса 1 куб. саж. дровъ.

Древесныя породы, дающія дрова:	Черезъ 1/2 г. послѣ рубкн.	Черезъ 1 годъ послѣ рубкн.	Черезъ 1 1/2 г. послѣ рубкн.
	Въ 1 куб. саж.		
Березовыя . . . . .	369	307	300
Сосновыя . . . . .	276	260	245
Еловыя . . . . .	245	230	215
Ольховыя . . . . .	—	280	—
Осиновыя . . . . .	307	276	210

Такъ какъ способы искусственной сушки дерева, транспорта и храненія относятся къ задачамъ технологии топлива, то мы и не останавливаемся на этихъ вопросахъ.

### Т о р ф ъ .

Благодаря широкому распространенію торфяниковъ въ сѣверной и средней Россіи, а также благодаря повышенію цѣнъ на дровяное, угольное и нефтяное топливо, русская промышленность московскаго и сѣверо-восточнаго раіона обратилась къ разработкѣ торфяныхъ болотъ и пользованію торфянымъ топливомъ. Начало разработкѣ торфяниковъ въ Россіи положилъ Петръ Великій, выдавъ иностранцу Дюнармусу привилегію на 10 лѣтъ съ 1723 года.

### Составъ торфа.

Существуетъ много классификацій торфа, основанныхъ на составѣ его органической массы, при чемъ торфъ нижнихъ болѣе древнихъ пластовъ всегда характеризуется большимъ содержаніемъ углерода, уменьшеніемъ процентнаго содержанія кислорода и гигроскопической воды. Молодой торфъ по составу очень близокъ къ древеснымъ и растительнымъ породамъ, торфъ древній приближается къ бурнымъ углямъ, само собою разумѣется, что масса промежуточныхъ формъ по составу своему представляетъ непрерывный рядъ съ тенденціей къ повышенію содержанія углерода въ зависимости отъ возраста.

Въ прилагаемой ниже таблицѣ даны приближенные среднія цифры, которыя отнюдь не должны быть разсматриваемы, какъ постоянныя величины, онѣ являются лишь общими характеристиками состава органической массы торфяниковъ различныхъ возрастовъ въ восходящемъ по древности залеганія порядкѣ.

Таблица № 32-й.  
Состава органической массы торфа \*).

Виды торфа.	Органогены.			$\frac{N+O}{H}$	Зола.
	C <sup>o</sup> /%	(N+O <sup>o</sup> )/%	H <sup>o</sup> /%		
Мохъ грюнвальдскаго болота.	50,00	43,50	6,50	6,7	3,72
Легкій торфъ изъ серагнума.	50,90	43,30	5,80	7,5	0,57
Рыхлый красно-бурый . . . . .	53,50	40,60	5,90	7,0	5,33
Тяжелый бурый . . . . .	56,40	38,30	5,30	7,2	8,13
Черный торфъ . . . . .	59,70	34,60	5,30	6,5	12,56
Тоже . . . . .	60,90	32,90	6,20	5,3	4,61
Тяжелый бурый . . . . .	62,50	30,70	6,80	4,5	1,09
Очень плотный черный . . . . .	63,90	29,60	6,50	4,6	2,70

*Примѣчаніе:* въ числа первыхъ четырехъ столбцовъ не входятъ зола и влага, а только органическое вещество торфа. Цифры таблицы подтверждаютъ высказанныя выше положенія о характерѣ измѣненій, которымъ съ теченіемъ времени подвергается органическая масса торфа, именно: наблюдается возрастаніе %-наго содержанія углерода, уменьшеніе азота и кислорода; содержаніе же водорода колеблется въ сравнительно узкихъ предѣлахъ.

Въ верхнихъ слояхъ торфянаго болота торфъ содержитъ еще много свѣжихъ мховъ въ массѣ ясно замѣтно строеніе растительныхъ породъ, послужившихъ для него исходнымъ матеріаломъ. Этотъ молодой торфъ получилъ названіе «волокнистаго»; его удѣльный вѣсъ отъ 0,113 до 0,676; слѣдующій пластъ даетъ «землистый торфъ» съ удѣльнымъ вѣсомъ отъ 0,41 до 0,90. Наконецъ, нижезалегаеетъ «смолистый торфъ», имѣющій удѣльный вѣсъ отъ 0,639 до 1,039.

Помимо органической части добываемый изъ болотъ торфъ содержитъ въ большихъ или меньшихъ количествахъ минеральныя примѣси, образующія послѣ сжиганія золу.

\*) Г. К. Дементьевъ „Теплота и заводскія печи“ стр. 150-я.

### Содержание золы в торфѣ.

Содержание золы колеблется в очень широких пределах от 1% до 50%. В хороших сортах торфа допустимо не более 5% золы; при 10% золы торф уже плох как топливо.

Торф низких болот, заливаемых водою, приносящей и остающейся в осадкѣ глину и песок, получается сь большимъ содержаниемъ минеральныхъ примѣсей; торфъ высокихъ болотъ даетъ значительно меньше золы.

Средній составъ золы:

песку и глины в видѣ механическихъ примѣсей отъ 5% до 70%		
кремнезема (отъ растений) . . . . .	» 1%	» 30%
извести ввидѣ солей $\text{Ca CO}_3$ и $\text{Ca SO}_4$ . . . . .	» 10%	» 50%
окиси желѣза . . . . .		» 50%

Само собою понятно, что теплопроизводительность сортовъ торфа возрастаетъ по мѣрѣ уменьшения количества минеральныхъ примѣсей.

### Содержание в торфѣ влаги.

Торфъ верхнихъ молодыхъ пластовъ при вынутіи содержитъ до 90% влаги; в торфѣ воздушной сушки обыкновенно влага составляетъ отъ 10% до 25% по вѣсу; искусственной сушкой можно понизить содержание влаги до 2—3%. Высушенный и пролежавшій на складѣ торфъ снова поглощаетъ и удерживать до 10% воды.

Содержание влаги вліяетъ на величину полезной теплопроизводительности, какъ показываютъ цифры таблицы, данной инженеромъ Бляхеромъ \*).

Таблица № 33-я.

Содержание влаги в % по вѣсу.	0%	10%	20%	24,3%	30%	40%	50%
Полезная теплопроизводительность $K_2$ в calor/clgr.	4604	4085	3560	3340	3040	2520	2000

Совмѣстное вліяніе влаги и неорганическихъ примѣсей на величину полезной теплопроизводительности выражается цифрами ниже слѣдующей таблицы:

\*) Бляхеръ „Теплота вь заводскомъ дѣлѣ“.

Таблица № 34 и.

Содержание влаги и золы въ торфѣ.	Теплопроизводительность $K_2$ .
Торфъ съ 30 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> воды и 10 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> золы . . . . .	2090 cal/kgtr.
„ „ 25 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> „ безъ „ . . . . .	3800 „
„ „ 0 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> „ 15 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> „ . . . . .	4440 „
„ „ 0 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> „ 0 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> „ . . . . .	5250 „
Сухой торфъ 0 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> безъ золы . . . . .	5250 „
„ „ 4 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> „ „ . . . . .	5090 „
„ „ 12 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> „ „ . . . . .	4686 „
„ „ 10 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> „ „ . . . . .	3636 „
Торфъ съ 25 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> воды . . . . .	3800 „
„ „ 30 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> „ . . . . .	3313 „
„ „ 50 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> „ . . . . .	2182 „

Сырой «рѣзанный» торфъ, содержа огромное количество влаги при полужидкой волокнистой структурѣ, мало пригоденъ для цѣлей отопления, почему издавна уже дѣлались попытки къ обработкѣ рѣзаного торфа путемъ сушки и формованія въ прессахъ.

Первая операція имѣеть цѣлью удаленіе влаги, вторая—концентрацію органическаго вещества. Высушенный прессованный торфъ называется «формованнымъ» или машиннымъ.

Торфъ какъ малоцѣнное топливо не выдерживаетъ стоимости искусственной сушки, поэтому, можно говорить только о сушкѣ воздушной.

Формованіе торфа производится въ прессахъ и специальныхъ машинахъ на мѣстахъ добычи.

По мнѣнію извѣстныхъ авторитетовъ всѣ попытки превращенія рѣзанного торфа въ топливо болѣе концентрированное путемъ формованія, коксованія и брикетированія, хотя и привились въ техникѣ, но не могутъ рассчитывать на широкое распространеніе въ силу трудности работы по удаленію влаги и размельченію торфяныхъ волоконъ, не окупающихся рыночной стоимостью фабрикаата.

Всѣ 1 mtr<sup>3</sup> волокнистаго торфа воздушной сушки отъ 260 до 280 kgtr.;

бураго или чернаго т. н. смолистаго торфа отъ 250 до 400 kgrl. По Менделѣву 100 пуд. прессованнаго торфа замѣняютъ 140 пудовъ дровъ.

Достоинствомъ торфянаго топлива является ничтожное содержаніе сѣры и фосфора въ золѣ—не свыше 0,1%, что дѣлаетъ концентрированный торфъ удобнымъ топливомъ для металлургіи чугуна.

### Каменные угли.

Подъ общимъ названіемъ «Каменные угли» въ настоящее время понимаютъ ископаемые виды топлива бурые угли, собственно каменные угли и антрациты, располагая ихъ въ восходящемъ по древности порядкѣ.

#### А) Бурые угли.

По растительной теоріи происхожденія твердыхъ ископаемыхъ видовъ горючаго, бурые угли располагаются между торфомъ и собственно каменными углями.

Средній составъ бурыхъ углей по Менделѣву данъ въ таблицѣ № 35.

Таблица № 35-я.

Влаги.	Золы + сѣры	Углерода С	Водорода Н	Азота N	Кислорода О
8°	8%	56,8%	4,2°	1,00°	22°

Среди бурыхъ углей различаютъ также нѣсколько видовъ, именно:

1) *Землистый бурый уголь*, какъ и торфъ, повидимому, происходитъ отъ разложенія низшихъ растительныхъ формъ; его земляная масса имѣетъ бурю окраску, легко растирается въ порошокъ и содержитъ много влаги, въ свѣже добытыхъ угляхъ содержаніе воды доходитъ до 50%; воздушная сушка понижаетъ его до 20%; золы также содержится очень много, иногда до 40—50%.

2) *Лигниты* имѣютъ древесинную структуру и называются еще битуминознымъ деревомъ—походя на обугленную древесину; лигниты также содержатъ много влаги и золы при малой теплопроизводительной способности.

3) *Жирные или смолистые бурые угли* содержатъ много смолистаго вещества, горятъ коптящимъ пламенемъ и приближаются по свойствамъ къ тощимъ каменнымъ углямъ.

Освобожденная отъ влаги и золы масса бураго угля содержитъ органические вещества въ слѣдующихъ, примѣрно, количествахъ въ 100 вѣсовыхъ частяхъ.

Таблица № 36-й.

Воды бурьихъ углей.	С	II	O+N
Лигниты . . . . .	отъ 57 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> до 67 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	6 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> —5 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	28 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> —37 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
Землистые бурьие угли. .	» 64 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> » 70 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	6 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> —5 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	25 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> —30 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
Смолистые бурьие угли.	» 65 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> » 75 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	6 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> —4 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>	21 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> —29 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>

Бурьие угли легко окисляются на воздухъ, что уменьшаетъ вѣсь горючихъ элементовъ, а иногда влечетъ и самовозгараніе на складахъ.

1 mtr<sup>3</sup> лигнита вѣсить отъ 550 до 650 klgr, смолистаго же бураго угля — около 700 klgr. (Вѣсь 1 куб. саж. около 400 пудовъ). Удѣльный вѣсь бурьихъ углей очень непостояненъ: для землистыхъ онъ колеблется въ предѣлахъ отъ 1,25 до 1,45; для лигнитовъ отъ 1,2 до 1,8.

### В) Собственно каменные угли.

Среди каменныхъ углей наблюдается безчисленное множество видовъ, начиная отъ близкихъ къ смолистымъ бурьимъ углямъ и кончая полуантрацитами. Существуетъ нѣсколько системъ классификаціи каменныхъ углей, напримѣръ,

а) по назначенію каменные угли дѣлятся: на газовые, паровичные, кузнечные, металлургическіе и проч.

б) По качеству получающагося кокса каменные угли дѣлятся на: спекающіеся, полуспекающіеся и неспекающіеся; с) по характеру пламени различаютъ: короткопламенные и длиннопламенные;

д) По мѣсту добычи: кардифъ, донецкій, домбровскій, силезскій и проч. угли.

е) По величинѣ и формѣ кусковъ въ продажѣ имѣются сорта: крупный, средній (куски меньше кулака и до величины орѣха) угольная мелочь—куски меньше орѣха и, наконецъ—угольная пыль.

к) Существуютъ еще классификаціи по геологическому происхожденію, по плотности и другимъ признакамъ.

Приводимъ здѣсь заимствованную изъ книги проф. Цементьева таблицу Грунера, пользующуюся успѣхомъ среди техниковъ.

Таблица № 37-й

классификація каменныхъ углей по Грунеру.

№№	Типы углей.	Элементарный составъ (безъ зола и воды).			O + N H	Выходъ кокса.	Свойства кокса.
		C	H	O + N			
1	Сухіе угли съ длиннымъ пламенемъ . . . . .	Отъ 75 до 80.	Отъ 5,5 до 4,5.	Отъ 19,5 до 15	4—3	50—60	Порошокъ или чуть спекшійся.
2	Жирные угли съ длиннымъ пламенемъ или газовые.	80—85	5,8—5	14,2—10	3—2	60—68	Сплавленный но сильно вспучень.
3	Жирные угли или куз- ничные . . . . .	84—89	5—5,5	11—,65	2—1	68—74	Сплавленъ средней плотности.
4	Коксовые угли . . . . .	84—91	5,5—4,5	6,5—5,5	1	71—82	Сплавленъ очень плот- ный.
5	Тощіе или антрацитовые угли . . . . .	90—93	4,5—4	5,5—3	1	82—90	Спекшійся или порошокъ.

При построении своей таблицы авторъ исходилъ изъ элементар-  
наго состава, отношенія содержанія кислорода и азота къ водороду,  
выхода кокса и состоянія коксовой лепешки.

Считая, что единственно устойчивымъ признакомъ для классифи-  
каціи всѣхъ углистыхъ веществъ является ихъ составъ, проф. Алексѣевъ  
предложилъ слѣдующую таблицу:

Таблица № 38-й.

Горючія вещества.	Составъ органической массы.		
	C	H	O
Клѣтчатка . . . . .	44,4%	6,2%	49,4%
Торфъ . . . . .	60	6	32
Бурые лигниты. . . . .	68,5	5,4	26,1
Богхеды или смолистые угли . . . . .	77	8	15
Каменные угли . . . . .	81,4	5	10
Лигниты или сухіе угли. . . . .	78,7	4,9	14,6
Настоящіе антрациты . . . . .	91,5	4,83	1,04
Сухіе антрациты . . . . .	94	3	3

**Особенности главнѣйшихъ видовъ собственно каменныхъ углей.**

Въ дальнѣйшемъ придержимся простой классификаціи, раздѣляя каменные угли на: *сухіе и жирные*, а послѣдніе, въ свою очередь на газовые и металлургическіе или кузнечные.

*Сухіе каменные угли* отличаются длиннымъ пламенемъ, не спекающимся коксомъ, сохраняющимъ форму взятыхъ для коксованія кусковъ угля. При горѣніи получается много паровъ воды и газообразныхъ продуктовъ; годны для пламенныхъ печей, получения генераторнаго газа и для цѣлей отопленія.

Средній составъ сухихъ углей по Менделѣеву представляется нижеслѣдующей таблицей:

**Таблица № 39-й.**

	Въ предѣлахъ: отъ и до	Въ среднемъ.
Углерода (C) . . . . .	65—81,4	73,2
Водорода (H) . . . . .	4,2—5,4	4,8
Азота (N) . . . . .	0,7—1,3	1,0
Кислорода (O) . . . . .	9—13	11,0
Влаги (H <sub>2</sub> O) . . . . .	4,5—7,5	6,0
Зола и сѣры . . . . .	3—5	4,0
Теплопроизводительность полная . . . . .	8000—6000	7000
Теплопроизводительность полезная въ Cal/kg. . . . .	— —	6700

**Жирные или спекающіеся каменные угли.**

При накаливаніи жирный уголь прежде, чѣмъ превратится въ коксъ, подвергается нѣкоторому разложенію; отдѣльные куски сплавляются и получается коксъ болѣе или менѣе пористый. Жирные угли дѣлятся на газовые и металлургическіе.

*Газовые каменные угли* горятъ длиннымъ пламенемъ и оставляютъ до 65% ноздреватаго кокса. Въ Россіи добываются въ сѣверной части донецкаго каменно-угольнаго бассейна.

По Менделѣеву средній составъ жирныхъ газовыхъ углей представленъ въ таблицѣ № 40-й.

Таблица № 40-й.

Составъ углей.	Огъ и до. Въ среднемъ.	
Углерода С . . . . .	75—84	79.5
Водорода Н . . . . .	4,7—5,3	5,0
Азота N . . . . .	0,8—1,2	1,0
Кислорода О . . . . .	6,0—8,0	7,0
Воды Н <sub>2</sub> О . . . . .	4,0—1,00	2,5
Зола и сѣры . . . . .	7,0—3,0	5,0
Теплопроизводительность полная . . . . .	7100—8400	7750
Теплопроизводительность полезная . . . . .	— —	<b>7500</b>

Газовые угли примѣнимы для отопленія паровыхъ котловъ и получения свѣтильнаго газа.

*Металлургическіе каменные угли* (или настоящіе коксовые) примѣняются всюду, гдѣ важны большіе выходы кокса, загораются труднѣе, горятъ длиннымъ пламенемъ.

Въ Россіи добываются близъ Юзовки и Богодуховки въ Юго-Западной части донецкаго бассейна.

Составъ этихъ углей данъ въ таблицѣ № 41-й.

Таблица № 41-й.

Состава настоящихъ коксовыхъ углей.

Составъ углей.	Огъ и до.	Въ среднемъ.
Углерода С . . . . .	80—87	83,5
Водорода Н . . . . .	4,4—5,2	4,8
Азота N . . . . .	0,7—1,3	1,0
Кислорода О . . . . .	4,0—8,4	6,2
Влаги Н <sub>2</sub> О . . . . .	1—2	1,5
Зола и сѣры . . . . .	1,0—5	3,0
Теплопроизводительность (полная) . . . . .	7700—8800	8040
Теплопроизводительность полезная . . . . .	— —	<b>7700</b>

**Полуантрацитовые угли и антрациты.**

На пути отъ жирныхъ коксовыхъ углей къ антрацитамъ имѣется еще группа *полуантрацитовыхъ* или полужирныхъ углей.

Эти угли мало или совсѣмъ не способны спекаться, при чемъ коксъ сохраняетъ форму кусковъ угля; даютъ кокса до 90%. Горятъ почти безъ дыма, не заплывая колосниковъ и отдавая много теплоты. Являются весьма цѣннымъ топливомъ.

Составъ полуантрацитовъ близокъ къ слѣдующему среднему.

Таблица № 42-й.

Составъ антрацитовыхъ углей.	Отъ и до.	Въ среднемъ.
Углерода (C) . . . . .	85—89	87,0
Водорода (H) . . . . .	3—5	4,0
Азота (N) . . . . .	1—1	1,0
Кислорода (O) . . . . .	1—4,5	2,75
Влаги (H <sub>2</sub> O) . . . . .	0,5—2	1,25
Золы и сѣры . . . . .	2—6	4,00
Теплопроизводительность полная .	— —	8180
Теплопроизводительность полезная.	— —	7950

**Антрацитъ.**

*Антрацитъ* представляетъ высшую степень окисленія органическаго растительнаго вещества, почти совсѣмъ не содержитъ летучихъ веществъ и потому горитъ совершенно безъ пламени, давая въ высшей степени концентрированный жаръ; въ антрацитѣ мало кислорода и водорода; плотность 1,5; на воздухѣ почти не измѣняется, трудно загорается и оставляетъ до 90%, совершенно не спекающагося кокса.

Лучшій въ Россіи антрацитъ добывается близъ Грушевки, его составъ слѣдующій:

Таблица № 43.

Составъ антрацата изъ Грушевки.	въ %
Углерода (C) . . . . .	89,91
Водорода (H) . . . . .	1,25
Азота (N) } Кислорода (O) }	1,64
Сѣры (S) . . . . .	1,00
Золы . . . . .	2,00
Влаги (H <sub>2</sub> O) . . . . .	4,2
Теплопроизводительность лежалого антрацита.	7650

**Приѣмнѣность каменныхъ углей для цѣлей отопленія.**

Выборъ того или иного сорта каменнаго угля зависитъ отъ весьма многихъ факторовъ, изъ которыхъ важнѣйшими являются:

- a) Цѣль, для которой выбирается топливо.
- b) Важность использованія остаточныхъ продуктовъ.
- c) Величина и характеръ пламени, степень концентраціи жара, количество и качество золы, содержаніе летучей сѣры, составъ и количество дымовыхъ газовъ, составъ и выходъ кокса, теплопроизводительность и жаропроизводительность; наконецъ,
- d) Экономическія соображенія.

Въ случаѣ примѣненія угля непосредственно для нагрѣванія, понятно, лучшимъ будетъ тотъ, при горѣннѣ котораго передача теплоты будетъ происходить не только лучеиспусканіемъ, но и соприкоснове-ніемъ пламени съ оболочкою нагрѣваемого предмета.

Съ этой точки зрѣнія для отопленія печей, кухонныхъ плитъ, калориферовъ и котловъ желательными надо признать сухіе длиннопламенные угли, легче сожигаемые на рѣшеткѣ, требующіе отъ кочегара меньшаго напряженія.

Въ тѣхъ случаяхъ, когда въ небольшомъ пространствѣ требуется сконцентрировать жаръ наиболѣе пригодными явятся короткопламенные жирные угли, напримѣръ, полуантрацитовый кардифскій.

Процессы металлургическіе, потребности керамической и другихъ видовъ промышленности требуютъ каждый специальныхъ свойствъ

отъ углей; въ нашу задачу не входитъ подробное ихъ разсмотрѣніе, почему въ заключеніе и переходимъ къ изложенію самыхъ краткихъ данныхъ о жидкомъ топливѣ. Подробности объ угольномъ топливѣ желающіе найдутъ въ курсѣ проф. Г. К. Дементьева. «Теплота и заводскія печи» и въ книгѣ Юннемана, «Горючіе матеріалы и брикетное производство въ русскомъ переводѣ горнаго инженера Л. Бѣлинко.

Откуда и заимствованы приведенныя выше краткія свѣдѣнія.

### Жидкое топливо.

Всѣ виды жидкаго топлива какъ метиловый и этиловый спирты, жидкіе продукты сухой перегонки каменнаго и бурога угля, древесный леготь и пр. имѣютъ въ обиходѣ весьма ограниченное примѣненіе.

Широко распространилось только использование нефти и нефтяныхъ остатковъ или мазута.

Нефтью или горнымъ масломъ называется маслянистая горючая жидкость зеленоватаго оттѣнка, вытекающая изъ земли въ различныхъ мѣстахъ земнаго шара: въ Пенсильваніи, на Кавказѣ, въ Голландіи и др.

Не останавливаясь на гипотезахъ о происхожденіи нефти, способахъ разработки и добычи укажемъ, что нефть представляетъ смѣсь жидкихъ углеводородовъ изъ рядовъ  $C_n H_{2n}$  и  $C_n H_{2n+2}$ . Легкіе сорта нефти имѣютъ удѣльный вѣсъ около 0,8, тяжелые около 0,90.

Природная сырая нефть является исходнымъ матеріаломъ для цѣлаго ряда цѣнныхъ продуктовъ послѣдовательно получаемыхъ путемъ дробной перегонки.

Первымъ продуктомъ перегонки является нефтяной эфиръ; при т-рѣ отъ  $+70$  до  $+120^{\circ}C$ . отходитъ бензинъ, затѣмъ, тѣ части перегонки, которыя кипятъ при т-рахъ не менѣе  $+130^{\circ}C$ . и содержатъ углеводороды отъ  $C_9$  до  $C_{16}$  составляютъ керосинъ. Элементы, кипящіе при болѣе высокихъ т-рахъ идутъ на смазочныя масла, очищенный же остатокъ идетъ въ продажу въ видѣ вазелина.

Неочищенные остатки послѣ отгонки керосина подъ названіемъ мазута являются самымъ распространеннымъ видомъ жидкаго топлива для фабрично-заводскихъ топковъ.

Средніе элементарные составы сырой нефти и мазута даны въ прилагаемой здѣсь таблицѣ.

Таблица № 44 и.

Родъ жидкаго топлива.	Зола, сѣра и влага.	Углеродъ С.	Водородъ Н.	Азотъ N.	Кислородъ O.
Сырая нефть . . .	—	85 <sup>0</sup> ,	13 <sup>0</sup> ,		2 <sup>0</sup> ,
Мазутъ . . . . .	0,30	86,00	0,05	12,00	1,65

Удельный вес мазута от 0,9 до 0,93.

Теплопроизводительность мазута полная 10520 cal/kg. полезная 9870 cal/kg., т.е. почти в 4 раза выше таковой же для дров и значительно превышает теплопроизводительность всех прочих видов ископаемого горючего. Достоинства и недостатки различных видов горючего подробно указываются во II-мъ отдѣлѣ при описаніи печныхъ топливниковъ, поэтому здѣсь мы на нихъ не останавливаемся.

Газообразное топливо до сихъ поръ еще не имѣетъ примѣненія при отопленіи комнатныхъ печей, равно и все остальные виды жидкаго топлива. Изслѣдованіе и описаніе ихъ техническихъ свойствъ составляетъ предметъ технологии топлива и выходитъ изъ круга нашего рассмотрѣнія.

## ГЛАВА VI.

### Теплопроизводительная способность горючихъ матеріаловъ.

#### 1) Понятіе о теплопроизводительной способности.

1) Максимальное количество теплоты, какое можетъ быть получено изъ 1-цы веса даннаго горючаго вещества при его полномъ сгораніи называется его теплопроизводительной способностью.

Иначе говоря, теплопроизводительная способность представляетъ собою всю химическую энергію даннаго вещества, переведенную въ энергію тепловую.

Зная, что представляетъ собою процессъ горѣнія, прослѣдимъ, какъ и на что затрачивается тепловая энергія вещества при его сжиганіи въ условіяхъ техническихъ и промышленныхъ.

а) Часть тепловой энергіи должна быть затрачена на нагреваніе массы вещества отъ нѣкоторой начальной температуры  $t$  до температуры горѣнія  $T$ ;

б) Вода, содержащаяся въ горючемъ и гигроскопическая, поглощенная имъ изъ окружающаго воздуха, должна быть нагрѣта до температуры кипѣнія;

в) Часть теплоты должно затратить на испареніе этой же воды при постоянной температурѣ.

г) Точно также необходимо затратить часть тепловой энергіи на нагреваніе и испареніе воды, образуемой при сгораніи водорода, содержащагося въ горючемъ.

е) Извѣстное количество тепловой энергіи надо затратить на нагреваніе воздуха, необходимаго для процесса горѣнія отъ температуры, при которой онъ приводится въ соприкосновеніе съ топливомъ до температуры горѣнія.

ф) Часть тепловой энергии безусловно затрачивается на ослабление и уничтожение связи между частицами данного горючего вещества, т.е. на изменение его молекулярного строения или на так называемую *дисгрегацию*.

к) Часть теплоты теряется в окружающее пространство и передается соседним телам в силу лучеиспускания внешними поверхностями стенок очага.

л) Значительное количество теплоты также поглощается стенками очага и дымовых ходов.

м) Часть теплоты уносится газообразными продуктами горения в атмосферу.

п) Часть теплоты отходит с парами воды туда же.

о) Часть теплоты расходуется на разложение углекислоты и воды, входящих в состав горючих газов или на так называемую *диссоциацию*.

р) Наконец, некоторое количество теплоты остается в минеральном остатке процесса горения — в золе.

Если выразить в единицах теплоты каждую из этих потерь и затрат теплоты через  $k_0, k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$  и взять их сумму.

$$K_0 = k_0 + k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + \dots + k_n = \sum k_i \dots (1)$$

то величина  $K_0$  представит нам *полную теоретическую* теплопроизводительную способность вещества.

2) Действительная теплопроизводительная способность вещества ни при каких условиях не может быть равна полной теоретической, уже потому что мы не имеем возможности *возвратить той части тепловой энергии, которая расходуется на дисгрегацию, т.е. на разложение горючего вещества*.

Поэтому *полной теплопроизводительной способностью* будем называть сумму всех потерь и затрат за вычетом потери тепловой энергии  $k_0$  на дисгрегацию, т.е. будем его представлять в виде:

$$K_1 = K_0 - k_0; \dots \dots \dots (2)$$

Очевидно, что для получения величины  $K_1$  необходимо уловить теплоту парообразных и газообразных продуктов горения, охладив их до первоначальной температуры топлива и воздуха, вводившегося в топку.

Учтем теплоту, отданную лучеиспусканием, поглощенную стенками очага и оставшуюся в золе.

Таким образом величина  $K_1$  может быть названа *теплопроизводительной способностью при полном охлаждении*.

3) Приближаясь к требованиям практики, определяют еще так называемую *полезную теплопроизводительную способность*, вычитая из теплопроизводительности  $K_1$  при полном охлаждении теплоту, уносимую парами воды, как образовавшимися от сгорания водорода топлива так и гигроскопической, содержащейся в самом горючем. Обо-

значивъ эту послѣднюю величину черезъ  $k_1$  можемъ полезную теплопроизводительность представлять въ видѣ:

$$K_2 = K_1 - k_1 \dots \dots \dots (3)$$

4) Въ условіяхъ дѣйствительнаго технического сжиганія горючихъ веществъ, однако же понятіе полезной теплопроизводительной способности въ вышеуказанномъ смыслѣ не можетъ имѣть никакого реального значенія. Для того, чтобы дать, наконецъ, величину теплопроизводительной способности горючихъ веществъ, сжигаемыхъ въ обыденныхъ условіяхъ понадобилось ввести еще одинъ терминъ:

**Практическая полезная теплопроизводительная способность  $K_2$ .**

Изъ полезной теплопроизводительности  $K_2$  эта послѣдняя величина получается за вычетомъ теплоты, унесенной дымовыми газами потерянной лучеиспусканіемъ, поглощенной стѣнками очага и потерянной въ золѣ. Обозначивъ сумму этихъ потерь черезъ  $\Sigma k_2$ ,

можемъ написать, что:

$$K_3 = K_2 - \Sigma k_2; \dots \dots \dots (4)$$

**2. Методы опредѣленія теплопроизводительной способности горючихъ веществъ.**

1) Калориметрія издавна является отдѣломъ физики, посвященнымъ изученію вопросовъ о теплопроизводительной способности горючихъ веществъ или о теплотѣ ихъ горѣнія.

Необходимо различать калориметрію строго-научную и техническую.

Научная калориметрія, не преслѣдуя непосредственно практическихъ цѣлей примѣняетъ дорого стоящіе аппараты и кропотливые методы уловленія и исправленія малѣйшихъ погрѣшностей, учитывая и вводя всякаго рода поправки въ интересахъ достиженія полной точности.

Калориметрія техническая принуждена довольствоваться сравнительно грубыми приѣмами, болѣе простыми приборами и можетъ мириться съ небольшими ошибками, такъ какъ постоянной задачей техника практика—является получение средняго результата изъ цѣлаго ряда испытаній и пробъ.

Научная калориметрія предпочитаетъ прямой путь непосредственнаго сжиганія пробъ въ специальныхъ аппаратахъ съ соблюденіемъ всѣхъ возможныхъ предосторожностей, калориметрія техническая пользуется этимъ же методомъ, но съ нѣкоторыми упрощеніями, она допускаетъ примѣненіе эмпирическихъ формулъ, основанныхъ на болѣе или менѣе достовѣрныхъ гипотезахъ о строеніи вещества, вычисляетъ теплопроизводительность на основаніи данныхъ химическаго анализа вещества и допускаетъ другіе косвенные способы.

Не имѣя возможности останавливаться на описаніи научныхъ аппаратовъ - калориметровъ, отсылаемъ интересующихся къ книгѣ проф. Дементьева «Теплота и заводскія печи», въ которой отведено много мѣста описанію приѣмовъ и теоріи калориметрическихъ бомбъ.

Здѣсь же опишемъ только техническій калориметръ Парра и приведемъ его теорію.

### Техническіе калориметры.

Техническая калориметрія, преслѣдуя задачу быстрого опредѣленія теплопроизводительной способности средних пробъ большихъ массъ горючихъ веществъ, не можетъ съ успѣхомъ для дѣла въ условіяхъ ежедневнаго обихода пользоваться чисто лабораторными приборами научной калориметрії по причинѣ сложности опытовъ, требующихъ много времени, большого навыка, необходимости примѣнять сжатый кислородъ и электрическую энергію.

Сообразно физическому состоянію подлежащихъ испытанію видовъ горючихъ веществъ, техническая калориметрія обладаетъ аппаратами, названными для испытаній твердыхъ, жидкихъ и газообразныхъ горючихъ тѣлъ.

*Техническіе калориметры назначенные для испытаній твердыхъ видовъ горючаю* дѣлятся на два типа: одни пользуются чистымъ кислородомъ при обыкновенномъ давленіи, другіе примѣняютъ кислородъ въ соединеніяхъ, т. е. связанный.

Изъ калориметровъ перваго рода извѣстенъ приборъ Фишера, втораго рода калориметръ Парра. Опишемъ здѣсь только послѣдній приборъ.

### Калориметръ Парра.

Этотъ калориметръ принадлежитъ ко второму типу техническихъ аппаратовъ (черт. № 49).

Главную часть аппарата составляетъ латунный патронъ А, снабженный внутренней рѣзью на обоихъ концахъ. Нижнее отверстіе завинчивается крышкой В, на нижней поверхности которой находится углубленіе. Этимъ углубленіемъ нижняя крышка надѣвается на опору а, имѣющую соотвѣтствующій выступъ.

Верхняя крышка с продолжена въ трубку d. Въ эту трубку вставленъ подвижной также полый стержень е, на концѣ котораго имѣется клапанъ f.

Цилиндрическая пружина к вставлена для того, чтобы клапанъ f всегда плотно закрывалъ отверстіе въ верхней крышкѣ с.

Трубка d закрывается сверху съемной пробкой l для возможности очистки всего аппарата и провѣрки пружины.

Патронъ А вставляется на подставку а въ латунный калориметрической сосудъ В и окружается еще открытымъ съ обоихъ кон-

цовъ жестянымъ цилиндромъ С немного выше середины цилиндрической части самого патрона.

Патронъ снабженъ кольцомъ съ укрѣпленными на немъ 4-мя крыльшками для перемѣшиванія воды, а трубка D несетъ на себѣ шкивъ T для приведенія во вращеніе патрона отъ маленькой водяной турбинки или электромотора (мощность этого послѣдняго соотвѣтствуетъ 10-ти свѣчной лампочкѣ накаливанія).

За часъ до опыта всѣ части аппарата вносятся въ комнату для того, чтобы онѣ приняли температуру близкую къ комнатной. Точно также заготавливаютъ въ мѣрительной колбѣ два литра воды и непосредственно передъ самымъ опытомъ понижаютъ ея температуру на  $1^{\circ}\text{Сили } 1\frac{1}{2}^{\circ}\text{С}$  противъ комнатной, исходя изъ слѣдующихъ соображеній: въ 1-й періодъ опыта, до сжиганія образца горючаго вода въ калориметрѣ, имѣя температуру низшую комнатной будетъ поглощать теплоту изъ окружающаго пространства, во 2-мъ періодѣ послѣ сжиганія, когда температура воды сбѣдается выше комнатной, она будетъ наоборотъ испускать теплоту. Замѣтивъ, что вообще температура калориметрической воды послѣ опыта повышается на  $2\text{—}3^{\circ}\text{С}$ , если имѣла первоначально комнатную температуру, пришли къ простому способу парализовать вліяніе поглощенія и излученія: дѣйствительно, комнатная температура является средней между двумя крайними температурами воды; до опыта и послѣ опыта. Поэтому количество теплоты, поглощенное водой въ первый періодъ, равно количеству отданному за 2-й періодъ, чѣмъ и достигается возможность исключать изъ разсмотрѣнія эти величины при опытѣ. Установивъ въ цилиндръ В тщательно высушенный собранный патронъ А, сосудъ В помѣщаютъ въ деревянный или картонный сосудъ D, а этотъ въ такой же внѣшній—Е. Пространство между стѣнками сосудовъ изолируется и оба сосуда послѣ вливанія воды въ калориметрѣ тщательно закрываются двойной крышкой. Наконецъ, вставляется термометръ Т.

Среднія пробы угля высушиваются до содержанія влаги въ  $2^{\circ}\text{—}3^{\circ}\text{.}$  Приготовивъ порошокъ соотвѣтствующій сити съ глазками въ 0,3 мм., взвѣшенная проба угля засыпается въ патронъ, туда же всыпаютъ и 10 граммовъ перекиси натрія  $\text{Na}_2\text{O}_2$ , слѣдя за тѣмъ, чтобы содержимое патрона осѣло на дно. Перекись натрія не должна приходить въ соприкосновеніе съ влажными тѣлами, такъ какъ способна воспламениться.

Установивъ на мѣсто патронъ, крышки и термометръ, приводятъ патронъ во вращеніе въ продолженіе часа.

Наблюдаютъ далѣе температуру калориметрической воды, пока она минуты черезъ 3—4 не сбѣдается постоянной.

Зажиганіе смѣси въ цилиндрѣ совершается или быстрымъ введеніемъ внутрь патрона раскаленнаго конца проволоки черезъ пробку I или бросаніемъ внутрь патрона взвѣшеннаго раскаленнаго цилиндрика. Пробку надо успѣть закрыть очень быстро во избѣжаніе потери газовъ.

С I всѣ воспламеняется и быстро сгораетъ. Для обезпеченія полноты

сгорания прибавляют напримѣръ винную кислоту, какъ вещество способствующее горѣнію.

Минуть черезъ 5 температура воды достигаетъ maximum'a и отмѣчается съ помощью лупы по термометру Бекмана.

Слѣдовательно, выраженіе для теплопроизводительности должно быть исправлено введеніемъ указанной выше опытной поправки:

$$K = \frac{0,73(g + u)(T - t)}{q} \text{ Cal.}$$

### Теорія Калориметра Парра.

Обозначимъ черезъ:

G — вѣсъ калориметрической воды въ гр — ммахъ.

U — водяной эквивалентъ прибора.

g — первоначальный вѣсъ раскаленного желѣзнаго цилиндрика въ гр.

g<sub>0</sub> — его окончательный вѣсъ.

a = g — g<sub>0</sub> вѣсъ сгорѣвшаго желѣза въ гр.

c = 0,12 теплоемкость желѣза.

E = 1601 Cal. теплоту реакціи горѣнія 1 грам. желѣза въ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

T<sup>0</sup> — температуру краснаго каленія желѣза.

q — вѣсъ въ гр. образца горючаго.

q<sub>1</sub> — вѣсъ въ гр. винной кислоты (обыкновенно 0,5 гр.).

Q — вѣсъ въ гр. N a<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; (обыкновенно 10 гр.).

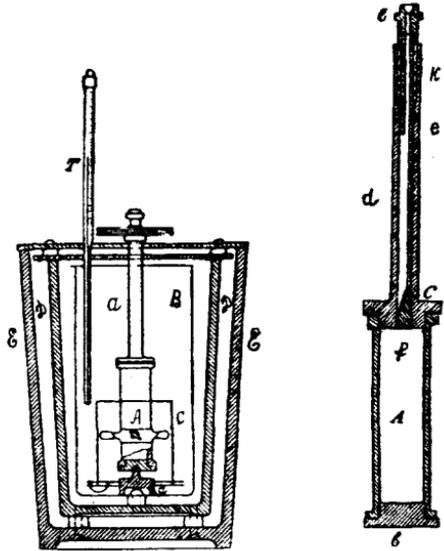
t<sup>0</sup> — начальную температуру калориметрической воды (передъ зажиганіемъ пробы).

T — наблюденную максимальную температуру воды послѣ сожженія образца.

Если бы весь наблюденный приростъ температуры можно было отнести на счетъ теплоты горѣнія взятыхъ для опыта q гр. образца горючаго, тогда бы теплопроизводительная способность выразалась очень простой формулой:

$$K = \frac{(G + U)(T - t)}{q} \dots \dots \dots (1).$$

Въ дѣйствительности необходимо въ эту формулу внести рядъ поправокъ, касающихся нахождения той части температурной разности какая явилась исключительно отъ сгорания нашего образца.



На повышение температуры от  $t^{\circ}\text{C}$  до  $T^{\circ}\text{C}$ , кроме горения угля еще влѣяетъ:

а) Теплота внесенная внутрь патрона раскаленнымъ желѣзнымъ цилиндромъ вѣса  $g$  гр. съ теплоемкостью  $c$ , и имѣющаго температуру краснаго каленія  $T_1$ . (Обыкновенно  $T_1$  близко къ  $+700^{\circ}\text{C}$ ).

Количество теплоты доставленное этимъ цилиндромъ:

$$K_1 = g \times c \times T_1 \text{ Calor.}$$

Если  $(G + U)$  гр. калориметрической воды сообщить  $(G + U)$  Cal то онѣ поднимутъ температуру воды на  $1^{\circ}\text{C}$ ., соотвѣтственно этому  $K_1$  Cal вызовутъ повышение температуры  $\Delta_1$  во столько разъ меньше  $1^{\circ}\text{C}$  во сколько  $K_1$  Cal меньше  $(G + U)$  Cal или  $\frac{(G + U)}{K_1} = = \frac{1^{\circ}}{\Delta_1}$ ; откуда искомое повышение температуры:

$$\Delta_1 = \frac{K_1}{G + U};$$

в) Часть вѣса желѣзнаго цилиндрика въ количествѣ

$$a = g - g_0 \text{ гр.}$$

сгорѣла въ патронѣ въ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; реакція горѣнія экзотермическая и сопровождается выдѣленіемъ теплоты (на 1 гр. 1601 Cal).

Количество теплоты доставляемой горѣніемъ  $a$  гр. желѣза равна:

$$K_2 = a \times 1601 \text{ Cal.};$$

разсуждая аналогично предыдущему, найдемъ повышение температуры  $\Delta_2$ , вызванное этой причиною, равнымъ:

$$\Delta_2 = \frac{K_2}{(G + U)};$$

Вычисливъ поправки  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , внесемъ ихъ въ выраженіе разности температуръ воды до и послѣ опыта: исправленная разность равна:

$$T - t - \Delta_1 - \Delta_2 = [T - (t + \Delta_1 + \Delta_2)];$$

Точными сравнительными опытами найдено, что при сжиганіи образцовъ бурыхъ углей совмѣстно съ перекисью натрія ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) 27%, повышения температуры должно быть отнесено на счетъ теплоты реакціи между продуктами горѣнія и реагентомъ ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ). Иначе говоря только 73% отъ

$$[T - (t + \Delta_1 + \Delta_2)]$$

повышенія температуры можно считать происшедшими отъ горѣнія испытуемаго образца угля т. е. считать разность температуръ равною:

$$0,73 [T - (t + \Delta_1 + \Delta_2)];$$

Количество теплоты доставленное калориметрической водѣ равно:

$$(G + U) 0,73 [T - (t + \Delta_1 + \Delta_2)],$$

относя эту величину къ 1-цѣ вѣса сожженного образца горючаго получимъ выраженіе для теплопроизводительной способности данного горючаго:

$$K = \frac{0,73 (G + U) [T - (t + \Delta_1 + \Delta_2)]}{q} \dots \dots (2).$$

Согласно предыдущаго замѣчанія, формула эта вѣрна для слабыхъ породъ углей, преимущественно для бурыхъ.

Въ томъ случаѣ, когда въ Калориметрѣ Парра опредѣляютъ теплопроизводительность каменныхъ углей, въ патронъ добавляют винной кислоты. Точными опытами выяснено, что участіе въ процессѣ горѣнія 0,5 гр. винной кислоты доставляетъ въ силу экзотермичности реакціи количество теплоты, способное повысить температуру калориметрической воды, независимо отъ всѣхъ другихъ причинъ на  $\Delta_3 = 0,70^\circ\text{C}$ .

Слѣдовательно, въ опытѣ съ образцомъ каменнаго угля въ выраженіе для температурной разности долженъ быть введенъ со знакомъ минусъ членъ  $\Delta_3 = 0,70^\circ\text{C}$ . т. е.

$$T - t - \Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3 = T - (t + \Delta_{11} + \Delta + \Delta_3);$$

Во всемъ остальномъ выраженіе для теплопроводности аналогично съ предыдущимъ, (2), именно:

$$K = \frac{0,73 (G + U) [T - (t + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3)]}{q}$$

При сжиганіи образца антрацита, кромѣ того, еще прибавляютъ въ патронъ 1 гр. надсѣрнокислаго кали. Если повышение температуры вызванное теплотою горѣнія этого реагента обозначимъ черезъ  $\Delta_4$  и соотвѣтственно измѣнить выраженіе температурной разности

$$T - (t + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4),$$

то теплопроизводительность антрацита можетъ быть найдена по формулѣ:

$$K = \frac{0,73 (G + U) [T - (t + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4)]}{q}$$

**Численный примѣръ.**

**Опредѣленія теплопроизводительной способности пробы угля калориметромъ Парра.**

Положимъ, вѣсъ воды влитой въ калориметръ до опыта  $G = 2000$  гр.  
Первоначальный вѣсъ желѣзнаго цилиндрика  $g = 0,4014$  гр.  
Окончательный вѣсъ цилиндрика  $g_0 = 0,3922$  гр.

Вѣсъ сгорѣвшей части цилиндрика

$$g - g_0 = a = 0,4014 - 0,3922 = 0,0092 \text{ гр.}$$

Температура красного каленія желѣза  $T_1 = +700^\circ\text{C}$ .

Теплоемкость желѣза  $c = 0,12$ .

Температура воды въ калориметрѣ передъ зажиганіемъ  $t = +16^\circ\text{C}$ .

Максимальная температура воды послѣ сожиганія  $T = +19,2^\circ\text{C}$ .

Полное наблюденное повышеніе температуры воды въ калориметрѣ:  $T - t = 19,2 - 16 = 3,2^\circ\text{C}$ .

Вѣсъ пробы угля 0,5 гр.; винной кислоты 0,5 гр. и  $\text{Na}_2\text{O}_2$  10 гр.

**Опредѣленіе водяного эквивалента по способу смѣшенія (Бертело).**

Положимъ первоначальная наблюденная температура воды въ калориметрѣ  $t = +22^\circ\text{C}$ .

Вѣсъ воды въ калориметрѣ  $G = 2000$  гр.

Вѣсъ вливаемой воды  $g = 82$  гр. ( $\text{cm}^3$ ).

Ея температура:  $t_1 = +80^\circ\text{C}$ .

Общая температура воды послѣ вливанія  $t_2 = +24^\circ\text{C}$ .

Общій вѣсъ воды въ калориметрѣ послѣ вливанія  $G + g = 2082$  гр.

Общее количество бывшей и вновь сообщенной калориметру теплоты.

$$Gt + gt_1 = (2000 \times 22) + (82 \times 80) = 44000 + 6560 = 50560 \text{ Cal.}$$

Запасъ теплоты, оказавшейся въ водѣ калориметра:

$$(G + g) t_2 = 2082 \times 24 = 49968 \text{ Cal.}$$

Остальная теплота, очевидно поглощена частями калориметра и равна:

$$50560 - 49968 = 592 \text{ Cal.}$$

Это теплопоглощеніе соотвѣтствуетъ повышенію температуры отъ  $t = +22^\circ\text{C}$  до  $t_2 = +24^\circ\text{C}$ , т. е. на  $2^\circ\text{C}$ . Слѣдовательно, разности температуръ въ  $1^\circ\text{C}$  соотвѣтствуетъ теплопоглощеніе частей калориметра, равное:

$$\frac{592}{2} = 296 \text{ Cal.}$$

Это количество теплоты можетъ нагрѣть на  $1^\circ\text{C}$  вѣсъ воды въ 296 гр.

Слѣдовательно, водяной эквивалентъ калориметра  $U = 296$  гр.

Количество теплоты, доставленное раскаленнымъ цилиндрикомъ:

$$K_1 = gc. T_1 = 0,4014 \times 0,12 \times 700 = 33,7176 \text{ Cal.}$$

Все количество калориметрической воды

$$(G + U) = 2000 + 296 = 2296 \text{ гр.}$$

содержа 2296 Cal. теплоты, может повысить температуру на 1°c., следовательно теплота, доставленная цилиндромъ, может повысить температуру воды на

$$\Delta_1 = \frac{K_1}{(G+U)} = \frac{33.7176}{2296} = 0,0147^\circ\text{c}$$

Теплота горѣнія желѣза въ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> равна:

$$K_2 = 0,0092 \times 1601 = 14.7292 \text{ Cal};$$

Эта теплота может повысить температуру воды на

$$\Delta_2 = \frac{K_2}{(G+U)} = \frac{14.7292}{2296} = 0,0064^\circ\text{c}.$$

Точно также, согласно опытовъ, 0,5 гр. винной кислоты поднимаютъ температуру калориметрической воды на  $\Delta_3 = 0,70^\circ\text{c}$ .

Величина полной поправки равна:

$$\Delta_0 = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 0,0147 + 0,0064 + 0,7000 = 0,7211^\circ\text{c}.$$

Дѣйствительная разность температуръ:

$$T - t - \Delta_0 = 19,2 - 16 - 0,7211 = 2,4789^\circ\text{c}.$$

Такъ какъ на счетъ теплоты горѣнія взятой пробы угля можно отнести только 73% отъ полного истиннаго повышения температуры, то, теплопроизводительность пробы выражается формулою:

$$K = \frac{0.73 (G+U) [T - t - \Delta_0]}{0,5} = \frac{0.73 \times 2296 \times 2,4789}{0,5} = 8309,67 \text{ Cal}.$$

Такъ какъ въ дѣлѣ отопленія мѣстными печами газообразное и жидкое топливо почти не примѣняется, то мы и не описываемъ здѣсь калориметровъ Junkers'a и Фишера примѣняемыхъ при изслѣдованіи горючихъ газовъ и нефтяныхъ остатковъ.

### Опредѣленіе теплопроизводительной способности горючаго по даннѣмъ химическаго анализа.

Важнѣйшими горючими элементами въ составѣ любого топлива какъ извѣстно являются: углеродъ (C) водородъ (H) и сѣра (S).

Еще при первыхъ своихъ калориметрическихъ опытахъ сначала Дюлонгъ, а послѣ: Фавръ и Зильберманъ, Бертело, Томсенъ и др. съ постоянно повышавшейся точностью опредѣляли величины теплопроизводительности углерода, водорода, сѣры и окиси углерода. Въ округленныхъ для техническихъ цѣлей цифрахъ эти величины представлены въ нижеслѣдующей таблицѣ:

Т а б л и ц а № 45-й.

Вещество.	Химич. составъ.	Продуктъ горѣнія.	Теплопроизводительность 1 klgr. въ Cal.
Углеродъ	С	Полнаго $\left\{ \begin{array}{l} \text{CO}_2 \\ \text{He полнаго} \end{array} \right.$	8140
			2440
Водородъ	H	$\left\{ \begin{array}{l} \text{H}_2\text{O (въ воду)} \\ \text{H}_2\text{O (въ пары)} \end{array} \right.$	34200
			28800
Сѣра	S	$\text{SO}_2$	2500

Начиная съ Дюлонга различные изслѣдователи неоднократно ставили себѣ задачей найти способъ вычислять величину теплопроизводительной способности горючихъ веществъ по даннымъ химическаго анализа.

Такъ какъ въ результатѣ анализа получаютъ въ %-ахъ точныя вѣсовыя количества горючихъ элементовъ С, H и S, то представлялось весьма заманчивымъ воспользоваться этими цифрами на ряду съ данными приведенной выше таблицы теплопроизводительности элементовъ, чтобы путемъ самыхъ несложныхъ арифметическихъ дѣйствій получить трудно добываемую другими способами величину теплопроизводительной способности даннаго горючаго.

Въ осуществленіи этой идеи предложено было очень много эмпирическихъ формулъ, рѣшавшихъ задачу съ большей или меньшей степенью точности. Первую формулу предложилъ Дюлонгъ.

**А) Формула Дюлонга.**

Положимъ, что въ результатѣ химическаго анализа оказалось въ 100 вѣсовыхъ частяхъ образца горючаго:

Углерода . . . . .	C <sup>o</sup> / 100
Водорода . . . . .	H <sup>o</sup> / 100
Сѣры . . . . .	S <sup>o</sup> / 100
Кислорода . . . . .	O <sup>o</sup> / 100
Азота . . . . .	N <sup>o</sup> / 100
Гигроск. (H <sub>2</sub> O) воды . . . . .	W <sup>o</sup> / 100
Зола . . . . .	M <sup>o</sup> / 100

Принимая во вниманіе только первые три активные элемента, Дюлонгъ для величины теплопроизводительной способности К далъ формулу:

$$K = \frac{8140 C + 34200 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S}{100} \dots \dots \dots (1)$$

Изъ самаго состава формулы легко видѣть, что авторъ ея предположилъ:

а) Независимое другъ отъ друга полное горѣніе углерода (С), водорода (Н) и сѣры (S).

в). Что весь кислородъ въ количествѣ 0%, связанъ съ частью водорода въ пропорціи воды и что только свободный водородъ въ количествѣ  $(H - \frac{O}{8})\%$  является горючимъ элементомъ.

Формула Дюлонга даетъ для величинъ теплопроизводительности различныхъ видовъ горючаго цифры значительно расходящіяся съ цифрами, полученными опытнымъ путемъ въ бомбахъ Бертелло и Крѣкера.

Такой результатъ не является неожиданнымъ, такъ какъ въ основу формулы положены совершенно произвольныя допущенія, ошибка которыхъ состоитъ въ слѣдующемъ:

1) Предположивъ независимое другъ отъ друга сгораніе элементовъ С, S и  $(H - \frac{O}{8})$ , Дюлонгъ въ сущности допустилъ, что горючее является *простой механической смѣсью углерода, водорода, сѣры и негорючихъ веществъ: воды, золы и азота, тогда какъ въ дѣйствительности тѣла эти связаны между собою химически и представляютъ сложное соединеніе.*

Всякое горючее, раньше чѣмъ начинаетъ горѣть, разлагается на составныя части. Процессъ разложенія или дисгрегаціи требуетъ затраты нѣкоторой части энергіи въ формѣ теплоты и состоитъ въ постепенномъ ослабленіи химической связи между молекулами элементовъ. Для того, чтобы знать и учесть величину этой затраты, надо знать точно характеръ группировки молекулъ и частичныхъ силъ сдѣянія между ними. Къ сожалѣнію, эта группировка въ большинствѣ случаевъ совершенно не извѣстна и только въ нѣкоторыхъ немногихъ, самыхъ простыхъ, наши допущенія на этотъ счетъ болѣе или менѣе вѣроятны.

Такимъ образомъ, формула Дюлонга, не учитывая расхода теплоты на дисгрегацію, т. е. на разрушеніе химической связи между молекулами элементовъ, должна давать результатъ преувеличенный.

Пояснимъ это положеніе нѣсколькими примѣрами:

Примѣръ 1-й.

Дана простая механическая смѣсь, въ 100 вѣсовыхъ частяхъ которой 75 частей составляетъ углеродъ (С) и 25 частей водородъ (Н).

По формулѣ Дюлонга:

$$K = \frac{8140(C) + 34200(H)}{100} = \frac{(8140 \times 75) + (34200 \times 25)}{100} = 14660 \text{ Calor.}$$

Съ точки зрѣнія Дюлонга составъ болотнаго газа (Метанъ)  $CH_4$  какъ разъ подходитъ къ этому случаю, такъ какъ вѣсовое соотношеніе элементовъ совершенно такое же.

При точномъ калориметрическомъ опытѣ для Метана теплота горѣнія оказалась равною:

$$K = 13300 \text{ Calor.}$$

т. е. меньше на 1360 Cal. сравнительно съ вычисленной по формулѣ Дюлонга. 1360 Cal. очевидно представляютъ мѣру энергіи израсходованной на разрушеніе химической связи молекулъ углерода и водорода въ составѣ болотнаго газа.

Примѣръ 2-й.

По даннымъ элементарнаго анализа каменнаго угля оказалось:

Углерода (C) . . . . .	80,10 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> .
Водорода (H) . . . . .	3,74 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> .
Сѣры (S) . . . . .	2,76 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> .
Кислорода (O) . . . . .	2,51 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> .
Азота (N) . . . . .	0,81 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> .
Гигр. воды (H <sub>2</sub> O) . . . . .	1,47 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> .
Зола . . . . .	8,61 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> .
Всего . . . . .	100 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> .

По формулѣ Дюлонга, по подстановленіи цифровыхъ значений, получаемъ:

$$K = \frac{(80,10 \times 8140) + 34200 \left(3,74 - \frac{2,51}{8}\right) + 2,76 \times 2500}{100} = 7762,20 \text{ Calor.}$$

Калориметрическимъ опытомъ съ бомбою Крѣкера для этого образчика угля найдена величина

$$K = 7602,30 \text{ Calor.}$$

т. е. меньше на 159,90 Calor.

Количество энергіи, потребное для разрушенія химической связи между молекулами химическихъ соединеній, возрастаетъ въ зависимости отъ усложненія химическаго состава тѣлъ. Поэтому и разница между истинной теплотой горѣнія опредѣленной калориметрически и полученной по формулѣ Дюлонга возрастаетъ въ томъ же направленіи. Профессоръ Деппъ приводитъ очень наглядную табличку въ доказательство этого положенія:

Въ таблицѣ приведены три изомѣрныхъ, т. е. одинаковаго состава вещества:

Газообразное . . . . .	Этиленъ (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> );
Жидкое . . . . .	Амиленъ (C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> );
Твердое . . . . .	Цетенъ (C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> );

Если вычислить теплоту горѣнія по формулѣ Дюлонга, то для всѣхъ трехъ веществъ она будетъ одинакова и равна K = 11917 Cal. такъ какъ пропорція составныхъ частей во всѣхъ трехъ случаяхъ одинакова.

Калориметрическимъ путемъ однакоже найдены совершенно различныя величины, именно

для Этилена ( $C_2H_4$ ) . . . . .	$K_1 = 11857$ Calor.
„ Амилена ( $C_5H_{10}$ ) . . . . .	$K_2 = 11491$ —
„ Цетена ( $C_{16}H_{32}$ ) . . . . .	$K_3 = 11055$ —

Какъ видимъ, разница съ вычисленнымъ значеніемъ, составляя для газообразнаго Этилена всего 60 Cal. для жидкаго Амилена уже равна 426 Cal., а для твердаго Цетена доходить до 862 Cal. Само собою понятно, что на дисгрегацию частицъ газа требуется меньшая затрата энергіи, чѣмъ на дисгрегацию молекулъ жидкости, и тѣмъ болѣе, твердаго тѣла.

2) Вторымъ произвольнымъ допущеніемъ въ формулѣ Дюлонга является положеніе, что весь кислородъ (O) въ количествѣ, опредѣляемомъ элементарнымъ анализомъ, связанъ съ частью водорода H въ пропорціи воды  $H_2O$  и что въ горѣніи участвуетъ только свободный избытокъ водорода  $(H - \frac{O}{8})$ .

Само собою понятно, что для горючихъ веществъ, бѣдныхъ кислородомъ и водородомъ, это произвольное допущеніе Дюлонга не влечетъ большой ошибки.

Такъ, по даннымъ Бунте формула Дюлонга въ примѣненіи къ каменнымъ углямъ и антрацитамъ даетъ иногда ошибку не болѣе какъ на 20—30 Calor.

Совершенно иной результатъ получается для тѣхъ видовъ горючаго, въ составѣ которыхъ кислородъ занимаетъ преобладающее значеніе. Въ этомъ случаѣ, въ формулу Дюлонга совершенно не войдетъ теплота горѣнія водорода, такъ какъ весь онъ будетъ считаться связаннымъ съ кислородомъ въ формѣ воды и результатъ вычисленія долженъ быть ниже дѣйствительнаго.

Опытъ дѣйствительно доказываетъ произвольность сдѣланнаго Дюлонгомъ допущенія.

Основаніемъ всякаго растительнаго горючаго является клѣтчатка (целлюлоза)  $C_6H_{10}O_5$ ; элементарный ея составъ:

$$\begin{aligned} C &= 44,44\% ; \\ H &= 6,17\% ; \\ O &= 49,39\% ; \end{aligned}$$

количество свободного водорода, по предположенію Дюлонга равно:

$$\left( 6,17 - \frac{49,39}{8} \right) = 6,17 - 6,17 = 0,$$

т-е., при сжиганіи клѣтчатки въ горѣніи участвуетъ только ея углеродъ.

Теплопроизводительная способность чистой клѣтчатки по Дюлонгу должна быть равна:

$$K = \frac{8140 \times 44,44}{100} = 3617,42 \text{ Cal.}$$

На основаніи точныхъ калориметрическихъ изслѣдованій найдено для клѣтчатки

$$K = 4200 \text{ Cal. и } K = 4190 \text{ Cal.}$$

Или въ среднемъ

$$K = 4195 \text{ Cal.};$$

такъ какъ на дисгрегацію слабосвязанныхъ элементовъ клѣтчатки не могло израсходоваться 577.58 Cal., то остается допустить, что въ горѣнія клѣтчатки принимаетъ участіе и нѣкоторая доля свободнаго водорода, т.-е., что *не весь онъ связанъ съ кислородомъ въ формѣ воды.*

Химическій анализъ различныхъ видовъ естественнаго горючаго показываетъ, что процентное содержаніе кислорода и водорода въ нихъ убываетъ при возрастаніи содержанія углерода въ слѣдующемъ порядкѣ, указанномъ таблицею проф. Менделѣева, представляющей средніе приближенные результаты на 1 klgr. горючаго:

Т а б л и ц а № 46-й.

Родъ горючаго вещества (на 1 klgr.).	Въ 1 klgr. горючаго.		
	С	Н	О
	Въ килограммахъ.		
Дрова (20% влаги) . . . . .	0,400	0,048	0,345
Торфъ (брикеты) (10% влаги) . . . . .	0,488	0,051	0,284
Бурый уголь 8% влаги) . . . . .	0,568	0,042	0,220
Сухой каменный уголь . . . . .	0,732	0,048	0,110
Газовый уголь . . . . .	0,795	0,050	0,070
Коксовый уголь . . . . .	0,835	0,048	0,092
Антрацитъ . . . . .	0,880	0,018	0,014

Таблица эта подтверждаетъ, что горючее вещество тѣмъ болѣе содержитъ углерода, чѣмъ менѣе замѣтно въ немъ первоначальное органическое строеніе, т.-е., чѣмъ болѣе оно минерализовалось.

Отсюда понятно, что точность результатов вычислений теплопроизводительной способности по формулѣ Дюлонга возрастаетъ сообразно возрасту горючаго, т.-е., пропорціонально уменьшенію процентнаго содержанія въ немъ кислорода.

Для древесныхъ видовъ горючаго (кѣлтчатки) формула Дюлонга признается совершенно непригодной.

3) Итакъ предположеніе Дюлонга о связи всего кислорода топлива съ соответствующей образованію воды частью водорода не оправдывается фактами.

Кромѣ того, Дюлонгъ не принялъ во вниманіе еще и возможность другой группировки молекулъ элементовъ горючаго, именно: кислородъ можетъ быть въ составѣ топлива связанъ не съ водородомъ, а съ углеродомъ въ пропорціи углекислоты ( $\text{CO}_2$ ), слѣдовательно соответствующая часть связаннаго углерода не приметъ участія въ процессѣ горѣнія.

Разница, получающаяся отъ выбора того или другого допущенія выражается въ слѣдующихъ цифрахъ:

Такъ какъ 8 частей кислорода связываютъ 1 часть водорода, то потеря теплоты горѣнія будетъ соответствовать  $\frac{1}{8}$  полной теплопроизводительности водорода, т.-е. равна:

$$\frac{1}{8} \times 34200 = 4275 \text{ cal.}$$

Во второмъ случаѣ, когда часть углерода связана съ кислородомъ въ пропорціи углекислоты ( $\text{CO}_2$ ), 8 частей кислорода связываютъ 3 части углерода, а одна часть (O) связываетъ  $\frac{2}{3}$  (C) потеря теплоты горѣнія, очевидно, равна:

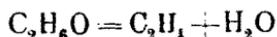
$$\frac{2}{3} \times 8140 = 3052,5 \text{ cal.}$$

Предположивъ связь кислорода только съ водородомъ, получаемъ потерю большую на 1222,5 cal. Этотъ подсчетъ оправдываетъ формулу Дюлонга только въ томъ отношеніи, что даваемая ею цифра теплопроизводительности не преувеличена.

Для иллюстраціи сказаннаго приведемъ здѣсь два примѣра, взятые изъ курса паровыхъ котловъ проф. Деспъ:

Примѣръ 1-й.

Алкоголь ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) можно разсматривать состоящимъ согласно ур-нію:



изъ маслороднаго газа ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) и воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Слѣдовательно, допускать согласно Дюлонгу, что весь кислородъ связанъ исключительно съ частью водорода въ пропорціи воды.

Горючимъ элементомъ въ составѣ алкоголя при этомъ условіи надо считать только маслородный газъ ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ). Исходя изъ атомныхъ вѣсовъ (C = 12,00; H = 1,00; O = 16,00) находимъ, что алкоголь состоитъ изъ  $\frac{14}{23}$  вѣсовыхъ частей ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) и  $\frac{9}{23}$  частей ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Теплота горѣнія маслороднаго газа извѣстна изъ калориметрическихъ опытовъ Фавра и Зильбермана ( $K = 11857$ ) и болѣ новыхъ и точныхъ Бертело ( $K = 11946,4$ ) и Томсена ( $K = 11884$ ).

Принявъ среднюю изъ двухъ послѣднихъ, т. е. положивъ для маслороднаго газа  $K = 11915,2$  cal. найдемъ для алкоголя:

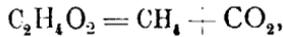
$$K = \frac{14}{23} 11915,2 = 7252,7 \text{ cal.}$$

Калориметрически опредѣленная теплопроизводительность алкоголя по Фавру и Зильберману равна:

$$K = 7183,6 \text{ cal.}$$

2-й примѣръ.

Уксусную кислоту ( $C_2H_4O_2$ ) можемъ представить согласно химическаго равенства:



гдѣ весь кислородъ будетъ связанъ съ частью углерода въ пропорціи углекислоты ( $CO_2$ ).

Болотный газъ (метанъ)  $CH_4$  составляетъ по вѣсу  $\frac{1}{15}$  общаго вѣса.

Калориметрически найденная теплопроизводительность метана по Бертело 13275 cal; по Томсену—13244 cal. въ среднемъ же она равна 13259, 5 cal.

Такъ какъ  $CO_2$  въ горѣнии не участвуетъ то, теплопроизводительность паровъ уксусной кислоты равна:

$$K = \frac{1}{15} \times 13259,5 = 3535,8 \text{ cal.}$$

Что довольно близко къ найденному Фавромъ числу  $K = 3505$  cal.

Второй примѣръ показываетъ, что и предположеніе связи кислорода съ углеродомъ (а не водородомъ) можетъ привести къ результату не менѣе точному, чѣмъ и предположеніе Дюлонга.

4) Въ своей формулѣ Дюлонгъ допустилъ еще одну неправильность, принявъ теплоту горѣнія водорода равною 34200 cal. Эта цифра относится къ газообразному состоянію водорода, между тѣмъ въ составѣ твердаго топлива (угля) водородъ не газообразенъ и его теплопроизводительность не выше 30000 cal.

Несостоятельность формулы Дюлонга заставила другихъ изслѣдователей ввести въ нее нѣкоторыя поправки; въ результатѣ появилось еще нѣсколько формулъ, претендующихъ на большую степень точности. Изъ нихъ интересна формула, данная пр. Менделѣевымъ.

### В) Формула Менделѣева.

Пр. Менделѣевъ, изучивъ обширный матеріалъ, представляемый многочисленными калориметрическими изслѣдованіями, считалъ, что ошибки опредѣленій въ работахъ Фавра и Зильбермана могутъ достигать 5%, а въ новѣйшихъ изслѣдованіяхъ съ бомбами до 2%.

Опираясь на наиболее точные, по его мнению, величины теплоты горения углерода  $C = 8100 \text{ cal.}$  Клетчатки  $C_6H_{10}O_5$  (по Штоману)  $4190 \text{ cal.}$ , твердого водорода  $H = 30000 \text{ cal.}$  и серы  $S = 2600 \text{ cal.}$  и на основании средних результатов калориметрических исследований Менделеев предложил универсальную формулу:

$$K = \frac{8100(C) + 30000(H) - 2600(O - S)}{100}$$

пригодную по его мнению для всяких видов твердого и жидкого топлива.

При чем теплота горения водорода уменьшена на  $4200 \text{ cal.}$ , т. е. на величину, соответствующую затрате теплоты на превращение твердого углерода в газообразное состояние, или на его дисгрегацию.

### Определение теплопроизводительной способности горючих по способу Бертье.

В 1822 году Вельтер обнаружил свое приближенное эмпирическое правило, по которому количество теплоты, выделяющееся при горении вещества, пропорционально количеству поглощенного кислорода.

В доказательство этого правила приведем следующий пример:

Полную теоретическую теплоту горения (полный запас тепловой энергии) углерода  $C$  обозначим через  $K_0$ .

Полную калориметрическую (явную) теплопроизводительность этого же элемента при полном сгорании в углекислоту  $CO_2$ , определенную в аппаратах через  $K_1 = 8140 \text{ cal.}$  известно, что:

$$K_1 = K_0 - k_0; \dots \dots \dots (a)$$

где  $k_0$  есть затрата тепловой энергии на превращение твердого углерода  $C$  в газообразную углекислоту  $CO_2$ .

Иначе говоря

$$K_0 - k_0 = 8140 \text{ Calor.} \dots \dots \dots (a')$$

При неполном сжигании углерода  $C$  в окись углерода  $CO$  явная его теплопроизводительность

$$K'_1 = 2429 \text{ cal.}$$

обозначив через  $K'_0$  полную теоретическую теплоту горения окиси углерода— $CO$  и имея в виду, что на дисгрегацию твердого углерода до состояния газообразного  $CO$  затрачено по прежнему  $k_0 \text{ cal.}$ , можем написать:

$$K'_1 = K'_0 - k_0; \dots \dots \dots (b)$$

или

$$K'_0 - k_0 = 2429 \text{ cal.} \dots \dots \dots (b')$$

для решения уравнений (a) и (b') с тремя неизвестными  $K_0$ ,  $K'_0$  и  $k_0$ . составим третье уравнение на основании следующих рассуждений:

Положим, что 1 klg. углерода (C) соединился с кислородом

въ пропорціи углекислоты  $\text{CO}_2$ , т. е. въ отношеніи  $12 : 16 \times 2 = 12 : 32 = 3 : 8$ ; количество выдѣлившейся при этомъ теплоты равно

$$K_1 = 8140 \text{ cal.}$$

добавимъ къ полученной углекислотѣ ( $\text{CO}_2$ ) еще 1 klg. углерода по формулѣ



получимъ  $4\frac{2}{3}$  klg. окиси углерода, при чемъ въ этомъ случаѣ выдѣлилось  $x$  cal.; слѣдовательно, всего нами получено  $(8140 + x)$  cal.

Эта сумма должна быть равна тому количеству теплоты, какое выдѣлилось бы при превращеніи 2-хъ klg. углерода  $\text{C}$  въ окись углерода ( $\text{CO}$ ) при соединеніи съ  $\frac{8}{3}$  klg. кислорода, т. е.:

$$(8140 + x) = 2 \times K'_1 = 2 \times 2429 = 4858 \text{ cal.} \dots \dots \dots (c)$$

отсюда  $x = -3282$  cal.

Отрицательный знакъ указываетъ на эндотермичность реакціи раскисленія  $\text{CO}_2$  въ  $\text{CO}$ , что подтверждается опытомъ: раскисленіе имѣетъ мѣсто только при высокой температурѣ, т. е. требуетъ затраты теплоты, которая идетъ на превращеніе твердаго углерода въ газъ, а тогда величина  $x = k_0 =$ .

По подстановленіи значенія  $K_0$  въ ур-нія (a') и (b') получаемъ;

$$K_0 - k_0 = 8140 \text{ cal.}$$

или

$$K_0 = 8140 + 3282 = 11422 \text{ cal.}$$

точно также

$$K'_0 - k_0 = 2429 \text{ cal.}$$

$$K'_0 = 2429 + 3282 = 5711 \text{ cal.}$$

Сравнивая цифры для  $K^0 = 11422$  cal. и  $K'_0 = 5711$  cal., видимъ, что совершенно точно

$$K_0 = 2K'_0$$

Но  $K_0$  есть результатъ соединенія углерода съ 2-мя паями кислорода, а  $K'_0$  — только съ 1-мъ паямъ его, слѣдовательно, въ данномъ случаѣ количества выдѣлившейся теплоты относятся какъ количества поглощеннаго кислорода; т. е.

$$\frac{K'_0}{K_0} = \frac{5711}{11422} = \frac{1}{2}; \dots \dots \dots (d)$$

Этимъ соотношеніемъ и подтверждается правило Вельтера, на которомъ основанъ способъ Бертье, состоящій въ слѣдующемъ:

Измельченный въ порошокъ образецъ испытуемаго горючаго смѣшивается съ окисью свинца ( $\text{PbO}$ ). Смѣсь прокаливается въ закрытомъ тиглѣ до прекращенія выдѣленія газовъ. Въ результатѣ процесса получается слитокъ металлическаго свинца ( $\text{Pb}$ ); реакція идетъ по ур-нію  $2\text{PbO} + \text{C} = \text{CO}_2 + 2\text{Pb}$ . Если извѣстенъ вѣсъ окиси свинца до прокаливанія и вѣсъ чистаго свинца послѣ этого, то извѣстенъ и

вѣсь вступившаго въ соединеніе кислорода. По этому послѣднему согласно правила Вельтера опредѣляется и количество освобожденной теплоты.

Пусть вѣсь испытуемаго горючаго до опыта равенъ  $p$  klgr. Вѣсь возстановленнаго изъ окиси свинца  $q$  klgr. Количество углерода, вступившаго въ соединеніе изъ горючаго, общій вѣсь котораго равенъ  $p$  klgr. изъ соотношенія остальныхъ вѣсовъ равенъ:

$$2 \times \frac{q \cdot 12}{206,4} = \frac{q}{34,4} \text{ klgr.}$$

а на 1 klgr. горючаго:

$$C = \frac{q}{34,4 \cdot p};$$

зная теплопроизводительную способность углерода 8100 Cal., имѣемъ теплопроизводительную способность образчика горючаго

$$K = \frac{q}{34,4 \cdot p} \cdot 8100 = 232,5 \frac{q}{p} \text{ Calor.}$$

Способъ Бертье, не будучи точнымъ, настолько простъ, что имъ охотно пользуются въ цѣляхъ быстроты полученія результатовъ опыта.

### Вычисленіе полезной теплопроизводительной способности.

Непосредственнымъ калориметрическимъ опытомъ, опытомъ съ бомбою, способомъ Бертье или вычисленіями по формуламъ Дюлонга и Менделѣева мы можемъ опредѣлить для любого горючаго вещества величину  $K_1$  его теплопроизводительной способности при полномъ охлажденіи.

Если изъ величины  $K_1$  вычесть теплоту  $k_1$ , уносимую парами воды какъ гигроскопической, такъ и образовавшейся отъ сгоранія свободнаго водорода топлива, то разность

$$K_2 = K_1 - k_1$$

называется *полезной теплопроизводительной способностью даннаго горючаго* потому, что въ условіяхъ практическаго сжиганія теплота паровъ воды  $k_1$ , удаляющихся съ продуктами горѣнія, пропадаетъ бесполезно, полезной же частью теплоты горѣнія будетъ только величина  $K_2$ .

Допустивъ, что температура паровъ удаляющихся въ атмосферу равна  $t^{\circ}c$ , а первоначальная температура воды до горѣнія  $t_0^{\circ}$ , найдемъ скрытую теплоту парообразования по формулѣ Ренью равною:

$$\lambda = 606,5 + 0,305(t - t_0).$$

Если полный вѣсь воды обозначимъ черезъ  $\Sigma W$ , то полная скрытая теплота парообразования равна  $\lambda \Sigma W = k_1$ .

Положивъ, какъ обыкновенно полагаютъ  $t = +100^{\circ}c$ ,  $t_0 = 0^{\circ}$ , найдемъ для  $\lambda$  значеніе:

$$\lambda = 606,5 + 0,305 \times 100 = 637 \text{ Cal. на 1 klgr. паровъ,}$$

а для всего количества воды превратившейся въ парь:

$$637 \Sigma W = k_1.$$

Далѣ, обозначимъ черезъ  $W$  вѣсовое количество гигроскопической воды въ составѣ топлива, зная, что изъ 8 частей кислорода и 1 части водорода образуются 9 частей воды, количество воды отъ сгорания водорода можемъ представить въ видѣ  $9H$ . Такъ что  $\Sigma W = (9H + W)$  и величина потери теплоты, уносимой парами воды:

$$k_1 = 637(9H + W) \dots \dots \dots (1)$$

Слѣдовательно, полезная теплопроизводительность можетъ быть представлена выраженіемъ:

$$K_2 = K_1 - 637(9H + W) \text{ cal.} \dots \dots \dots (2)$$

гдѣ:  $K_2$ , искомая полезная теплопроизводительность  $K_1$ , найденная опытомъ или вычисленная теплопроизводительность при полномъ охлажденіи (калориметрическая);  $637(9H + W)$  теплота, уносимая парами воды.

Формулой (2) можно пользоваться тогда, когда извѣстны:  $K_1$  и элементарный составъ горючаго, т.-е. когда даны вѣсовыя количества водорода ( $H$ ) и гигроскопической воды  $W$ .

Примѣръ:

Донецкій полуантрацитовый уголь:

Элементарный составъ:

Углерода (C) . . . . .	80,10%
Водорода (H) . . . . .	3,74%
Сѣры (S) . . . . .	2,76%
Кислорода . . . . .	2,51%
Азота (N) . . . . .	0,81%
Золы . . . . .	8,61%
Гигр. воды (W) . . . . .	1,47%

Опытнымъ путемъ найдено:

$$K_1 = 7602,30 \text{ cal.}$$

Согласно формулы (2) скрытая теплота паровъ, уносимая въ атмосферу:

$$k_1 = \frac{637(9H + W)}{100} = \frac{637(9 \times 3,74 + 1,47)}{100} = 222,95 \text{ cal.}$$

Поэтому полезная теплопроизводительность:

$$K_2 = K_1 - k_1 = 7602,30 - 222,95 = 7379,35 \text{ cal.}$$

2) Полезная теплопроизводительность  $K_2$  можетъ быть получена и вычисленіемъ съ помощью формулы Дюлонга, если ее дополнить членомъ  $637(9H + W)$ , взятымъ со знакомъ (—).

Въ этомъ случаѣ формула Дюлонга принимаетъ видъ:

$$K_2 = \frac{8140(C) + 34200 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2500(S) - 637(9H + W)}{100} \dots (3)$$

Пользуясь цифрами предыдущаго примѣра, легко находимъ, что:

$$K_2 = \frac{(80,10 \times 8140) + 34200 \left( 3,74 - \frac{2,51}{8} \right) + (2500 \times 2,76) - 222,95}{100} = 7762,20 - 222,95 = 7539,25 \text{ cal.}$$

3) Можно этому же выраженію придать другую форму, именно: такъ какъ изъ 1 klgr. водорода образуется 9 klgr. водяныхъ паровъ, уносящихъ  $9 \times 637 = 5733 \text{ cal.}$ , то каждый klgr. сгорѣвшаго водорода выдѣлитъ только  $34200 - 5733 = 28467 \text{ cal.}$  эту послѣднюю уменьшенную величину и вводимъ въ формулу Дюлонга въ качествѣ теплоты горѣнія водорода\*); потеря же отъ паровъ гигроскопической воды  $637 \text{ W cal.}$  вводится въ формулу непосредственно, при этихъ условіяхъ формула принимаетъ видъ:

$$K_2 = \frac{8140(C) + 28467 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2500S - 637W}{100} \dots (4)$$

4) Въ формулу (4) различными учеными подставляются различные коэффициенты (теплоты горѣнія элементовъ) смотря по тому, берутся ли цифры Фавра и Зильбермана, Бертелло, Томсена, Бунте и проч.

Общество германскихъ инженеровъ предложило формулу съ округленными техническими коэффициентами: она имѣетъ видъ:

$$K_2 = \frac{8100C + 29000 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2500S - 600W}{100} \dots (5)$$

5) Формула проф. Менделѣева, точно также, будучи дополнена членомъ  $637W$ , взятымъ со знакомъ (-), можетъ служить для вычисления полезной теплопроизводительности  $K_2$ , именно:

$$K_2 = \frac{8100C + 30000H - 2600(O - S)637W}{100} \dots (6)$$

Въ заключеніе считаемъ еще разъ необходимымъ указать, что терминъ „полезная теплопроизводительность“ крайне неудаченъ и даетъ неправильное понятіе величины имъ представляемой.

„Полезная теплопроизводительность“ далеко не выражаетъ величины того количества теплоты, какимъ можно воспользоваться въ практикѣ сжиганія.

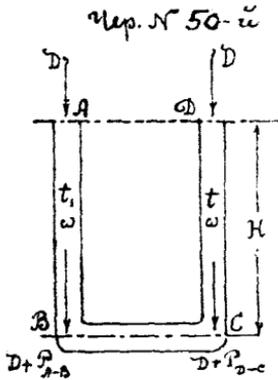
\*) Этой величиной и одѣлывается потеря теплоты отъ паровъ, образовавшихся при горѣніи водорода.

## ГЛАВА VIII.

### Основанія элементарной теории движения воздуха и газовъ въ трубахъ и каналахъ.

#### 1. Выраженіе теоретическаго напора.

Представимъ себѣ опрокинутую сифонную трубу ABCD (см. черт. № 50) постоянного поперечнаго сѣченія  $\omega$  mtr.<sup>2</sup>, оба колѣна которой имѣютъ одинаковую высоту  $H$  mtr. и открыты въ верхнихъ сѣченіяхъ A и D.



Положимъ, что вся труба ABCD заполнена атмосфернымъ воздухомъ, имѣющимъ температуру  $t^{\circ}$  с. и что стѣнки трубы абсолютно не теплопроводны, т.-е. что воздухъ заполняющій трубу не способенъ ни воспринимать тепло изъ окружающей среды, ни отдавать ее внаружу, если температура этой среды не равна температурѣ  $t$  воздуха въ трубѣ.

Въ силу того, что оба колѣна сифонной трубы AB и CD подвергаются въ сѣченіяхъ A и D совершенно одинаковому атмосферному давленію и такъ какъ физическое состояніе воздуха и количество его по объему и по вѣсу въ обоихъ колѣнахъ сифона также совершенно одинаково, то массы воздуха обоихъ столбовъ AB и CD должны находиться въ равновѣсіи.

Положимъ, далѣе, что подѣ влияніемъ какой-либо причины температура воздуха въ одномъ изъ колѣнъ сифона, на примѣръ, въ колѣнѣ AB повысилась до  $t_1^{\circ}$  с.

Одной этой причины, при сохраненіи всѣхъ остальныхъ условий, достаточно для того, чтобы равновѣсіе нарушилось и чтобы въ обоихъ колѣнахъ сифонной трубы возбудилось движеніе.

Обозначимъ: черезъ  $\delta$  плотность, т.-е. вѣсъ 1 mtr.<sup>3</sup> воздуха въ klg. при  $0^{\circ}$  С., черезъ  $\alpha$  коэффициентъ кубическаго расширенія воздуха и черезъ  $D$  въ klg. атмосферное давленіе на уровнѣ A—D открытыхъ концовъ сифонной трубы.

Состояніе равновѣсія воздуха въ колѣнахъ сифонной трубы при одинаковой въ нихъ температурѣ  $t$  объясняется равенствомъ давленій въ сѣченіяхъ B и C; дѣйствительно:

Давленіе въ сѣченіи A колѣна AB равно давленію атмосферы, т.-е.  $D$  klg., въ сѣченіи же B оно увеличивается вѣсомъ столба воздуха высоты  $H$  mtr.

Вѣсъ этого столба при температурѣ  $t$ , очевидно, равенъ:

$$P_{A-B} = H \cdot \omega \cdot \delta_t = H\omega \frac{\delta}{1 + \alpha t} \text{ klg.} \dots \dots (a)$$

Въ этомъ выраженіи  $\delta_t = \frac{\delta}{1 + \alpha t}$  представляетъ плотность воздуха при температурѣ  $t^\circ$  с.

Полное давленіе въ сѣченіи В, поэтому, равно:

$$P_B = D + H\omega \frac{\delta}{1 + \alpha t} \text{ klgr.} \dots \dots \dots (b)$$

Точно такимъ же путемъ найдемъ, что полное давленіе въ сѣченіи С колѣна DC равно:

$$P_C = D + H\omega \frac{\delta}{1 + \alpha t} \text{ klgr.} \dots \dots \dots (c)$$

откуда:

$$P_B = P_C \dots \dots \dots (d)$$

Такъ какъ давленіе атмосферы D совершенно одинаково, то можно разсматривать только давленія столбовъ воздуха въ предѣлахъ высоты H колѣнъ сифонной трубы, что приводитъ къ равенству:

$$P_{A-B} = P_{D-C} \dots \dots \dots (e)$$

Измѣнивъ температуру воздуха въ колѣнѣ АВ, именно: повысивъ ее отъ  $t^0$  с. до  $t_1^0$  с. мы получимъ въ этомъ колѣнѣ въ сѣченіи В другое, уже меньшее давленіе, именно:

$$P_{A-B} = H\omega \delta_{t_1} = H\omega \frac{\delta}{1 + \alpha t_1} \dots \dots \dots (f)$$

Тогда какъ давленіе въ сѣченіи С колѣна DC осталось по-прежнему равнымъ:

$$P_{D-C} = H\omega \delta_t = H\omega \frac{\delta}{1 + \alpha t}.$$

Перевѣсъ давленія или избыточное давленіе въ сѣченіи С надъ давленіемъ въ сѣченіи В выразится при нашихъ обозначеніяхъ уравненіемъ:

$$P_{D-C} - P_{A-B} = H\omega \delta_t - H\omega \delta_{t_1} = H\omega \delta \left( \frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right) \text{ klgr.} \dots (1)$$

Избытокъ давленія ( $P_{D-C} - P_{A-B}$ ) въ сѣченіи С влечетъ за

собою нарушеніе равновѣсія и обуславливаетъ теченіе воздуха низшей т-ры  $t$  въ колѣнѣ DC въ сторону колѣна ВА съ меньшимъ давленіемъ воздуха, имѣющаго т-ру  $t_1$ . Подъ вліяніемъ этого избыточнаго давленія болѣе теплый воздухъ долженъ вытекать черезъ сѣченіе А вверхъ съ опредѣленной скоростью  $v_{t_1}$  мтр./сек., зависящей отъ величины избыточнаго давленія ( $P_{D-C} - P_{A-B}$ ).

Преобразовавъ ур-ніе (1), можемъ представить его въ формѣ:

$$P_{D-C} - P_{A-B} = H\omega \zeta \frac{z(t_1 - t)}{(1 + \alpha t_1)(1 + \alpha t)} \text{ klgr.} \dots \dots \dots (2)$$

Ур-ніе (2) показываетъ, что величина избыточнаго давления при прочих равныхъ условіяхъ зависитъ отъ разности т-ръ ( $t_1 - t$ ) нагрѣтаго и холоднаго столбовъ воздуха, слѣдовательно и скорость вытекания воздуха  $v_{t_1}$  является функцией т-ры.

Избыточное давленіе, обусловливающее движеніе воздуха и скорость этого движенія въ трубѣ DCBA называется *теоретическимъ напоромъ* и выражается давленіемъ въ klgr. на 1 mtr.<sup>2</sup> площади поперечнаго сѣченія трубы или канала нормальной къ направленію воздушнаго потока.

Принявъ, поэтому  $\omega = 1 \text{ mtr.}^2$ , найдемъ изъ ур-нія (1) выраженіе:

$$\frac{P_{D-C}}{\omega} - \frac{P_{A-B}}{\omega} = H\zeta \left( \frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right);$$

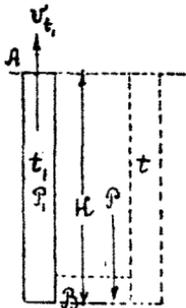
положивъ, далѣе,  $\frac{P_{D-C}}{\omega} = p$  и  $\frac{P_{A-B}}{\omega} = p_1$ , можемъ написать болѣе

простое выраженіе для величины теоретическаго напора:

$$p - p_1 = H\zeta \left( \frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right) \frac{\text{klgr.}}{\text{на } 1 \text{ mtr.}^2} \dots \dots \dots (3)$$

Въ этомъ послѣднемъ выраженіи  $p$  и  $p_1$  представляютъ давленія столбовъ воздуха высотой  $H$  mtr. при температурахъ  $t$  и  $t_1$  и съ площадью основанія въ 1 mtr.<sup>2</sup>.

Черт. № 51-а



Въ физическихъ условіяхъ разсмотрѣннаго выше случая движенія воздуха ничто не измѣнится, если, отбросивъ участокъ сифонной трубы DCB, мы будемъ разсматривать (черт. № 51-й) просто вертикальную трубу АВ высоты  $H$  mtr. съ площадью основанія  $\omega \text{ mtr.}^2$  (или  $\omega = 1 \text{ mtr.}^2$ ) открытую съ обоихъ концовъ А и В и заполненную воздухомъ при т-рѣ  $t_1$ . Дѣйствіе колѣна DC сифонной трубы мы замѣняемъ въ этомъ случаѣ вліяніемъ воображаемаго столба атмосфернаго воздуха т-ры  $t$  и той же, что и труба АВ, высоты  $H$ .

Подъ вліяніемъ разности давленій  $p - p_1$  на уровнѣ нижняго сѣченія В внутри и внѣ трубы, въ трубѣ АВ возбуждается тоже самое движеніе воздуха отъ В вверхъ къ А и съ тою же скоростью вытеканія  $v_{t_1}$  изъ отверстія А.

**2. Различныя формы выраженія теоретическаго напора или избыточнаго давленія.**

Если площадь  $\omega$  поперечнаго сѣченія вертикальной трубы или канала положить равною 1 mtr.<sup>2</sup>, то при высотѣ Н mtr. и температурахъ  $t$  и  $t_1$  внѣ трубы и, соответственно внутри ея, величина избыточнаго давленія или теоретическій напоръ выражается найденною выше формулою:

$$p - p_1 = H\delta \left( \frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right) \text{ въ klgr. . . . . (4)}$$

Представляемая этимъ выраженіемъ разность вѣсовъ или давленій  $p$  и  $p_1$  можетъ быть въ свою очередь представлена какъ вѣсъ или давленіе нѣкотораго столба воздуха съ основаніемъ въ 1 mtr.<sup>2</sup> взятаго при какой угодно произвольной т-рѣ  $\tau$ , но при соответствующей этой т-рѣ высотѣ  $h_\tau$ ; въ этомъ случаѣ вѣсъ или давленіе на 1 mtr.<sup>2</sup> основанія уравновѣшивающаго столба, очевидно, выразится въ видѣ:

$$p - p_1 = h_\tau \cdot \delta_\tau \text{ klgr. . . . . (a)}$$

Вмѣсто того, чтобы вводить въ формулы произвольную т-ру  $\tau$ , проще выразить давленіе уравновѣшивающаго столба воздуха, взявъ послѣдній при 0°C, тогда:

$$p - p_1 = h_0 \delta = H\delta \left( \frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right) \text{ klgr. . . . . (b)}$$

гдѣ, по прежнему, черезъ  $\delta$  обозначена плотность воздуха при 0°C., а черезъ  $h_0$  въ mtr. высота при 0° уравновѣшивающаго столба.

Обозначивъ черезъ  $h$  высоту уравновѣшивающаго столба при т-рѣ  $t$  наружнаго, притекающаго къ нижнему основанію трубы, воздуха и зная, что  $h = h_0 (1 + \alpha t)$ , можемъ въ предыдущее выраженіе ввести вмѣсто  $h_0$ , высоту уравновѣшивающаго столба при  $t$ °C., написавъ выраженіе теоретическаго напора въ формѣ:

$$p - p_1 = \frac{h}{1 + \alpha t} \delta = H\delta \left( \frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right) \text{ . . . . . (c)}$$

Точно также можемъ ввести въ выраженіе теоретическаго напора высоту  $h_1$  уравновѣшивающаго столба воздуха при температурѣ  $t_1$ , съ которой воздухъ вытекаетъ изъ верхняго основанія трубы, если снова воспользуемся зависимостью:

$$h_1 = h_0 (1 + \alpha t_1).$$

При этомъ условіи получимъ:

$$p - p_1 = \frac{h_1}{1 + \alpha t_1} \delta = H\delta \left( \frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right) \text{ . . . . . (d)}$$

Наконецъ, величину теоретическаго напора можемъ представить вѣсомъ или давленіемъ столба воды, имѣющаго основаніе  $\omega$  равное 1 mtr. <sup>2</sup>.

Такъ какъ вѣсъ столба воздуха высотой въ 1 mtr. при 0°C. и при основаніи въ 1 mtr. <sup>2</sup> вѣсиль  $\delta = 1,293$  klgr.; а вѣсъ такого же столба воды равенъ 1000 klgr., то  $h_w$  высота въ mtr. столба воды, уравновѣшивающаго столбъ воздуха высотой  $h_0$  при 0°C., найдется изъ условія:

$$1000 \times h_w = \delta h_0 = 1,293 h_0;$$

откуда:

$$h_w = \frac{1,293}{1000} h_0 = 0,001293 h_0 \text{ mtr.}$$

Въ технику обыкновенно выражаютъ  $h_w$  въ миллиметрахъ водяного столба, что доставляетъ:

$$h_w = 1,293 h_0 \text{ mm.}$$

Такъ какъ столбъ воды съ основаніемъ въ 1 mtr. <sup>2</sup> и при высотѣ въ 1 mm. вѣсиль 1 klgr., то при высотѣ  $h_w$  уравновѣживающаго столба въ mm'ахъ, теоретическій напоръ въ klgr. выражается зависимостью:

$$p - p_1 = h_w = (1 \text{ klgr.} \times h_w) = h_0 \delta = H \delta \left( \frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right) \text{ klgr.} \quad (e)$$

### 3. Высота теоретическаго напора.

Въ обѣ части ур-ній (b), (c) и (d), выражающихъ въ различныхъ формахъ величину теоретическаго напора, входитъ общимъ множителемъ  $\delta$  — плотность воздуха при 0°C., сокративъ его и внеся во второй части выраженій множитель  $H$  въ скобки, получимъ:

$$h_0 = \frac{h}{1 + \alpha t} = \frac{h_1}{1 + \alpha t_1} = \left( \frac{H}{1 + \alpha t} - \frac{H}{1 + \alpha t_1} \right) \text{ mtr.} \quad \dots \quad (5)$$

Первая часть этого выраженія представляетъ отнесенную къ 0°C. высоту столба воздуха, уравновѣживающаго избыточное давленіе и взятую при температурахъ 0°C.,  $t$  или  $t_1$ . Равная ей численно вторая часть представляетъ разность отнесенныхъ къ 0°C. высотъ воздушныхъ столбовъ, взятыхъ при температурѣ  $t$  и  $t_1$  и соответствующихъ давленіямъ  $p$  и  $p_1$ .

Выраженіе (5) получило названіе — *высоты теоретическаго напора* и представляетъ высоту  $h_0$  того столба воздуха, отнесеннаго къ 0°C., давленіе котораго равно избыточному давленію, т.-е. теоретическому напору  $h_0 \delta$ .

Высоту теоретическаго напора можно измѣрять и высотой во-

дяного столба. Такъ какъ изъ ур-нія (е) можно вывести зависи-  
мость:

$$\frac{h_w}{\delta} = \frac{h_w}{1.293} = h^0.$$

то:

$$\frac{h_w}{1.293} = \left( \frac{H}{1 + \alpha t} - \frac{H}{1 + \alpha t_1} \right) \dots \dots \dots (6)$$

Первая часть этого ур-нія выражается въ мтр'ахъ водяного столба, вторая же—въ мтр'ахъ воздушнаго.

Такъ какъ высота теоретическаго напора, измѣряя величину самого напора, представляетъ болѣе простое его выраженіе, то въ дальнѣйшихъ нашихъ выводахъ мы будемъ всюду, вмѣсто выраженія теоретическаго напора пользоваться выраженіемъ высоты теоретическаго напора, тѣмъ болѣе, что для перехода отъ выраженія высоты напора въ мтр'ахъ воздушнаго столба къ выраженію напора въ клгр. достаточно первое выраженіе умножить на плотность воздуха при 0°  $\delta = 1.293$ , если же площадь, сѣченія  $\omega$  столба воздуха не равна 1 мтр.,—то еще и на  $\omega$  въ мтр.,

4. Теоретическая скорость истечения  $v_1$ .

При выводѣ величины теоретическаго напора мы совершенно не принимали во вниманіе, что въ предѣлахъ высоты трубы Н воздухъ движется въ руслѣ, огражденномъ матеріальными стѣнками, способными оказывать этому движенію сопротивленіе, благодаря, напри- мѣръ, тренію между частицами воздуха, прикасающимися къ стѣнкамъ и поверхностью этихъ послѣднихъ; кромѣ сопротивленія отъ тренія, воздухъ при своемъ движеніи по трубамъ и каналамъ встрѣчаетъ рядъ разнообразныхъ сопротивленій, зависящихъ отъ внезапныхъ измѣненій площади или формы поперечныхъ сѣченій каналовъ, отъ изги- бовъ, поворотовъ и т. д.

Игнорируя до сихъ поръ вредное вліяніе этихъ сопротивленій, мы полу- чили преувеличенное значеніе напора, недостижимое въ практическихъ усло- віяхъ и потому назвали его теоретическимъ напоромъ.

Слѣдуя тому же приему и далѣе, т.-е. игнорируя то сопротивле- ніе, которое въ дѣйствительности встрѣчаетъ воздухъ при вытеканіи въ спокойную атмосферу со стороны этой послѣдней, для определѣ- нія скорости вытеканія воздуха  $v_1$  изъ верхняго отверстія трубы, мы можемъ воспользоваться формулою Торичелли:

$$v = \sqrt{2gh};$$

эта формула выведена въ предположеніи, что воздухъ вытекаетъ въ безвоздушное пространство, при чемъ  $h = \frac{v^2}{2g}$  представляетъ ту вы- соту, на какую вытекающій воздухъ могъ бы подняться въ пустотѣ, а величина  $g = 9.81$  мтр./сек. есть ускореніе паденія.

Законъ Торичелли справедливъ однако же только для того случая, когда *удѣльный вѣсъ движимой части жидкости или газа равенъ удѣльному вѣсу движущей части.*

Движущей частью у насъ служить теоретическій напоръ, выраженный столбомъ воздуха  $h_0$  при  $0^\circ\text{C}$ ., имѣющимъ удѣльный вѣсъ  $\delta = 1.293$ , тогда какъ *движимая часть*—масса воздуха въ трубѣ имѣетъ температуру  $t_1$  и соотвѣтствующую ей меньшую плотность (удѣльный вѣсъ)

$$\delta_{t_1} = \frac{\delta}{1 + \alpha t_1} = \delta \frac{1}{1 + \alpha t_1};$$

для того, чтобы формула Торичелли была приложима къ нашему случаю, очевидно, надо движущую часть воздуха, т.-е. теоретическій напоръ взять выраженнымъ при плотности  $\delta_{t_1}$ , т.-е. ввести въ формулу Торичелли вмѣсто  $h_0$  при  $0^\circ$ , высоту уравновѣшивающаго столба воздуха, или высоту теоретическаго напора при  $t_1$ , т.-е.

$$h_1 = h_0 (1 + \alpha t_1).$$

При этомъ условіи скорость вытекания болѣе нагрѣтаго воздуха:

$$v_1 = \sqrt{2g h_1} = \sqrt{2g h_0 (1 + \alpha t_1)};$$

откуда:

$$h_1 = h_0 (1 + \alpha t_1) = \frac{v_1^2}{2g}.$$

Выразивъ теперь при  $0^\circ\text{C}$  объ части этого ур-нія, получаемъ:

$$h_0 = \frac{h_1}{1 + \alpha t_1} = \frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)}; \dots \dots \dots (7)$$

Лѣвая часть ур-нія (7) попрежнему представляетъ отнесенную къ  $0^\circ\text{C}$  высоту теоретическаго напора, а правая—получила названіе *высоты теорѣтической скорости истеченія.*

Высота скорости вообще измѣряетъ ту часть высоты напора, а, слѣдовательно, и самого напора, какая должна быть затрачена на создание скорости вытекания воздуха.

Уравненіе (7) показываетъ, что въ идеальныхъ условіяхъ, при отсутствіи сопротивленій движенію воздуха какъ въ предѣлахъ трубы или канала, такъ и при вытеканіи его въ атмосферу *вся высота теорѣтической напора  $h_0$  цѣликомъ превращается въ высоту скорости  $\frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)}$  которая названа теорѣтической.* Иначе говоря *весь теорѣтической напоръ или что тоже вся имѣющаяся въ запасъ энергія превращается въ живую силу и расходуется исключительно на создание скорости истеченія  $v_1$ ; дѣйствительно, умноживъ объ части выраженія:*

$h_0 = \frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)}$  на  $\delta$ , т. е. на удѣльный вѣсъ воздуха при  $0^\circ\text{C}$ ., получаемъ:

$$h_0 \delta = \frac{\delta}{g(1 + \alpha t_1)} \cdot \frac{v_1^2}{2};$$

или, такъ какъ:  $\frac{\delta}{g(1 + \alpha t_1)} = m = \text{массѣ вещества,}$

то:  $h_0 \delta = \frac{mv_1^2}{2} \dots \dots \dots (8)$

Въ этомъ выраженіи  $h_0 \delta$  — есть теоретическій напоръ выраженный въ kgr.,  $\frac{mv_1^2}{2}$  — есть выраженіе живой силы, соотвѣтствующей скорости  $v_1$  истечения.

Вообще говоря, часть теоретическаго напора, превращающаяся въ живую силу для созданія скорости, называется *скоростнымъ напоромъ*, а соотвѣтствующая часть высоты теоретическаго напора — *высотой скоростнаго напора*, какъ показываютъ ур-нія (7) и (8).

При отсутствіи сопротивленій весь теоретическій напоръ  $h_0 \delta$  превращается въ скоростной  $\frac{\delta v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)}$ , и вся высота  $h_0$  теоретическаго напора представляетъ собою высоту скоростнаго напора или высоту скорости

$$\frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)}$$

**5. Сопротивленія и формы ихъ выраженія.**

Какъ уже указывалось, при отсутствіи сопротивленій на пути движенія воздуха все избыточное давленіе  $p - p_1 = h_0 \delta$  или теоретическій напоръ идетъ на созданіе скорости, представляя собою въ этомъ

случаѣ скоростной напоръ  $\frac{v_1^2 \delta}{2g(1 + \alpha t_1)}$ .

Въ практическихъ условіяхъ однакоже часть теоретическаго напора приходится израсходовать на преодоленіе всякаго рода препятствій въ формѣ тренія и др., получившихъ общее названіе *вредныхъ сопротивленій* или просто *сопротивленій*.

Величина сопротивленій, такимъ образомъ, можетъ быть представлена, какъ нѣкоторая часть  $h_0'' \delta$  полного или теоретическаго напора  $h_0 \delta$ .

Если остальную часть теоретическаго напора, расходуемую на созданіе скорости, т. е. скоростной напоръ обозначимъ черезъ  $h_0' \delta$ , то очевидно, должно существовать равенство:

$$h_0 \delta = h_0' \delta + h_0'' \delta; \dots \dots \dots (9)$$

Показывающее, что теоретическій напоръ состоитъ изъ суммы скоростнаго напора  $h_0' \delta$  и напора  $h_0'' \delta$ , расходуемаго на преодоленіе сопротивленій.

Такъ какъ  $h_0'' \delta$  всегда положительная величина, то поэтому *дѣйствительный скоростной напоръ всегда меньше полная теоретическаго напора.*

а такъ какъ величину скоростного напора опредѣляются и скорости движенья по трубамъ и скорости истеченія, то *практически достижимыя скорости всегда меньше теоретическихъ.*

Отсюда заключаемъ, что вліяніе сопротивленій выражается въ уменьшеніи скоростей движенья воздуха въ трубамъ и каналахъ.

Раздѣливъ объ, части ур-нія (9) на  $\delta$ , найдемъ выраженіе  $h_0 = h_0' + h_0''$  показывающее, что *высота теоретическаго напора  $h_0$  состоитъ изъ суммы высоты скорости  $h_0'$  и высоты сопротивленій  $h_0''$ .* Послѣднее заключеніе даетъ намъ возможность представлять сопротивленія въ той же формѣ какъ теоретическій и скоростной напоры, т. е. вмѣсто самого сопротивленія въ klg. вводить высоту сопротивленія  $h_0''$  въ mt'ахъ воздушнаго столба при 0°C.

Обозначивъ далѣе черезъ  $v_2$  въ mt/сек. величину практически достижимой при, наличіи сопротивленій, скорости, докажемъ, что высоты сопротивленій можно выражать въ формѣ найденной для высоты скорости какъ часть этой послѣдней.

Высоту теоретическаго напора вообще представляемъ въ видѣ

$$h_0 = h_0' + h_0'' = \frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)} + h_0''$$

гдѣ  $\frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)}$  высота скорости  $v_1$ , выраженная столбомъ воздуха  $h'$ .

Въ томъ случаѣ, когда  $v_1$  есть теоретическая скорость, высота сопротивленій предполагается равной  $h_0'' = 0$  и предыдущее равенство превращается въ слѣдующее:

$$h_0 = h' = \frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)}; \dots \dots \dots (a)$$

обозначивъ черезъ  $v_2$  практически достижимую скорость и замѣчая, что при наличіи сопротивленій  $v_2 < v_1$ , имѣемъ:

$$h_0 = h' + h'' = \frac{v_2^2}{2y(1 + \alpha t_1)} + h''; \dots \dots \dots (b)$$

сравнивая вторыя части ур-ній (a) и (b) найдемъ:

$$h_0'' = \frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)} - \frac{v_2^2}{2g(1 + \alpha t_1)} = \frac{1}{2g(1 + \alpha t_1)}(v_1^2 - v_2^2); \dots (c)$$

такъ какъ скорость  $v_1$  больше скорости  $v_2$ , то ее можно представить какъ произведеніе  $v_2$  на нѣкоторый коэффициентъ численно всегда  $> 1$ -цы, т.е. полагать  $v_1 = \varphi v_2$ . Подставляя значеніе  $v_1 = \varphi v_2$  въ ур-ніе (c), находимъ:

$$h_0'' = \frac{1}{2g(1 + \alpha t_1)} (\varphi^2 v_2^2 - v_2^2) = \frac{v_2^2}{2g(1 + \alpha t_1)} (\varphi^2 - 1) \dots (d)$$

Такимъ образомъ мы доказали, что высота сопротивленія  $h_0$  представляется во-первыхъ въ той же формѣ, что и высота скорости  $v_2$ ,

при которой воздух вытекает из трубы, во-вторых, что численно она равна высотѣ этой же скорости, умноженной на положительную величину  $(\varphi^2 - 1)$ ; положивъ для упрощенія формуль  $\varphi^2 - 1 = Z$  назовемъ его *коэффициентомъ сопротивленія*, подразумѣвая подъ этимъ сумму численныхъ значеній коэффициентовъ всѣхъ отдѣльныхъ сопротивленій на данной длинѣ трубы. Численные значенія этихъ коэффициентовъ ниже даны въ особой таблицѣ.

Выведенная нами формула:

$$h_0'' = 2g(1 + \alpha t_1) \frac{v_2^2}{Z} \dots \dots \dots (10)$$

справедлива, однако же, только для того случая, когда температура внутри трубы и при истеченіи  $t_1 = \text{Const}$ .

Если же воздухъ входитъ въ трубу при температурѣ  $t_1$ , а при истеченіи имѣетъ высшую т-ру  $t_2$ , нагрѣваясь внутри трубы, тогда, допуская для простоты разсужденія, что сопротивленія равномерно распределяются по всей длинѣ трубы и обозначивъ черезъ  $t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}$

среднюю температуру, а черезъ  $v_{cp} = \frac{v_1 + v_2}{2}$  среднюю изъ практически достижимыхъ скоростей  $v_1$  и  $v_2$  при входѣ и при истеченіи воздуха можемъ выразить высоту сопротивленія при среднихъ условіяхъ температуры и скорости въ каналѣ аналогично предыдущему случаю, въ видѣ:

$$h_0'' = 2g(1 + \alpha t_{cp}) \frac{v_{cp}^2}{Z} \dots \dots \dots (2)$$

Высота же скорости, само собою разумѣется, должна быть отнесена къ температурѣ  $t_2$  и скорости  $v_2$  соответствующихъ конечному сѣченію трубы по направленію движенія газовъ, т.-е. мѣсту ихъ вытеканія и тогда:

$$h_0' = \frac{v_2^2}{2g(1 + \alpha t_2)}$$

### 6. Уравненіе практически достижимой скорости.

Все сказанное выше позволяетъ намъ сдѣлать слѣдующія заключенія:

1) Теоретическій напоръ въ случаѣ движенія воздуха и другихъ газовъ въ каналахъ и трубахъ, огражденныхъ матеріальными стѣнками, неспособными проводить теплоту, расходуется на созданіе и поддержаніе скорости теченія и на преодоленіе вредныхъ на пути сопротивленій.

2) Часть полнаго напора, расходуемая на созданіе скорости, получила названіе *скоростною*, а остальная часть, расходуемая на побѣжденіе сопротивленій, названа *потеряннымъ напоромъ* въ томъ смыслѣ, что она не участвуетъ въ созданіи и поддержаніи скорости.

3) Сумма скоростного напора и напора потеряннаго равна величинѣ полнаго теоретическаго напора.

4) При замѣнѣ напоровъ соответствующими имъ высотами сумма высоты скорости и высоты сопротивленій равна высотѣ теоретическаго напора.

5) Такъ какъ высота скорости меньше теоретическаго напора на высоту сопротивленій, то практически достижимая скорость всегда меньше теоретической.

6) Высоты скоростей и сопротивленій выражаются одинаково въ зависимости отъ скорости.

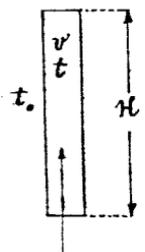
Пользуясь этими замѣчаніями перейдемъ къ составленію ур-ній движенія воздуха въ каналахъ.

### 1. Первый основной случай.

Положимъ имѣется (черт. № 52) прямой вертикальный каналъ постояннаго сѣченія въ  $1 \text{ mtr}^2$  и высоты  $H \text{ mtr}$ ;  $t$ -ра воздуха въ каналѣ по всей его высотѣ равна  $t$ ,  $t$ -ра внѣшняго воздуха  $t_0$ ;  $t_0 < t$ .

Высота теоретическаго напора, на основаніи всего предыдущаго выразится въ видѣ:

Черт. № 52а 
$$\frac{H}{1 + \alpha t_0} = \frac{H}{1 + \alpha t} \dots \dots \dots (a)$$



Обозначивъ черезъ  $v$  въ  $\text{mtr}/\text{sec}$  искомую скорость движенія воздуха въ данномъ каналѣ, можемъ написать выраженія какъ для высоты скорости, такъ и для высоты сопротивленій, именно:

высота скорости 
$$\frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)}; \dots \dots \dots (b)$$

высота сопротивленій 
$$\frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)} Z \dots \dots \dots (c)$$

гдѣ  $Z$  численный коэффициентъ, опредѣляющій значеніе величины сопротивленія.

Въ условіяхъ установившагося дѣйствія должно выполняться равенство:

$$\frac{H}{1 + \alpha t_0} - \frac{H}{1 + \alpha t} = \frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)} + \frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)} Z = \frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)} (1 + Z) \dots (1)$$

При заданныхъ  $H$ ,  $t_0$ ,  $t$  и  $Z$  изъ ур-нія (1) можетъ быть вычислена дѣйствительная или практически-достижимая скорость движенія воздуха.

Ур-ніе (1) является основнымъ и приложимо съ соответствующими измѣненіями ко всякаго рода частнымъ случаямъ.

### 2. Второй случай.

$t$ -ра внѣшняго воздуха  $t_0 > t$  постоянной  $t$ -ры въ каналѣ.

При всѣхъ прочихъ прежнихъ обозначеніяхъ, имѣемъ:

$$\frac{H}{1 + \alpha t} - \frac{H}{1 + \alpha t_0} = \frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)} (1 + Z) \dots \dots \dots (2)$$

Въ этомъ случаѣ болѣе холодный воздухъ внутри вертикальнаго канала долженъ опускаться, т. е. движеніе должно происходить въ обратномъ направленіи, сравнительно съ предыдущимъ случаемъ:

### 3. Третій случай.

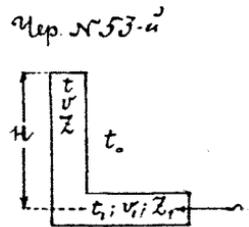
Въ вертикальномъ каналѣ постояннаго сѣченія и высоты  $H$  мтр. т-ра воздуха постепенно измѣняется отъ  $t_0$  при входѣ въ сѣченіи А до  $t$  при выходѣ въ сѣченіи В. Въ этомъ случаѣ необходимо различать скорость вытеканий  $v$  относимую къ конечной т-рѣ  $t$  и среднюю скорость  $v_{cp.}$  въ предѣлахъ высоты канала относя къ ней высоту сопротивлений, проявляющихся въ предѣлахъ той же высоты канала  $H$ . На этомъ основаніи ур-ніе движенія должно имѣть видъ:

$$\frac{H}{1 + \alpha t_0} - \frac{H}{1 + \alpha t_{cp.}} = \frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)} + \frac{v_{cp.}^2}{2g(1 + \alpha t_{cp.})} Z \dots (3)$$

гдѣ:  $t_{cp.} = \frac{t_0 + t}{2}$  = средней т-рѣ воздуха въ каналѣ.

### 4. Четвертый случай.

Каналъ постояннаго сѣченія (черт. № 53-й) состоитъ изъ двухъ участковъ: горизонтальнаго и вертикальнаго высоты  $H$ ; т-ра воздуха внѣ канала  $t_0$ ; т-ра въ горизонтальномъ участкѣ  $t_1 > t_0$ , въ вертикальномъ:  $t > t_0$ , слѣдовательно, не постоянна по всей длинѣ канала но постоянна въ каждомъ изъ участковъ. Полагая вертикальное измѣреніе поперечнаго сѣченія горизонтальнаго участка небольшимъ, мы должны считать высоту напора въ этомъ участкѣ равной нулю. Обозначая черезъ  $v_1$  и  $v$  скорости въ участкахъ и черезъ  $Z_1$  и  $Z$  коэффициенты сопротивленій, въ нихъ, можемъ написать выраженіе:



$$\frac{H}{1 + \alpha t_0} - \frac{H}{1 + \alpha t} = \frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)} (1 + Z) + \frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)} Z_1 \dots (4)$$

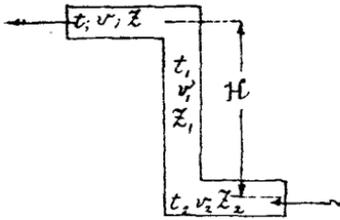
Слѣдовательно, горизонтальный участокъ участвуетъ только въ созданіи добавочной высоты сопротивленій, выраженной послѣднимъ членомъ ур-нія (4).

### 5. Пятый случай.

Положимъ (черт. № 54-й) каналъ состоитъ изъ 2-хъ горизонтальныхъ участковъ со вставленнымъ среднимъ вертикальнымъ, всѣ участки постояннаго сѣченія. Высота вертикальнаго участка  $H$ .

Въ каждомъ участкѣ особая т-ры:  $t_2$ ,  $t_1$  и  $t$ , особая скорости  $v_2$ ,  $v_1$  и  $v$  и свои коэффициенты сопротивленій  $Z_2$ ,  $Z_1$  и  $Z$ . Наружная

Чер. № 54-и



т-ра  $t_0$  ниже т-ръ въ участкахъ канала. Для этого случая ур-нiе будетъ имѣть видъ:

$$\frac{H}{1 + \alpha t_0} - \frac{H}{1 + \alpha t_1} = \frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)} (1 + Z) + \frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)} Z_1 + \frac{v_2^2}{2g(1 + \alpha t_2)} Z_2 \quad (5)$$

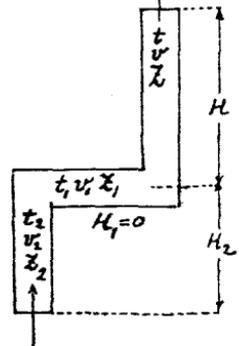
6. Шестой случай.

Каналъ состоитъ изъ двухъ крайнихъ вертикальныхъ участковъ высоту  $H_2$  и  $H$  со вставкою средняго горизонтальнаго ( $H_1 = 0$ ). Остальныя условія одинаковы съ случаемъ 5-мъ. (Черт. № 55-й).

Ур-нiе движенія получаетъ видъ;

$$\left( \frac{H}{1 + \alpha t_0} - \frac{H}{1 + \alpha t} \right) + \left( \frac{H_2}{1 + \alpha t_0} - \frac{H_2}{1 + \alpha t_2} \right) = \frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)} (1 + Z) + \frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)} Z_1 + \frac{v_2^2}{2g(1 + \alpha t_2)} Z_2 \quad (6)$$

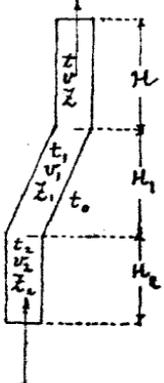
Чер. № 55-и



7. Седьмой случай.

(Черт. № 56-й). Каналъ состоитъ изъ двухъ вертикальныхъ участковъ со вставкою наклоннаго; высоты участковъ  $H_2$ ,  $H_1$  и  $H$ ; конечно, въ этомъ случаѣ наклонный участокъ влияетъ на величину напора и ур-нiе скорости при обозначенiяхъ, данныхъ на чертежѣ, напишется въ формѣ:

Чер. № 56-и



$$\left( \frac{H}{1 + \alpha t_0} - \frac{H}{1 + \alpha t} \right) + \left( \frac{H_1}{1 + \alpha t_0} - \frac{H_1}{1 + \alpha t_1} \right) + \left( \frac{H_2}{1 + \alpha t_0} - \frac{H_2}{1 + \alpha t_2} \right) = \frac{v^2}{2g(1 + \alpha t)} (1 + Z) + \frac{v_1^2}{2g(1 + \alpha t_1)} Z_1 + \frac{v_2^2}{2g(1 + \alpha t_2)} Z_2 \quad (7)$$

8. Восьмой случай.

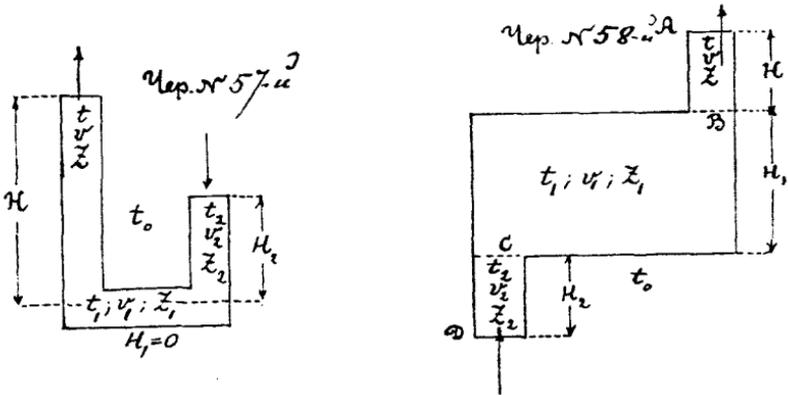
(Черт. № 57-й). Въ случаѣ канала, представленнаго на чертежѣ, при данныхъ на немъ обозначенiяхъ и при меньшемъ т-ръ въ участкахъ, необходимо имѣть въ виду, что избыточныя давления въ мень-

шем и больше вертикальных колѣнахъ стремится двигать воздухъ въ разныхъ направленіяхъ, слѣдовательно дѣйствительный движущій напоръ долженъ быть равенъ ихъ разности, т. е. ур-ніе принимаетъ видъ:

$$\left( \frac{H}{1 + \alpha t_0} - \frac{H}{1 + \alpha t} \right) - \left( \frac{H_2}{1 + \alpha t_0} - \frac{H_2}{1 + \alpha t_2} \right) = 2g \frac{v^2}{(1 + \alpha t)} (1 + Z) + 2g \frac{v_1^2}{(1 + \alpha t_1)} Z_1 + 2g \frac{v_2^2}{(1 + \alpha t_2)} Z_2 \dots \dots \dots (8)$$

9. Девятый случай.

Если между двумя вертикальными участками (Черт. № 58-й) вставленъ горизонтальный—съ большой высотой  $H_1$ , пренебрегать кото-



рою уже нельзя, тогда, вслѣдствіе расширения участка, скорость въ немъ значительно уменьшается и практически можетъ быть принята равною нулю. Въ силу этого величина высоты сопротивленій въ этомъ участкѣ также равна нулю, но зато при вытеканіи воздуха изъ сѣченія С надо вводить высоту скорости такъ же, какъ и при вытеканіи изъ сѣченія А.

Ур-ніе скорости представится въ видѣ:

$$\left( \frac{H}{1 + \alpha t_0} - \frac{H}{1 + \alpha t} \right) - \left( \frac{H_1}{1 + \alpha t_0} - \frac{H_1}{1 + \alpha t_1} \right) + \left( \frac{H_2}{1 + \alpha t_0} - \frac{H_2}{1 + \alpha t_2} \right) = 2g \frac{v^2}{(1 + \alpha t)} (1 + Z) - 2g \frac{v_2^2}{(1 + \alpha t_2)} (1 + Z_2) \dots \dots \dots (9)$$

Разсмотрѣнными случаями, конечно, далеко не исчерпывается число возможныхъ комбинацій участковъ температуръ, скоростей и сопротивленій, но, во всякомъ случаѣ, съ ихъ помощью является возможность сдѣлать нѣкоторые общіе выводы, именно:

а) лѣвая часть каждаго изъ у-ній представляетъ алгебраическую сумму высотъ избыточныхъ давленій или напоровъ въ каждомъ изъ отдѣльныхъ участковъ системы каналовъ.

б) Въ отдѣльныхъ участкахъ высота избыточнаго давления положительна, если, при т-рѣ воздуха въ участкѣ большей, чѣмъ т-ра наружнаго воздуха  $t_0$ , воздухъ долженъ подниматься вверхъ или при т-рѣ въ участкѣ низшей, чѣмъ наружная, воздухъ долженъ опускаться.

в) Если болѣе теплый сравнительно съ наружнымъ воздухъ въ участкѣ долженъ опускаться или долженъ подниматься болѣе холодный—высота избыточнаго давления или напора является отрицательной величиной.

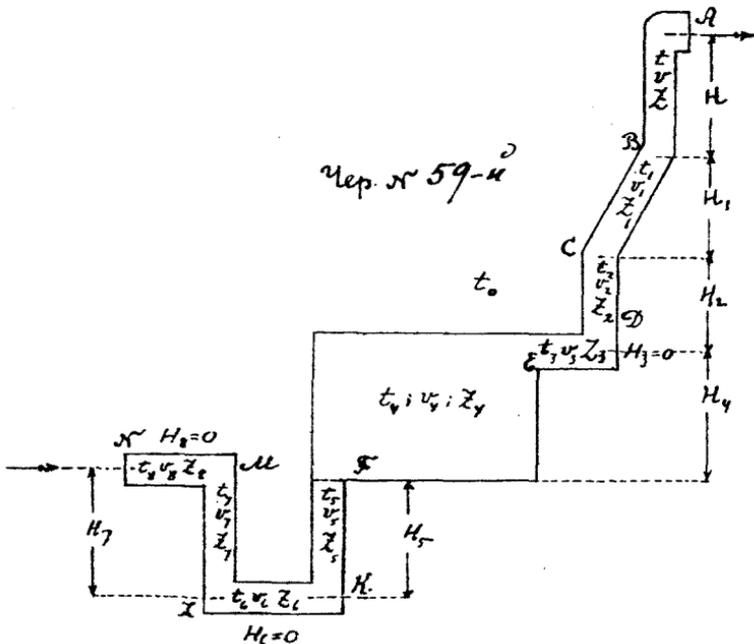
г) Правая часть ур-ній состоитъ изъ суммы высотъ скоростей и высотъ сопротивленій.

д) Высоты скоростей всегда относятся къ скоростямъ въ выходныхъ сѣченіяхъ и т-рамъ воздуха при его вытеканіи.

е) Высоты сопротивленій въ случаѣ постоянныхъ т-рѣ по длинѣ участковъ выражаются черезъ скорости и т-ры въ этихъ участкахъ, въ случаяхъ же переменныхъ т-рѣ и скоростей зависятъ отъ ихъ среднихъ значеній.

### 10. Общій случай системы каналовъ.

На основаніи сказаннаго не трудно уже составить уравненіе для системы каналовъ, представленныхъ на черт. № 59.



Положимъ, приближаясь къ случаямъ, возможнымъ въ практикѣ, что въ участкахъ:

NM, ML, LK и KF т-ры протекающаго воздуха одинаковы и равны  $t_s = t_6 = t_7 = t_8$ , т. е. всѣ равны т-рѣ  $t_s$ .

Точно также при постоянствѣ поперечныхъ сѣченій въ этихъ



а для цѣпи каналовъ до плоскости  $m-n$ .

$$\left\{ \frac{H_1''}{1 + \alpha t_0} - \frac{H_1''}{1 + \alpha t_1} \right\} + \left\{ \frac{H_2}{1 + \alpha t_0} - \frac{H_2}{1 + \alpha t_2} \right\} - \frac{M}{1 + \alpha t_1} = 2g[1 + \alpha t_2] [1 + Z_2], \dots \dots \dots (11b)$$

12) Общій видъ ур-ній движенія.

Если для любой системы каналовъ сумму давленій наружнаго воздуха обозначимъ черезъ  $A$ , алгебраическую сумму давленій внутри системы каналовъ—черезъ  $B$ , то величина избыточнаго давленія, которой мы будемъ располагать для созданія скорости и побѣжденія сопротивленій равна разности  $A-B$ ; если сумму высотъ скоростей и сопротивленій обозначимъ черезъ  $C$ , то при положительномъ

$$A-B=C \dots \dots \dots (12)$$

движеніе воздуха въ системѣ каналовъ должно происходить вверхъ, въ противномъ случаѣ, къ отрицательному избыточному давленію необходимо добавить нѣкоторое добавочное давленіе  $F$ , такъ чтобы выполнялось условіе:

$$(A-B)+F=C. \dots \dots \dots (13)$$

Послѣднее равенство можно представить въ формѣ;

$$(A+F)-B=C. \dots \dots \dots (14)$$

Это значить, что для движенія воздуха необходимо добавочное давленіе нагнетательнаго вентилятора  $F$ .

То же ур-ніе можно переписать въ формѣ:

$$A-(B-F)=C. \dots \dots \dots (15)$$

т.е., что сумма высотъ внутренняго давленія  $B$  можетъ быть уменьшена разрѣдительнымъ дѣйствіемъ высасывающаго вентилятора.

Наконецъ, въ случаѣ равенства  $A=B$ .

Движеніе воздуха въ системѣ можетъ быть осуществимо только примѣненіемъ посторонняго механическаго давленія.

$$F=C. \dots \dots \dots (16)$$

Во всѣхъ разсмотрѣнныхъ нами случаяхъ во вторыя части ур-ній входили неизвѣстныя скорости, и зависящія отъ нихъ выраженія, со-державшія коэффициенты

$$Z, Z_1, Z_2 \dots \dots \dots Z_n.$$

Каждое из приведенных выше ур-ний позволяло вычислить только одну из скоростей, слѣдовательно требовалось задание всѣх остальных неизвѣстных.

Въ практикѣ расчетовъ обыкновенно задаются рядомъ неизвѣстныхъ еще величинъ, исходя изъ теоретическихъ и конструктивных соображеній и затѣмъ провѣряютъ выборъ по даннымъ выше уравненіямъ.

Напримѣръ, имѣя секундные объемы воздуха, протекающаго по цѣпи каналовъ, при назначенныхъ уже т-рахъ, и задаваясь площадями сѣченій участковъ, вычисляютъ потребныя скорости, осуществимость же одной изъ этихъ скоростей уже провѣряютъ при наличии сопротивленій по ур-ніямъ для практически осуществимыхъ скоростей.

### 13) О коэффициентахъ сопротивленій.

Величины коэффициентовъ сопротивленій движенію воздуха мы всюду обозначали буквою Z, понимая подъ нею численное значеніе всѣхъ разнообразныхъ препятствій, уменьшающихъ величину движущей силы и скорости.

Здѣсь, не входя въ детали, укажемъ, что сопротивленія раздѣляются на два рода:

а) Сопротивленія, вызываемыя треніемъ частицъ движущагося потока воздуха или другого газа о всегда шереховатыя стѣнки матеріальныхъ каналовъ и трубъ.

Величину этого сопротивленія будемъ обозначать буквою R и считать его силой непрерывно приложенной по поверхности даннаго участка канала.

Въ зависимости отъ длины l, периметра u и площади поперечнаго сѣченія канала  $\omega$  величина R выражается формулою:

$$R = \rho \frac{u}{\omega} \cdot l \dots \dots \dots (17)$$

гдѣ  $\rho$  — коэффициентъ пропорціональности есть коэффициентъ тренія. Формула (17) показываетъ, что величина тренія прямо пропорціональна периметру u, омываемому воздушнымъ потокомъ, и длинѣ участка l, и обратно пропорціональна площади поперечнаго сѣченія  $\omega$ .

Что касается до коэффициента тренія  $\rho$ , то величина его зависитъ отъ рода и состоянія поверхности, вдоль которой движутся газы, отъ температуры и состава этихъ газовъ. Коэффициентъ тренія уменьшается для гладкихъ поверхностей и возрастаетъ для шереховатыхъ при всѣхъ прочихъ одинаковыхъ условіяхъ, поэтому, всегда слѣдуетъ стремиться дѣлать стѣнки всякаго рода каналовъ, назначенныхъ для проводки газовъ, возможно болѣе гладкими. Въ прилагаемой здѣсь таблицѣ даны значенія для коэффициентовъ тренія воздуха въ кирпичныхъ каналахъ.

Таблица № 47-й.

коэффициентов трения ( $\rho$ ) воздуха въ кирпичныхъ каналахъ.

Периметръ канала въ m	Коэффициентъ тренія.	Периметръ канала въ m	Коэффициентъ тренія.
0.50 включит. до 0.51	0.035	0.80 включит. до 0.84	0.0084
0.51 " " 0.52	0.025	0.84 " " 0.88	0.0082
0.52 " " 0.53	0.020	0.88 " " 0.95	0.0080
0.53 " " 0.54	0.019	0.95 " " 1.03	0.0078
0.54 " " 0.55	0.017	1.03 " " 1.15	0.0076
0.55 " " 0.56	0.015	1.15 " " 1.34	0.0074
0.56 " " 0.57	0.014	1.34 " " 1.69	0.0072
0.57 " " 0.59	0.013	1.69 " " 1.99	0.0070
0.59 " " 0.61	0.012	1.99 " " 2.50	0.0069
0.61 " " 0.65	0.011	2.50 " " 3.50	0.0068
0.65 " " 0.72	0.010	3.50 " " 6.52	0.0067
0.72 " " 0.74	0.009	6.52 " " 12.50	0.0066
0.74 " " 0.77	0.0088	свыше 12.50	0.0065
0.77 " " 0.80	0.0086		

Для квадратнаго поперечнаго сѣченія со стороною  $a$ , периметръ  $u = 4a$ ;  $\omega = a^2$ ; и величина тренія:

$$R = \rho \frac{u}{\omega} l = \rho \frac{4a}{a^2} l = \rho \frac{4l}{a};$$

Точно также, для круглаго сѣченія діаметра  $d$ :  $u = \pi d$ ;  $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$

$$R = \rho \frac{4\pi d}{\pi d^2} l = \rho \frac{4l}{d};$$

Въ цѣляхъ облегченія вычисленій здѣсь прилагается извѣстная таблица проф. Ритчеля величинъ  $R$  вычисленныхъ для прямоугольныхъ, квадратныхъ и круглыхъ сѣченій кирпичныхъ каналовъ при длинѣ  $l = 1$  mt.

Таблица № 48 и.

значений величинъ тренія  $K$  въ кирпичныхъ каналахъ при  $l=1$  мт.

Значеніе величинъ $\frac{\rho u}{f}$ для круглыхъ и квадратныхъ поперечныхъ сѣченій							
Круглое поперечное сѣченіе				Квадратное поперечное сѣченіе			
Диаметръ м	Периметръ и м	Поперечное сѣченіе $f$ см	$\frac{\rho u}{f}$	Сторона м	Периметръ и м	Поперечное сѣченіе $f$ см	$\frac{\rho u}{f}$
0.175	0.550	0.024	0.389	0.125	0.50	0.016	1.122
0.200	0.628	0.031	0.220	0.150	0.60	0.023	0.320
0.250	0.785	0.049	0.137	0.175	0.70	0.031	0.229
				0.200	0.80	0.040	0.168
				0.250	1.00	0.063	0.125
0.300	0.942	0.071	0.107	0.300	1.20	0.090	0.099
0.350	1.100	0.096	0.087	0.350	1.40	0.123	0.082
0.400	1.257	0.126	0.074	0.400	1.60	0.160	0.072
0.450	1.414	0.160	0.064	0.450	1.80	0.203	0.062
0.500	1.570	0.196	0.058	0.500	2.00	0.250	0.055
0.550	1.73	0.237	0.051	0.550	2.20	0.303	0.050
0.600	1.89	0.283	0.047	0.600	2.40	0.360	0.046
0.650	2.04	0.332	0.042	0.650	2.60	0.423	0.042
0.700	2.20	0.385	0.039	0.700	2.80	0.490	0.039
0.750	2.36	0.442	0.037	0.750	3.00	0.563	0.036
0.800	2.51	0.503	0.034	0.800	3.20	0.640	0.034
0.850	2.67	0.567	0.032	0.850	3.40	0.723	0.032
0.900	2.83	0.636	0.030	0.900	3.60	0.810	0.030
0.950	2.98	0.709	0.029	0.950	3.80	0.903	0.028
1.000	3.14	0.785	0.027	1.000	4.00	1.000	0.027
1.050	3.30	0.866	0.026	1.050	4.20	1.103	0.026
1.100	3.46	0.950	0.025	1.100	4.40	1.210	0.024
1.150	3.61	1.039	0.023	1.150	4.60	1.323	0.023
1.200	3.77	1.131	0.022	1.200	4.80	1.440	0.022
1.250	3.93	1.227	0.021	1.250	5.00	1.563	0.021
1.300	4.08	1.327	0.021	1.300	5.20	1.690	0.021
1.350	4.24	1.431	0.020	1.350	5.40	1.823	0.020
1.400	4.40	1.539	0.019	1.400	5.60	1.960	0.019
1.450	4.56	1.651	0.019	1.450	5.80	2.103	0.018
1.500	4.71	1.767	0.018	1.500	6.00	2.250	0.018
1.550	4.87	1.887	0.017	1.550	6.20	2.403	0.017
1.600	5.03	2.011	0.017	1.600	6.40	2.560	0.017
1.650	5.18	2.138	0.016	1.650	6.60	2.723	0.016
1.700	5.34	2.270	0.016	1.700	6.80	2.890	0.016
1.750	5.50	2.405	0.015	1.750	7.00	3.063	0.015
1.800	5.66	2.545	0.015	1.800	7.20	3.240	0.015
1.850	5.81	2.688	0.014	1.850	7.40	3.423	0.014
1.900	5.97	2.835	0.014	1.900	7.60	3.610	0.014
1.950	6.13	2.986	0.014	1.950	7.80	3.803	0.014
2.000	6.28	3.142	0.013	2.000	8.00	4.000	0.013
2.500	7.85	4.909	0.011	2.500	10.00	6.250	0.011

Значения величин  $\frac{\rho u}{f}$  для прямоугольных поперечных сечений

Размѣръ m×m	Периметръ и m	Поперечное сѣчение qm	$\frac{\rho u}{f}$	Размѣръ m×m	Периметръ и m	Поперечное сѣчение qm	$\frac{\rho u}{f}$
0.14×0.14	0.56	0.020	0.429	0.33×0.53	1.72	0.175	0.069
0.20	0.68	0.028	0.221	0.66	1.98	0.218	0.064
0.27	0.82	0.038	0.182	0.73	2.24	0.261	0.059
0.33	0.94	0.046	0.163	0.92	2.50	0.304	0.056
0.40	1.08	0.056	0.147	1.05	2.77	0.347	0.055
0.46	1.20	0.064	0.138	1.18	3.02	0.389	0.053
0.53	1.34	0.074	0.130	1.31	3.28	0.432	0.052
0.66	1.60	0.092	0.125	1.44	3.54	0.475	0.050
0.79	1.86	0.111	0.118	1.57	3.80	0.518	0.049
0.92	2.12	0.129	0.114	1.70	4.06	0.561	0.048
1.05	2.38	0.147	0.112	1.83	4.32	0.604	0.048
				1.96	4.58	0.647	0.047
				2.09	4.84	0.690	0.047
0.20×0.20	0.80	0.040	0.172	0.40×0.40	1.60	0.160	0.072
0.27	0.94	0.054	0.139	0.46	1.72	0.184	0.065
0.33	1.06	0.066	0.122	0.53	1.86	0.212	0.061
0.40	1.20	0.080	0.111	0.66	2.12	0.264	0.055
0.46	1.32	0.092	0.106	0.79	2.38	0.316	0.052
0.53	1.46	0.106	0.099	0.92	2.64	0.368	0.049
0.66	1.72	0.132	0.091	1.05	2.90	0.420	0.047
0.79	1.98	0.158	0.088	1.18	3.16	0.472	0.046
0.92	2.24	0.184	0.084	1.31	3.42	0.524	0.044
1.05	2.50	0.210	0.081	1.44	3.68	0.576	0.043
				1.57	3.94	0.628	0.042
0.27×0.27	1.08	0.073	0.113	1.70	4.20	0.680	0.041
0.33	1.20	0.089	0.100	1.83	4.46	0.732	0.041
0.40	1.34	0.108	0.089	1.96	4.72	0.784	0.040
0.46	1.46	0.124	0.085	2.09	4.98	0.836	0.040
0.53	1.60	0.143	0.081	0.46×0.46	1.84	0.212	0.061
0.66	1.86	0.178	0.073	0.53	1.98	0.244	0.057
0.79	2.12	0.213	0.069	0.66	2.24	0.304	0.051
0.92	2.38	0.248	0.066	0.79	2.50	0.363	0.047
1.05	2.64	0.284	0.063	0.92	2.76	0.423	0.044
1.18	2.90	0.319	0.062	1.05	3.02	0.483	0.042
1.31	3.16	0.354	0.061	1.18	3.28	0.543	0.041
1.44	3.42	0.389	0.060	1.31	3.54	0.603	0.039
1.57	3.68	0.424	0.058	1.44	3.80	0.662	0.039
1.70	3.94	0.459	0.058	1.57	4.06	0.722	0.038
1.83	4.20	0.494	0.057	1.70	4.32	0.782	0.037
1.96	4.46	0.529	0.057	1.83	4.58	0.842	0.036
2.09	4.72	0.564	0.056	1.96	4.84	0.902	0.036
0.33×0.33	1.32	0.109	0.090	2.09	5.10	0.961	0.036
0.40	1.44	0.132	0.079				
0.46	1.58	0.152	0.075				

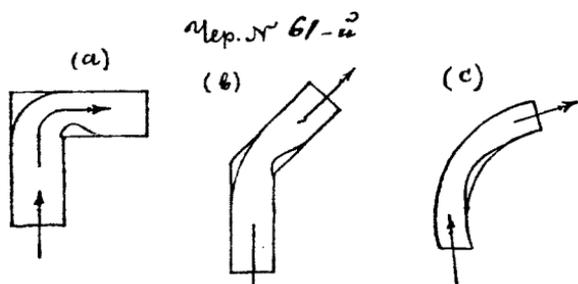
Значения величин  $\frac{\rho u}{f}$  для прямоугольных поперечных сечений

Размѣръ м×м	Периметръ и м	Поперечное сѣчение qm	$\frac{\rho u}{f}$	Размѣръ м×м	Периметръ и м	Поперечное сѣчение qm	$\frac{\rho u}{f}$
0.53×0.53	2.12	0.281	0.051	0.92×1.83	5.50	1.84	0.022
0.66	2.38	0.350	0.047	1.96	5.36	1.803	0.021
0.79	2.64	0.419	0.043	2.09	6.02	1.923	0.021
0.92	2.90	0.488	0.040				
1.05	3.16	0.557	0.039				
1.18	3.42	0.625	0.037				
1.31	3.68	0.694	0.035	1.05×1.05	4.20	1.103	0.026
1.44	3.94	0.763	0.035	1.18	4.46	1.239	0.024
1.57	4.20	0.832	0.034	1.31	4.72	1.376	0.023
1.70	4.46	0.901	0.033	1.44	4.98	1.512	0.022
1.83	4.72	0.970	0.033	1.57	5.24	1.649	0.021
1.96	4.98	1.039	0.032	1.70	5.50	1.785	0.021
2.09	5.24	1.108	0.032	1.83	5.76	1.922	0.020
				1.96	6.02	2.058	0.020
				2.09	6.28	2.195	0.019
0.66×0.66	2.64	0.460	0.041				
0.79	2.90	0.521	0.037				
0.92	3.16	0.607	0.035	1.18×1.18	4.72	1.392	0.023
1.05	3.42	0.693	0.033	1.31	4.98	1.546	0.022
1.18	3.68	0.779	0.032	1.44	5.24	1.699	0.021
1.31	3.94	0.865	0.031	1.57	5.50	1.853	0.020
1.44	4.20	0.950	0.030	1.70	5.76	2.006	0.019
1.57	4.46	1.036	0.029	1.83	6.02	2.159	0.019
1.70	4.72	1.122	0.028	1.96	6.28	2.313	0.018
1.83	4.98	1.208	0.028	2.09	6.54	2.466	0.018
1.96	5.24	1.294	0.027				
2.09	5.50	1.379	0.027				
				1.31×1.31	5.24	1.716	0.020
				1.44	5.50	1.886	0.020
				1.57	5.76	2.057	0.019
0.79×0.79	2.16	0.624	0.033	1.70	6.02	2.227	0.018
0.92	3.42	0.727	0.032	1.83	6.28	2.397	0.018
1.05	3.68	0.830	0.030	1.96	6.54	2.568	0.017
1.18	3.94	0.932	0.028	2.09	6.80	2.738	0.016
1.31	4.20	1.035	0.027				
1.44	4.46	1.138	0.026				
1.57	4.72	1.240	0.025				
1.70	4.98	1.343	0.025	1.44×1.44	5.76	2.074	0.019
1.83	5.24	1.446	0.024	1.57	6.02	2.261	0.018
1.96	5.50	1.548	0.024	1.70	6.28	2.448	0.017
2.09	5.76	1.651	0.023	1.83	6.54	2.635	0.016
				1.96	6.80	2.822	0.016
				2.09	7.06	3.010	0.015
0.92×0.92	3.68	0.846	0.029				
1.05	3.94	0.966	0.027				
1.18	4.20	1.086	0.026	1.57×1.57	6.28	2.465	0.017
1.31	4.46	1.205	0.025	1.70	6.54	2.669	0.016
1.44	4.72	1.325	0.024	1.83	6.80	2.873	0.016
1.57	4.98	1.444	0.023	1.96	7.06	3.077	0.015
1.70	5.24	1.564	0.022	2.09	7.32	3.281	0.015

б) Второй родъ сопротивленій движенію газовъ въ каналахъ представляютъ, во-первыхъ, повороты оси канала въ горизонтальной и вертикальной плоскостяхъ, во-вторыхъ рѣзкія измѣненія площади или формы поперечнаго сѣченія при переходахъ отъ большаго къ меньшему и наоборотъ, въ третьихъ, постороннія тѣла, находящіяся на пути потока внутри канала; сопротивления возникаютъ также при вытеканіи струи изъ канала въ безгранично обширное пространство (сравнительно съ сѣченіемъ выходнаго отверстия) и во многихъ другихъ случаяхъ.

а) Повороты.

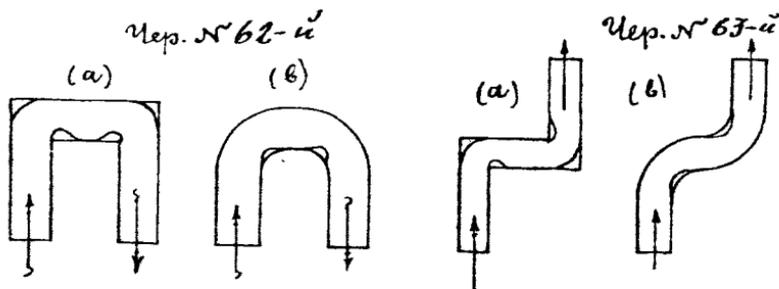
Возникновеніе подобнаго рода *мѣстныхъ сопротивленій*, требующихъ затраты нѣкоторой части располагаемаго напора при поворотахъ объясняется влияніемъ центробѣжной силы, отклоняющей струю отъ внутренней стѣнки и тѣмъ вызывающей ея мѣстное сжатіе въ томъ именно мѣстѣ, гдѣ должно измѣниться направленіе оси потока. (Черт. № 61-й а, б, с).



Величина сжатія тѣмъ больше, чѣмъ меньше уголъ поворота. При плавномъ изгибѣ сжатіе уменьшается.

Опыты, произведенные надъ нѣсколькими послѣдовательными поворотами показали, что потеря напора при двухъ послѣдовательныхъ поворотахъ (черт. № 62-й) зависитъ отъ измѣненія окончательнаго на-

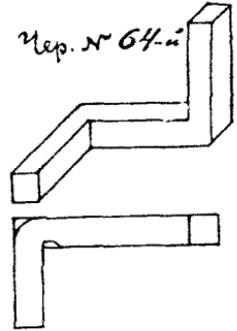
правления струи. Если два такіе поворота соединены короткимъ прямолинейнымъ участкомъ (черт. № 63), то струя, сжатая при первомъ поворотѣ, не успѣваетъ расшириться и при второмъ поворотѣ сохраняетъ свое сжатое раннее сѣченіе безъ измѣненія, почему при двухъ подобныхъ поворотахъ потеря бываетъ не болѣе, чѣмъ при одномъ.



При двухъ поворотахъ въ одной плоскости съ восстановленіемъ первоначальнаго направленія теченія (черт. № 63 а, б) потеря напора почти въ 2 раза больше, чѣмъ при одномъ.

Въ случаѣ двухъ поворотовъ въ плоскостяхъ перпендикулярныхъ другъ другу (черт. № 64-й) потеря напора приблизительно въ  $1\frac{1}{2}$  раза превышаетъ потерю при одномъ поворотѣ.

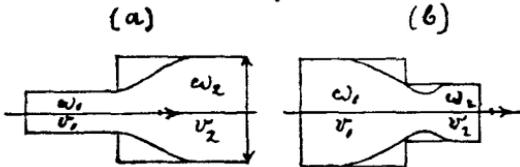
Общее, выведенное изъ опытовъ—правило для уменьшенія вліянія поворотовъ на величину потери напора, состоитъ въ томъ, чтобы избѣгать рѣзкихъ измѣненій направленія, скругляя углы по дугамъ возможно большаго радіуса или замѣнять прямые углы тупыми.



### 3) Измѣненія поперечныхъ сѣченій каналовъ.

При всякомъ внезапномъ измѣненіи площади поперечнаго сѣченія (черт. № 65-й а, б), на примѣръ, при переходѣ отъ меньшаго сѣченія  $\omega_1$  къ большому  $\omega_2$  или обратно, отъ большаго къ меньшему начальная скорость  $v_1$  должна измѣниться и перейти въ скорость  $v_2$ ; въ этомъ случаѣ проявляется ударъ отъ столкновенія массъ различныхъ скоростей и происходитъ потеря напора. Для возможнаго уменьшенія вреднаго вліянія рѣзкихъ измѣненій поперечныхъ сѣченій слѣдуетъ дѣлать переходы плавными.

Чер. № 65-й



Величины коэффициентовъ мѣстныхъ сопротивленій могутъ быть вычисляемы въ каждомъ частномъ случаѣ, съ помощью общихъ формулъ механики, выводъ которыхъ мы здѣсь и предлагаемъ.

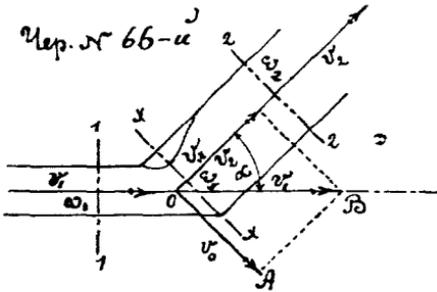
### 7) Теорія мѣстныхъ сопротивленій.

При всякихъ измѣненіяхъ направленія потока жидкости, пара или газа движущагося по трубѣ, при измѣненіяхъ площадей поперечныхъ сѣченій трубъ, т. е. при переходахъ потока изъ трубы большаго діаметра въ трубу меньшаго или наоборотъ, неизмѣнно проявляется нѣкоторая потеря энергіи заключающейся въ движущемся потокѣ.

При измѣненіяхъ только одного направленія проявляется центробѣжная сила, деформирующая жидкую струю и часть энергіи затрачивается на работу деформированія; въ случаяхъ измѣненія сѣченій участковъ трубъ происходятъ удары, на которые также затрачивается часть энергіи.

Въ томъ случаѣ когда измѣненіе направленія сопровождается и измѣненіемъ сѣченія въ одной и той же точкѣ оси трубы, вліянія каждой изъ этихъ причинъ независимы другъ отъ друга и потеря энергіи равна суммѣ отдѣльныхъ потерь.

Разсмотримъ общій случай, изъ котораго затѣмъ выведемъ и всѣ встрѣчающіеся въ практикѣ частные случаи.



Положимъ жидкость движется по трубѣ поперечное сѣченіе которой  $\omega_1$  въ  $\text{mtr}^2$ ; при переходѣ къ трубѣ большаго сѣченія  $\omega_2$ , направление трубы измѣняется, такъ что оси обоихъ участковъ составляютъ уголъ  $\alpha$ . (Черт. № 66-й). Площадь поперечнаго сѣченія струи въ сѣченіи  $(x-x)$ , въ которомъ подвліяніемъ центробѣжной силы струи

отклоняются къ наружной сторонѣ, отставая отъ стѣнки съ внутренней стороны, обозначимъ черезъ  $\omega_x$ .

Обозначимъ еще черезъ  $v_1$ ,  $v_x$  и  $v_2$  въ  $\text{mtr./sec.}$  скорости движенія въ сѣченіяхъ  $(1-1)$ ,  $(x-x)$  и  $(2-2)$ .

Въ случаѣ установившагося движенія, имѣемъ зависимость  $\omega_1 v_1 =$

$$= \omega_x v_x = \omega_2 v_2 \dots \dots \dots (1)$$

Обозначимъ черезъ  $p_1$ ,  $p_x$  и  $p_2$  въ  $\text{kg./mtr.}^2$  давленія, испытываемыя со стороны жидкости, мысленно проведенными сѣченіями  $(1-1)$   $(x-x)$  и  $(2-2)$  а черезъ  $\Delta$  въсь 1  $\text{mtr.}^2$  жидкости, тогда:

$$\frac{p_1}{\Delta}; \frac{p_x}{\Delta} \text{ и } \frac{p_2}{\Delta}$$

представляютъ собою высоты давленій въ этихъ сѣченіяхъ, ими измѣряются запасы потенциальной энергіи. Обозначимъ эти высоты черезъ  $a_1$ ,  $a_x$  и  $a_2$ , т. е. положимъ:

$$\frac{p_1}{\Delta} = a_1; \frac{p_x}{\Delta} = a_x \text{ и } \frac{p_2}{\Delta} = a_2; \dots \dots \dots (2)$$

Высоты скоростей, измѣряющія кинетическую энергію въ этихъ же сѣченіяхъ, будутъ равны:

$$\frac{v_1^2}{2g}; \frac{v_x v_x^2}{2g} \text{ и } \frac{v_2^2}{2g} \dots \dots \dots (3)$$

По закону сохраненія энергіи, при установившемся движениі (теченіи) въ каждомъ сѣченіи потока сумма потенциальной и кинетической энергіи величина постоянная, слѣдовательно постоянна и сумма соответствующихъ высотъ.

На этомъ основаніи можемъ составить выраженіе:

$$a_1 + \frac{v_1^2}{2g} = a_x + \frac{v_x^2}{2g} \dots \dots \dots (4)$$

Такъ какъ при переходѣ отъ сѣченія (1—1) къ сѣченію (x—x) нѣтъ потери энергіи.

При переходѣ же отъ сѣченія (x—x) къ сѣченію (2—2) благодаря внезапному измѣненію скорости является уже потеря части энергіи движенія, слѣдовательно и потеря части высоты скорости.

Обозначимъ ее черезъ h.

При этомъ условіи для перехода отъ сѣченія (x—x) къ сѣченію (2—2) получаемъ выраженіе:

$$a_x + \frac{v_x^2}{2g} - h = a_2 + \frac{v_2^2}{2g} \dots \dots \dots (5)$$

Для установленія зависимости между потерянною высотой h и остальными элементами задачи разложимъ скорость  $v_1$  по направленію новой оси трубы и по нормали къ нему.

Составляющая, параллельная новой оси есть новая скорость  $v_2$ , нормальная же  $v_0$  представляетъ потерянную скорость, уничтоженную сопротивленіемъ стѣнки трубы. Соответствующая этой потерянной скорости потерянная высота ея измѣряющая потерю энергіи движенія равна  $\frac{v_0^2}{2g}$ ; слѣдовательно;

$$h = \frac{v_0^2}{2g}; v_0^2 = 2gh \dots \dots \dots (6)$$

Изъ треугольника OAB имѣемъ для квадрата стороны, лежащей противъ острого угла:

$$v_0^2 = v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 \cos \alpha \dots \dots \dots (7)$$

или:

$$2gh = v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 \cos \alpha \dots \dots \dots (8)$$

тригонометрія даетъ зависимость:

$$\frac{1 - \cos \alpha}{2} = \sin^2 \frac{\alpha}{2} \text{ или } \cos \alpha = 1 - 2\sin^2 \frac{\alpha}{2} \dots \dots \dots (9)$$

Воспользуемся ею въ цѣляхъ преобразованія ур-нія (8) тогда:

$$2gh = v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 + 4v_1v_2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \dots \dots \dots (10)$$

откуда:

$$h = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} + \frac{4v_1v_2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{2g} \dots \dots \dots (11)$$

Первый членъ второй части ур-нія (11) представляетъ выраженіе потери энергіи при измѣненіи скорости  $v_1$  въ  $v_2$ , а второй—вліяніе отклоненія оси трубы отъ первоначальнаго.

Положимъ, что потерянная высота  $h$  выражена черезъ скорость  $v_2$  съ помощью нѣкотораго коэффициента  $\gamma$  меньшаго ед-цы, т. е:

$$h = \gamma \frac{v_2^2}{2g} \dots \dots \dots (12)$$

При переходѣ отъ сѣченія  $(x-x)$  къ сѣченію  $(2-2)$  теряется скорость  $(v_x - v_2)$ ; высота этой потерянной скорости

$$h = \frac{(v_x - v_2)^2}{2g} \dots \dots \dots (13)$$

изъ  $\omega_x v_x = \omega_2 v_2$  имѣемъ

$$v_x = \frac{\omega_2}{\omega_x} v_2$$

поэтому:

$$h = \frac{(v_x - v_2)^2}{2g} = \frac{\left(\frac{\omega_2}{\omega_x} v_2 - v_2\right)^2}{2g} = \frac{v_2^2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_x} - 1\right)^2}{2g} \dots \dots (14)$$

сравнивая съ ур-ніемъ (12) имѣемъ

$$\gamma = \left(\frac{\omega_2}{\omega_x} - 1\right)^2; \dots \dots \dots (15)$$

мы имѣемъ еще зависимость: положивъ  $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \lambda$ ,  $\omega_1 v_1 = \omega_2 v_2$ ;

откуда  $v_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1} v_2$  найдемъ:  $v_1 = \lambda v_2$ ;

подставляя въ ур-ніе (11) и (12) имѣемъ:

$$h = \gamma \frac{v_2^2}{2g} = \frac{\left(\frac{\omega_2}{\omega_1} v_2 - v_2\right)^2}{2g} + \frac{4 \frac{\omega_2}{\omega_1} v_2^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{2g} \dots \dots (16)$$

или:

$$h = \gamma \frac{v_2^2}{2} = \frac{v_2^2}{2g} \left( (\lambda - 1)^2 + 4\lambda \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right) \dots \dots (17)$$

гдѣ коэффициентъ сопротивленія:

$$\gamma = (\lambda - 1)^2 + 4\lambda \sin^2 \frac{\alpha}{2} \dots \dots \dots (18)$$

первый членъ  $(\lambda - 1)^2 = \gamma_1$  характеризуетъ переходъ отъ  $\omega_1$  къ большому сѣченію  $\omega_2$ ; второй:  $4\lambda \sin^2 \frac{\alpha}{2} = \gamma_2$  — отклоненіе оси на уголъ  $\alpha$ .

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \dots \dots \dots (19)$$

Въ случаѣ заданія  $\lambda$  и  $\alpha$  по ур-нію (18) вычисляемъ  $\gamma$  и затѣмъ уже по ур-нію (15)  $\omega_x$ , а изъ ур-нія:  $\omega_x v_x = \omega_2 v_2$  также и скорость  $v_x$ .

$$\text{Сжатіе струи при извѣстныхъ } \omega_x \text{ и } \omega_2 \text{ равно } \mu = \frac{\omega_x}{\omega_2} \dots (20)$$

гдѣ  $\mu$  коэффициентъ сжатія.

Найдемъ выраженія для  $\gamma$  въ частныхъ случаяхъ.

**А) Вліяніє змінення угловъ отклоненія  $\alpha$ .**

положивъ  $\omega_1 = \omega_2$  найдемъ:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \lambda = 1.$$

Изъ ур-нія (18)

$$\gamma = (\lambda - 1)^2 + 4\lambda \sin^2 \frac{\alpha}{2} = 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2};$$

$$\gamma = 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \dots \dots \dots (21)$$

давая углу  $\alpha$  различные значенія отъ  $\alpha = 0$  до  $\alpha = 180^\circ$  будемъ находить значенія  $\gamma$ .

Такъ для:  $\alpha = 30^\circ \quad \gamma = 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2} = 4 \times (0,259)^2 = 0,268$

$\alpha = 45^\circ \quad = 4 \times (0,383)^2 = 0,588$

$\alpha = 60^\circ \quad = 4 \times (0,500)^2 = 1,000$

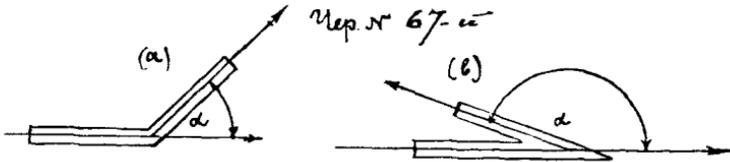
$\alpha = 90^\circ \quad = 4 \times (0,707)^2 = 2,000$

$\alpha = 112^\circ \quad = 4 \times (0,831)^2 = 2,764$

$\alpha = 135^\circ \quad = 4 \times (0,924)^2 = 3,416$

$\alpha = 180^\circ \quad = 4 \times (1,000)^2 = 4,000$

Само собою понятно, что углы измѣряются между направленіями первоначальнаго и измѣненнаго течения, на примѣръ: (Черт. № 67 а, б)



**В) Вліяніє змінення стѣний.**

а) Положивъ  $\alpha = 0$  имѣемъ  $4 \sin^2 \frac{\alpha}{2} = 0$ .

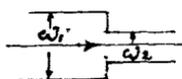
и  $\gamma = (\lambda - 1)^2$

въ случаѣ: че т. № 68-й.)

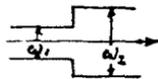
$\omega_1 > \omega_2$

$\frac{\omega_2}{\omega_1} < 1$  и  $\lambda < 1$ ; обозначимъ  $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{\varphi} = \lambda$  гдѣ

Чер. № 68-а



Чер. № 69-а



$\varphi$  положительное число больше ед-цы:

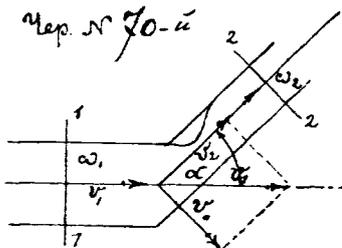
тогда:  $\gamma = (\lambda - 1)^2 = \left\{ \frac{1}{\varphi} - 1 \right\}^2; \dots \dots \dots (22)$

Въ случаѣ (черт. № 69-й.)

б) При  $\omega_1 > \omega_2$   $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \lambda < 1$ ,  
 поэтому  $\gamma = (\lambda - 1)^2$ ; . . . . . (23)

в) Случай измѣненія направленія при переходѣ изъ болѣе широкой трубы въ болѣе узкую.

Черт. № 70-й.



Въ этомъ случаѣ  $\frac{\omega_1 > \omega_2}{v_1 < v_2}$ ,  $\lambda < 1$ .  
 $\gamma = (\lambda - 1)^2 + 4\lambda \text{Sin}^2 \frac{\alpha}{2}$  . . . . . (24)

если положить  $\lambda = \frac{1}{\varphi}$ , то ур-нiе (24) пре-  
 вращается въ

$$\gamma = \left\{ \frac{1}{\varphi} - 1 \right\}^2 + 4 \cdot \frac{1}{\varphi} \text{Sin}^2 \frac{\alpha}{2} . . . . . (25)$$

или:

$$\gamma = \left\{ \frac{1 - \varphi}{\varphi} \right\}^2 + 4 \cdot \frac{1}{\varphi} \text{Sin}^2 \frac{\alpha}{2} . . . . . (26)$$

Если  $\lambda = \frac{\omega_2}{\omega_1}$  очень мало, т.-е. если  $\omega_1$  очень велико сравнительно съ  $\omega_2$ , то  $\frac{1}{\varphi} = \lambda$  также очень мало, слѣдовательно, велико число  $\varphi$ , поэтому очень мало  $\left\{ \frac{1 - \varphi}{\varphi} \right\}$  и первымъ членомъ въ ур-нiи (28) можно пренебречь.

Тогда

$$\gamma = 4 \frac{1}{\varphi} \text{Sin}^2 \frac{\alpha}{2} . . . . . (27)$$

Положимъ отъ трубы  $D = 0,143$  mtr, (6") требуется взять от-  
 ростокъ диаметра  $d = 0,0265$  mtr. (1") подъ угломъ  $\alpha = 60^\circ$ .

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= 160,6 \text{ см.}^2 \\ \omega_2 &= 5,510 \text{ см.}^2 \end{aligned} \right\} \lambda = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{5,510}{160,600} = 0,0343;$$

$$\gamma = (0,0343 - 1,000)^2 + 4 \times 0,0343 \times \text{Sin}^2 \frac{60^\circ}{2};$$

или

$$\gamma = (-0,9657)^2 + 0,0343 \times 4 \times 0,250 = 0,94 + 0,0343 = 0,9743.$$

Величины коэффициентовъ мѣстныхъ сопротивленій  $\gamma$ , по опытамъ, произведеннымъ проф. Ритчелемъ надъ кирпичными каналами, выражаются цифрами нижеслѣдующей таблицы.

Таблица № 49-й.

коэффициентов мѣстныхъ сопротивленій  $\gamma$ .

Родъ мѣстнаго сопротивленія.	Значеніе коэффициента $\gamma$ .	
I) Измѣненіе направленія оси канала (безъ измѣненія площади поперечнаго сѣченія).		
1) При остромъ поворотѣ подъ угломъ $90^\circ$ . . . . .	1,50	
2) При скругленномъ поворотѣ подъ угломъ $90^\circ$ . . . . .	1,00	
3) При поворотѣ подъ тупымъ угломъ въ $135^\circ$ . . . . .	0,60	
4) При плавномъ измѣненіи направленія . . . . .	0,00	
II) Измѣненіе поперечнаго сѣченія канала (безъ измѣненія направленія теченія).		
1) При переходѣ отъ меньшаго сѣченія $\omega_1$ къ большому $\omega_2$ , сопротивленіе по отношенію къ скорости $\omega_2$ . . . . .	$\left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2$	
2) При переходѣ отъ большаго сѣченія $\omega_1$ къ меньшему $\omega_2$ въ зависимости отъ отношенія $\omega_2$ къ $\omega_1$ :		
для отношеній $\frac{\omega_2}{\omega_1} =$	= 0,10 . . . . .	0,50
	= 0,20 . . . . .	0,42
	= 0,40 . . . . .	0,33
	= 0,60 . . . . .	0,25
	= 0,80 . . . . .	0,15
= 1,00 . . . . .	0,00	
III) При прохожденіи черезъ регулируюція приспособленія.		
1) Для открытаго клапана влія задвижки . . . . .	0,00	
2) Для рѣшетки, свободная площадь которой равна поперечному сѣченію канала:		
а) Въ случаѣ, когда отношеніе свободной площади рѣшетки къ полной ея площади равно 0,5 . . . . .	1,50	
б) Если это отношеніе составляетъ 0,2 . . . . .	2,00	
3) Для рѣшетки, свободная площадь которой въ $1\frac{1}{2}$ раза больше сѣченія канала:		
а) Если отношеніе свободной площади рѣшетки къ полной составляетъ 0,5 . . . . .	0,75	
б) Если это отношеніе равно 0,2 . . . . .	1,00	
4) Для проволоочной рѣшетки, свободная площадь которой равна поперечному сѣченію канала, а отношеніе свободной площади къ полной не менѣе 0,60 . . . . .	0,60	
5) Для проволоочной рѣшетки, свободная площадь которой въ $1\frac{1}{2}$ раза больше сѣченія канала, а отношеніе свободной площади къ полной не менѣе 0,6 . . . . .	0,30	
6) Для рѣшетокъ съ крупными отверстиями . . . . .	0,00	

Сумма мѣстныхъ сопротивленій въ данномъ участкѣ канала можетъ быть обозначена черезъ  $\Sigma \gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n$

Если длина участка  $l$ , его периметръ  $u$ , площадь сѣченія  $\omega$  и коэффициентъ тренія  $\rho$ , то какъ выше было указано, сопротивление отъ тренія на длинѣ

$$R = \rho \cdot \frac{u}{\omega} l;$$

Суммируя всѣ сопротивленія въ данномъ участкѣ, найдемъ полный коэффициентъ сопротивленій, обозначаемый черезъ  $Z$  и равный:

$$Z = R + \Sigma \gamma;$$

Эта послѣдняя величина вводится въ ур-нія для практически достижимой скорости.

# Оглавление I-го отдѣла.

## Г Л А В А I-я.

- Законы распространения теплоты** . . . . .
- I. Три способа распространения теплоты: 1) Теплопроводность. 2) Переносъ теплоты или конвекція. 3) Лучеиспускание.
  - II. Теплопроводность: 1) Основаніе теоріи Фурье. 2) Выводъ закона теплопроводности.
  - III. Передача теплоты соприкосновеніемъ (конвекція): 1) Формула Ньютона. 2) Формула Дюлонга и Пти. 3) Формула Пекле.
  - IV. Передача теплоты лучеиспусканиемъ: 1) Сущность лучистой энергіи. 2) Формула Ньютона. 3) Формула Дюлонга и Пти. 4) Формула Пекле.
  - V. Общій случай передачи теплоты соприкосновеніемъ и лучеиспусканиемъ: 1) Основные формулы. 2) Преобразование основныхъ формулъ теплопередачи соприкосновеніемъ и лучеиспусканиемъ. 3) Численные примѣры на опредѣленіе потери теплоты черезъ вѣтшее охлажденіе.
  - VI. Выраженіе для количества проведенной теплоты  $N$  въ случаѣ вѣсколькихъ разнородныхъ слоевъ.

Стр.  
1—99

## Г Л А В А II-я.

- Всеобщій коэффициентъ теплопередачи  $K$  и формы его выраженія въ частныхъ случаяхъ** . . . . .
- I. Выводъ формулъ для всеобщаго коэффициентъ теплопередачи  $K$ .
  - II. Случай воздушнаго прослойка въ сложной вертикальной стѣнкѣ.
  - III. Случай воздушнаго прослойка въ системѣ горизонтальныхъ соприкасающихся слоевъ: а) передача теплоты снизу вверхъ; б) передача теплоты сверху внизъ.
  - IV. Выраженіе всеобщаго коэффициентъ теплопередачи  $K$  для вертикальныхъ оконныхъ рамъ и горизонтальныхъ свѣтовыхъ покрытій: 1) Рамы съ одиночнымъ застекленіемъ. 2) Случай двойныхъ (лѣтняго и зимняго) оконныхъ переплетовъ. 3) Случай одиночной рамы съ двойнымъ застекленіемъ. 4) Горизонтальное двойное застекленіе (свѣтовой фонарь). 5) Свѣтовые покрытія съ шахтами. 6) Окна и свѣтовые покрытія съ тройнымъ застекленіемъ.
  - V. Всеобщій коэффициентъ теплопередачи  $K$  для потолочныхъ конструкцій.
  - VI. Передача теплоты полами.
  - VII. Всеобщій коэффициентъ теплопередачи черезъ вертикальныя стѣны: 1) Предѣльная толщина воздушнаго прослойка. 2) Заполненіе прослойка дурными проводниками теплоты.

29—72

## Г Л А В А III-я.

- Элементарная теорія поверхности нагрѣва** . . . . .
- 1) Понятіе о поверхности нагрѣва. 2) Виды нагрѣвательныхъ поверхностей. 3) Особенности условій передачи теплоты черезъ нагрѣвательныя поверхности. 4) Выраженіе для поверхности нагрѣва  $S_1$  въ случаѣ параллельныхъ токовъ. 5) Выраженіе для поверхности нагрѣва  $S_2$  въ случаѣ противотоковъ. 6) Выраженіе для поверхности нагрѣва въ случаѣ неподвижности среды, отдающей теплоту. 6<sup>1</sup>) Выраженіе для поверхности  $S_1$  съ неподвижной средой, воспринимающей теплоту. 7) Способъ приближеннаго вычисленія всеобщаго коэффициентъ теплопередачи  $K$  ср. въ случаѣ переменныхъ т-ръ средь, обмѣнивающихся теплотою и при незначительныхъ разностяхъ т-ръ по обѣ стороны раздѣлительной стѣнки. Численный примѣръ № 1.

73—92

**Процессъ горѣнія** . . . . . 92—111

- 1) Экзотермическіе и эндотермическіе процессы въ химіи. 2) Горѣніе, какъ экзотермическій процессъ. 3) Соединеніе тѣлъ съ кислородомъ есть частный случай въ ряду экзотермическихъ процессовъ. 4) Схематическое представленіе процесса горѣнія. 5) Явленія, сопровождающія процессъ горѣнія въ случаяхъ практическаго сжиганія горючихъ веществъ. 6) Неполное горѣніе. 7) Температура воспламененія. 8) Пламя. 9) Температура горѣнія. 10) Выраженіе для т-ры горѣнія и условія достиженія Т шах. 11) Причины, препятствующія росту т-ры горѣнія. Численный примѣръ. 12) Т-ра печного пространства.

## Г Л А В А V.

**Дымовые газы** . . . . . 111—130

- 1) Необходимый для полнаго сгоранія топлива теоретическій объемъ воздуха. 2) Численные примѣры опредѣленія теоретическаго расхода воздуха (В необх.) и L необх.). 3) Количество газообразныхъ продуктовъ горѣнія, получаемое при сжиганія 1 klg. топлива. Потеря теплоты дымовыми газами. Зависимость потери теплоты дымовыми газами отъ избытка воздуха. 4) Способы опредѣленія избытка воздуха. А) Способъ прямого измѣренія; В) Химическій способъ опредѣленія избытка воздуха, основанный на составѣ дымовыхъ газовъ. Численный примѣръ № 1-й; численный примѣръ № 2-й; примѣръ № 3-й.

## Г Л А В А VI.

**О топливѣ** . . . . . 130—156

- 1) Опредѣленіе понятія о топливѣ вообще. 2) Коммерческія и техническія условія, которымъ должно удовлетворять промышленное топливо. А) Коммерческія условія; В) Техническія условія. 3) Классификація видовъ топлива.

*Твердое топливо.* Химическій составъ естественнаго твердаго горючаго. Теорія органическаго происхожденія ископаемыхъ видовъ твердаго горючаго.

*Древесное топливо.* Средній химическій составъ дерева. Содержаніе и химическій составъ золы. Содержаніе влаги въ деревѣ. Технические свойства древеснаго топлива. Плотность древеснаго топлива. Вѣсъ объемной ед-цы дровъ.

*Торфъ.* Составъ торфа. Содержаніе золы въ торфѣ. Содержаніе въ торфѣ влаги.

*Каменные угли.* А) Бурые угли. В) Собственно каменные угли. Особенности главнѣйшихъ видовъ собственно каменныхъ углей. Жирные или спекающіеся каменные угли. Полуантрацитовые угли и антрациты. Антрацянъ. Примѣнимость каменныхъ углей для цѣлей отопленія.

*Жидкое топливо.*

## Г Л А В А VII-я.

**Теплопроизводительная способность горючихъ матеріаловъ** . . . . . 156—177

- 1) Понятіе о теплопроизводительной способности. Практическая полезная теплопроизводительная способность  $K_p$ . 2) Методы опредѣленія теплопроизводительной способности горючихъ веществъ. Технические калориметры. Калориметръ Парра. Теорія калориметра Парра. Численный примѣръ опредѣленія теплопроизводительной способности пробы угля калориметромъ Парра. Опредѣленіе водяного эквивалента по способу смѣшенія (Бертело). Опредѣленіе теплопроизводительной способности горючаго по даннымъ химическаго анализа. А) Формула Дюлонга. В) Формула Менделѣева. Вычисленіе полезной теплопроизводительной способности. Опредѣленіе теплопроизводительной способности по способу Бертье. Вычисленіе полезной теплопроизводительной способности. Формула Дюлонга; формула О-ва германскихъ инженеровъ; формула Менделѣева.

Основания элементарной теории движения воздуха и газов в трубах и каналах . 178—208

- 1) Выражение теоретического напора. 2) Различные формы выражения теоретического напора или избыточного давления. 3) Высота теоретического напора. 4) Теоретическая скорость истечения  $v_1$ . 5) Сопротивления и формы их выражения. 6) *Ур-ние практически достижимой скорости*. 1) Первый случай, 2) второй случай, 3) третий случай, 4) четвертый случай, 5) пятый случай, 6) шестой случай, 7) седьмой случай, 8) восьмой случай, 9) девятый случай, 10) общий случай системы каналов, 11) плоскость разграничения систем каналов, 12) общий вид ур-ний движения, 13) о коэффициентах сопротивлений;  $\alpha$ ) повороты,  $\beta$ ) изменения поперечных сечений каналов.
- 7) Теория местных сопротивлений. А) Влияние изменения углов отклонения  $\alpha$ . В) Влияние изменений сечений.

## Оглавление таблиц 1 отдела.

Таблица № 1. Коэффициентов $\lambda$ внутренней теплопроводности некоторых тел.	8
Таблица № 2. Коэффициентов $\kappa_1$ (вкладной лист).	
Таблица № 3. Коэффициентов $\kappa_1$ для вертикальных плоскостей . . . . .	12
Таблица № 4. Коэффициентов $\kappa_1$ для горизонтальных цилиндров . . . . .	13
Таблица № 5. Коэффициентов $\alpha_1$ . . . . .	14
Таблица № 6. Основных коэффициентов передачи тепла. . . . .	16
Таблица № 7. Коэффициентов $\kappa_1$ лучеиспускательной способности . . . . .	19
Таблица № 8. Коэффициентов $\alpha_2$ в формулѣ Дюлонга . . . . .	20
Таблица № 9. (Дополнительная) коэффициентов $\beta$ . . . . .	21
Таблица № 10. Коэффициентов $\alpha$ . . . . .	44
Таблица № 12. Всеобщих коэффициентов теплопередач для оконъ . . . . .	
Таблица № 13. Всеобщих коэффициентов для входных дверей . . . . .	50
Таблица № 14. Всеобщих коэффициентов для дверей . . . . .	51
Таблица № 15. Всеобщих коэффициентов теплопередачи для половъ, потолковъ и крышъ. . . . .	58
Таблица № 16. Значение $T_1 - t = t - t_0$ для кирпичныхъ стѣнъ. . . . .	66
Таблица № 17. Значение всеобщихъ коэффициентов для стѣнъ зданій. . . . .	69
Таблица № 18. Температуръ воспламененія $T - \text{min}$ . . . . .	99
Таблица № 19. Удельной теплоты некоторыхъ газовъ. . . . .	108
Таблица № 20 . . . . .	109
Таблица № 21. Теоретической жаропроизводительности $T$ max при $p=1$ —цѣ . . . . .	110
Таблица № 22. Практически измеренныхъ высокихъ $t$ -ръ. . . . .	111
Таблица № 23. Классификація различныхъ видовъ топлива . . . . .	133
Таблица № 24. Химического состава твердыхъ видовъ топлива. . . . .	134
Таблица № 25. Составъ частей одной и той же древесной породы . . . . .	135
Таблица № 26. Сравнительнаго содержания органоеновъ въ древесныхъ породахъ. . . . .	136
Таблица № 27. (Сравнительная). Содержанія органоеновъ въ 100 частяхъ высушенной древесины. . . . .	136
Таблица № 28. . . . .	139
Таблица № 29. Henneberg'a . . . . .	140
Таблица № 30. Содержанія влаги въ древесныхъ породахъ. . . . .	141
Таблица № 31. Вѣса 1 куб. саж. дровъ . . . . .	144
Таблица № 32. Состава органической массы торфа . . . . .	145
Таблица № 33. Содержанія влаги въ $\%$ по вѣсу . . . . .	146
Таблица № 34. Содержанія влаги и золы въ торфѣ . . . . .	147

	<i>стр.</i>
Таблица № 35. . . . .	148
Таблица № 36. . . . .	149
Таблица № 37. Классификація каменныхъ углей по Грунеру . . . . .	150
Таблица № 38. Состава органической массы горючихъ веществъ . . . . .	150
Таблица № 39. Средняго состава углей по Менделѣеву. . . . .	151
Таблица № 40. Состава углей. . . . .	152
Таблица № 41. Состава настоящихъ коксовыхъ углей. . . . .	152
Таблица № 42. Состава антрацитовыхъ углей. . . . .	153
Таблица № 43. Состава антрацита изъ Грушевки. . . . .	154
Таблица № 44. Состава жидзкаго топлива . . . . .	155
Таблица № 45. . . . .	166
Таблица № 46. Состава топлива на 1 klg вѣса . . . . .	170
Таблица № 47. Коэффициентовъ тренія ( $\rho$ ) воздуха въ кирпичныхъ каналахъ. . . . .	196
Таблица № 48. Значенія величинъ тренія R въ кирпичныхъ каналахъ . . . . .	197
Таблица № 49. Коэффициентовъ мѣстныхъ сопротивленій. . . . .	207

