

5. Утилизація тепла въ заводскихъ печахъ и процессахъ.

Б. Н. Померанцева

(Доложено 20 сентября 1° г.).

Печью называется устройство, которое способно превращать извѣстный видъ энергіи въ тепловую энергію для использованія послѣдней въ опредѣленномъ термическомъ процессѣ.

Печи имѣютъ своей цѣлью какъ поднятіе температуры помѣщеній, въ которыхъ онѣ находятся или сосудовъ, которые онѣ обогрѣваютъ, такъ и поднятіе температуры рудъ и заводскихъ продуктовъ для измѣненія ихъ аггрегатнаго состоянія или для подготовки ихъ къ опредѣленной реакціи.

Мы лишь немного остановимся на печахъ первой группы, къ которой относятся печи, обогрѣвающія помѣщенія, муфельныя печи и топки паровыхъ котловъ и займемся изслѣдованіемъ главнымъ образомъ печей второй группы-собственно заводскихъ печей.

Заводскія печи получаютъ тепловую энергію преимущественно изъ химической энергіи горѣнія горючаго. Въ послѣднее время получаютъ также распространеніе такъ называемыя электрическія печи, въ которыхъ тепловая энергія получается изъ электрической. Задача печи, какъ теплового прибора, заключается въ томъ, чтобы передать все тепло сожигаемаго въ печи горючаго веществамъ, совершающагося въ печи заводскаго процесса.

Для этого печь должна удовлетворять условіямъ, которыя распадаются на двѣ главныя группы: а) условія, которымъ печь должна удовлетворять, какъ тепловой приборъ, сожигающій горючее и б) условія, которыя вытекаютъ изъ необходимости обслуживать тепловой энергіей опредѣленный термическій процессъ.

Первая группа условій, въ свою очередь распадается на двѣ группы: а) Вопервыхъ, горючее должно выдѣлить при горѣніи въ печи все то тепло, которое оно вообще способно развить; другими словами, количество тепла, развиваемое въ печи горючимъ должно равняться полезной теплопроизводительности горючаго. б) Во вторыхъ, все тепло горючаго должно быть выдѣлено въ такой области печи, чтобы явилась возможность его полнаго использованія для совершающагося въ печи заводскаго процесса. Другими словами, тепло должно быть сосредоточено въ рабочемъ пространствѣ печи, т. е. температура выходящихъ изъ печи продуктовъ горѣнія должна быть минимальной—по возможности близкой къ температурѣ наружнаго воздуха.

Этимъ, какъ сказано, не ограничивается задача печи.

Печь можетъ сожигать горючее при условіяхъ полнаго горѣнія, продукты горѣнія могутъ быть невысокой температуры и все-таки печь можетъ оказаться не удовлетворяющей своему назначенію, такъ какъ можетъ не соотвѣтствовать условіямъ совершающагося въ печи процесса.

Эти условія заключаются главнымъ образомъ въ слѣдующемъ: вопервыхъ, печь должна давать температуру опредѣленной высоты, т. е. сожигать горючее съ опредѣленнымъ избыткомъ воздуха или даже съ теоретическимъ его количествомъ, во-вторыхъ интенсивность горѣнія должна соотвѣтствовать интенсивности процесса, т. е. горючее должно оставлять въ печи въ единицу времени количество тепла близкое къ тому его количеству, которое можетъ быть усвоено въ единицу времени процессомъ. Развитіе большаго количества тепла въ печи характеризуетъ неэкономичность процесса и безполезную трату тепла, меньшее количество тепла можетъ обусловить невыгодное замедленіе процесса и даже его остановку.

Помимо этихъ двухъ главныхъ группъ условій, каждый заводскій процессъ въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ предъявляетъ къ печи извѣстныя требованія, какъ то: въ печи реакціи должны совершаться до конца или устанавливать извѣстное химическое равновѣсіе, въ шлакахъ долженъ отсутствовать металлъ и т. д., но эти требованія предъявляются уже къ печи не какъ къ тепловому прибору, а какъ къ прибору опредѣленнаго химическаго процесса.

Размѣры печи обусловливаются какъ характеромъ

совершающагося въ печи процесса, такъ и системой печи какъ теплового прибора. Конструкція печи должна быть такова, чтобы обусловливать возможность подвода воздуха и горючаго въ строго опредѣленныхъ количествахъ для полученія опредѣленнаго количества тепла въ единицу времени; во-вторыхъ она должна давать возможность поддержанія въ рабочемъ пространствѣ печи опредѣленной температуры (путемъ нагнетанія горячихъ газовъ или вытягиванія изъ печи холодныхъ, наконецъ просто подогрѣвомъ матеріаловъ, какъ въ электрическихъ печахъ); въ третьихъ на единицу горючаго должна приходиться наименьшая возможная при данномъ процессѣ поверхность стѣнокъ печи, способныхъ отдавать тепло окружающему печь пространству, при возможно меньшемъ количествѣ теряющагося тепла на единицу поверхности этихъ стѣнокъ, въ четвертыхъ, наконецъ, матеріалы, изъ которыхъ сложена печь должны быть огнеупорными соотвѣтственно цѣли, для которой предназначается печь и не должны реагировать съ веществами процесса. (Хотя до сихъ поръ существуютъ печи, матеріалы которыхъ принимаютъ участіе въ процессѣ, но, какъ общее правило, этого слѣдуетъ избѣгать).

Вопросами конструкціи печей и расчета ихъ размѣровъ, въ данной статьѣ, мы заниматься не будемъ; хотя эти вопросы и не разработаны исчерпывающимъ образомъ, однако уже нѣсколько освѣщены. Что же касается вопросовъ утилизаціи тепла въ печахъ, то въ этомъ отношеніи сдѣлано настолько мало, что даже не выработана раціональная терминологія изслѣдованій тепловыхъ явленій въ металлургическихъ процессахъ.

Задачей этой работы представляется изслѣдованіе утилизаціи тепла въ заводскихъ печахъ и процессахъ и попутно условій, опредѣляющихъ раціональность системъ печей-какъ тепловыхъ приборовъ, и заводскихъ процессовъ какъ термическихъ процессовъ.

Если назовемъ все количество тепловой энергіи, входящее въ рабочее пространство печи любого типа черезъ E, выходящее изъ него количество тепловой энергіи черезъ P^1, то количество тепловой энергіи, выдѣляемой въ рабочемъ пространствѣ печи будетъ равно E—P'. Называя отношеніе количества тепловой энергіи, выдѣляемой горючимъ въ рабочемъ пространствѣ, ко всему количеству энергіи, равному полезной его теплопроизводительности коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія печи, получимъ для послѣдняго (η_f) слѣдующее выраженіе: $\eta_f = \frac{E - P^1}{Q}$ гдѣ Q полезная теплопроизводительность горючаго.

Замѣтимъ прежде всего, что величина E зависитъ отъ способа сожиганія горючаго въ печи, т. е. отъ полноты горѣнія горючаго, отъ величины теплопроизводительной способности горючаго, отъ большаго или меньшаго подогрѣва воздуха и горючаго, наконецъ, при сожиганіи горючаго внѣ рабочаго пространства, отъ тѣхъ потерь въ тепловой энергіи, которыя претерпѣваютъ газы до поступленія въ рабочее пространство печи.

Въ случаѣ превращенія, напримѣръ, горючаго въ газъ въ особыхъ генераторахъ предварительно его сожиганія въ печи, количество развиваемаго единицей горючаго въ печи тепла зависитъ отъ коэффиціента полезнаго дѣйствія генератора, которымъ назовемъ отношеніе количества тепловой энергіи, заключающейся въ газахъ, выходящихъ изъ генератора (какъ явной такъ и скрытой) къ полезной теплопроизводительности горючаго. При этомъ все тепло, сообщенное газамъ какимъ либо постороннимъ источникомъ тепла должно быть исключено.

Если обозначимъ количество калорій, выдѣляемое въ рабочемъ пространствѣ печи газомъ, поступившимъ изъ генератора въ количествѣ соотвѣтствующемъ единицѣ горючаго, черезъ G, то коэффиціентъ полезнаго дѣйствія генератора долженъ равнятся: $\eta_{gen} = \frac{G}{Q}$

Въ случаѣ неполнаго горѣнія, во входящихъ въ печь газахъ содержится болѣе теплой энергіи, чѣмъ использовано ея въ печи, поэтому называя черезъ $1-\alpha$ коэффиціентъ полноты горѣнія въ печи, гдѣ α равно отношенію потенціальной тепловой энергіи въ продуктахъ горѣнія къ теплопроизводительности горючаго получимъ для коэффиціента полезнаго дѣйствія генератора выраженіе:

$$\eta_{gen} = \frac{G + \alpha Q}{Q}. \text{ Откуда } G = Q(\eta_{gen} - \alpha).$$

Въ общемъ случаѣ $G + \alpha Q < Q$, такъ какъ G не равно $(1-\alpha)$ Q, потому что генераторъ работаетъ съ потерями.

Поэтому вообще выгоднѣе обходиться безъ отдѣльно стоящаго генератора, при чемъ при полномъ горѣніи $G = Q$, а при неполномъ $G = (1-\alpha)Q$.

Количество калорій, заключающееся въ продуктахъ горѣнія, покидающихъ рабочее пространство печи назовемъ черезъ P. При неполномъ горѣніи тепловая энергія газовъ, покидающихъ рабочее пространство печи будетъ равнятся $P + \alpha Q$, гдѣ αQ потенціальная тепловая энергія газовъ.

Если температура этихъ продуктовъ горѣнія еще высока, обыкновенно ихъ пропускаютъ черезъ реге-

неративныя рѣшотки, способныя аккумулировать тепло и отдавать его для нагрѣва воздуха, горючаго или веществъ, участвующихъ въ процессѣ.

Назовемъ черезъ η_{reg} коеффиціентъ полезнаго дѣйствія регенератора, равный отношенію тепла, полученнаго въ регенераторѣ газами, входящими въ рабочее пространство печи, къ теплу, оставляемому въ регенераторѣ продуктами горѣнія.

Какъ мы видѣли, тепловая энергія газовъ, выходящихъ изъ рабочаго пространства въ регенераторъ равна $P + \alpha Q$, тепловая же энергія газовъ, выходящихъ изъ регенератора будетъ равна $P_c + \alpha_1 Q$, гдѣ P_c обозначаетъ явную тепловую энергію газовъ, а α_1 коэффиціентъ полноты горѣнія, который можетъ и не быть равнымъ α, такъ какъ въ регенераторѣ можно дожечь газъ.

Тепло, полученное газами изъ регенератора такимъ образомъ равно:

$$\eta_{reg}\ [(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)];$$

и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи можетъ быть выраженъ формулой:

$$\eta_f = \frac{(G + \alpha Q) - (P + \alpha Q) + \eta_{reg}\,[(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)]}{Q}$$

Сокращая по α Q, получаемъ общеее уравненіе коэффиціента полезнаго дѣйствія печи, любого типа;

$$\eta_f = \frac{G - P + \eta_{reg}\,[(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)]}{Q}$$

Замѣтимъ, что $Q = Act$, гдѣ A количество кубическихъ метровъ газа изъ вѣсовой единицы горючаго, C теплоемкость этого газа, и t его температура; равнымъ образомъ $A_1c_1t_1$ и $A_2c_2t_2$ соотвѣтствуютъ объему, теплоемкости и температурѣ газовъ, выходящихъ изъ рабочаго пространства печи и изъ регенератора въ трубу.

Уравненіе коэффиціента полезнаго дѣйствія печи можетъ быть предствавлено въ слѣдующемъ видѣ:

$$\eta_f = \frac{Act - A_1c_1t_1 + \eta_{reg}\,[(A_1c_1t_1 + \alpha Q) - (A_2c_2t_2 + \alpha_1 Q)]}{Q}$$

Замѣтимъ, что коэффиціентъ полезнаго дѣйствія зависитъ отъ величины объемовъ $A_1A_1A_2$ и ихъ теплоемкостей, т. е. степень полезнаго дѣйствія печи зависитъ отъ того совершается ли горѣніе въ печи съ теоретическимъ количествомъ воздуха или его избыткомъ. Въ скрытой формѣ въ этомъ уравненіи заключена зависимость коэффиціента полезнаго дѣйствія регенеративныхъ печей отъ отношенія между произведеніемъ изъ объема на теплоемкость и температуру продуктовъ горѣнія, входящихъ въ регенераторъ и произведеніемъ изъ объема на теплоемкость на температуру газовъ, выходящихъ изъ регенератора въ рабочее пространство. Отсюда между прочимъ слѣдуетъ, что подогрѣвъ лишь вторичнаго воздуха безъ подогрѣва газа весьма недостаточенъ для использованія всего тепла, содержащагося въ продуктахъ горѣнія, выходящихъ изъ рабочаго пространства печи съ высокой температурой.

Вліяніе этихъ условій на коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи будетъ разобрано подробнѣе, при изслѣдованіи отдѣльныхъ печей.

Такъ какъ теоретическая температура, достижимая въ данной печи равняется частному отъ дѣленія количества калорій, вносимыхъ въ печь, на произведеніе изъ объема продуктовъ горѣнія на ихъ теплоемкость, то мы можемъ представить въ общей формѣ температуру достижимую въ заводскихъ печахъ:

$$t = \frac{G + \eta_{reg}\,[(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)]}{AC}$$

Какъ видно изъ уравненія, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи является функціей слѣдующихъ величинъ: полноты горѣнія горючаго α; величины G, опредѣляющей количетво тепла, развиваемаго въ печи единицей горючаго, которое въ свою очередь зависитъ отъ η_{gen}; величины P, представляющей собой количество явной тепловой энергіи въ продуктахъ горѣнія, выходящихъ изъ рабочаго пространства; величины P_c, обозначающей количество тепла въ газахъ выходящихъ въ трубу; величины η_{reg}— коэффиціента полезнаго дѣйствія регенератора; и наконецъ, отъ величины Q теплопроизводительной способности горючаго.

Послѣдняя величина для даннаго сорта горючаго является постоянной, P, P_c— какъ увидимъ далѣе зависятъ отъ процесса и отъ системы печи не зависятъ; остаются слѣдовательно лишь величины α, η_{gen} и η_{reg}, которыя опредѣляютъ систему печи, т. е. способъ сожиганія въ печи горючаго, степень полноты горѣнія, и наконецъ большее или меньшее использованіе тепла, заключающагося въ продуктахъ горѣнія, выходящихъ изъ рабочаго пространства печи.

Эти три величины и должны быть положены въ основу раціональной классификаціи заводскихъ печей.

Посмотримъ же въ какихъ предѣлахъ могутъ измѣняться коэфиценты полноты горѣнія, генератора и регенератора.

Горѣніе можетъ быть полнымъ и не полнымъ, въ первомъ случаѣ $\alpha = Q$, во второмъ $\alpha < 1$. При $\alpha = 1$ потенціальная тепловая энергія продуктовъ горѣнія должна быть равна теплопроизводительности горючаго, слѣдовательно горѣніе не можетъ быть осуществлено.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія генератора можетъ быть равенъ единицѣ, когда выходящіе изъ генератора газы содержатъ въ себѣ количество тепловой энергіи равное полезной теплопроизводительности горючаго.

Отдѣльно стоящіе генераторы печей Сименса работаютъ съ потерями. Примемъ, что коэффиціентъ генератора, равный единицѣ, характеризуетъ сожиганіе горючаго въ шахтныхъ печахъ, въ простыхъ топкахъ, открытыхъ непосредственно въ рабочее пространство и въ генераторахъ, расположенныхъ въ тѣлѣ печей и также открывающихся въ рабочее пространство.

При генераціи газа въ отдѣльно стоящихъ генераторахъ, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія генераторовъ меньше единицы.

При коэффиціентѣ полезнаго дѣйствія генератора равномъ О, разумѣется работа печи невозможна.

Коэффиціентъ регенератора можетъ равняться О — въ печахъ безъ регенераторовъ, когда все тепло, заключающееся въ продуктахъ горѣнія выходящихъ изъ рабочаго пространства безполезно теряется.

Въ регенеративныхъ печахъ этотъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія меньше единицы и наконецъ въ шахтныхъ печахъ, принимая шахту верхнихъ слоевъ печи за подвижную регенеративную насадку коэффиціентъ полезнаго дѣйствія регенератора можетъ быть принятъ равнымъ единицѣ.

Мы имѣемъ слѣдовательно для α два случая, для η_{gen} два случая, и для η_{reg} три случая, всего слѣдовательно возможно 12 основныхъ комбинацій въ условіяхъ горѣнія; перечислимъ всѣ эти случаи съ выводомъ въ каждомъ случаѣ коэффиціента полезнаго дѣйствія печи и достижимой въ ней температуры.

Основныя комбинаціи условій утилизаціи тепла въ заводскихъ печахъ—системы печей.

Группа I. $\alpha = 0$. Полное горѣніе.

А) $\eta_{gen} = 1$ и $\eta_{reg} = 0$. $\eta_f = \frac{Q - P}{Q}$; $t = \frac{Q}{AC}$

Печи отражательныя, съ простыми топками, нерегенеративныя.

Б) $\eta_{gen} = 1$ и $\eta_{reg} < 1$. $\eta_f = \frac{Q - P + \eta_{reg}(P - P_c)}{Q}$;

$$t = \frac{Q + \eta_{reg}(P - P_c)}{AC}$$

Печи отражательныя регенеративныя съ простыми топками или генераторами въ тѣлѣ печи.

В) $\eta_{gen} = 1$ и $\eta_{reg} = 1$. $\eta_f = \frac{Q - P + (P - P_c)}{Q}$;

$$t = \frac{Q + P_p\ ^*)}{AC}$$

Шахтныя печи полнаго горѣнія.

Г) $\eta_{gen} < 1$ и $\eta_{reg} = 0$. $\eta_f = \frac{Q\,\eta_{gen} - P}{Q}$; $t = \frac{Q\,\eta_{gen}}{AC}$

Нерегенеративныя отражательныя печи съ отдѣльными генераторами (нераціональная система).

Д) $\eta_{gen} < 1$ и $\eta_{reg} < 1$. $\eta_f = \frac{Q\,\eta_{gen} - P + \eta_{reg}(P - P_c)}{Q}$;

$$t = \frac{Q\,\eta_{gen} + \eta_{reg}[(P + \alpha Q) - (P_c^* + \alpha_1 Q)]}{AC.}$$

Обыкновенныя регенеративныя печи Сименса.

Е) $\eta_{gen} < 1$ и $\eta_{reg} = 1$. $\eta_f = \frac{Q\,\eta_{gen} - P + (P - P_c)}{Q}$;

$$t = \frac{Q\,\eta_{gen} + P_p\ ^*)}{AC}$$

Шахтныя печи съ отдѣльно стоящими генераторами (система менѣе раціональная, чѣмъ подгруппы Р).

Группа II. $\alpha < 1$. Неполное горѣніе.

А) $\eta_{gen} = 1$ и $\eta_{reg} = 0$. $\eta_f = \frac{Q(1 - \alpha) - P}{Q}$; $t = \frac{Q(1 - \alpha)}{AC}$

Конверторы.

Б) $\eta_{gen} = 1$ и $\eta_{reg} < 1$.

$$\eta_f = \frac{Q(1 - \alpha) - P + \eta_{reg}[(P + \alpha Q) - (P_c^* + \alpha_1 Q)]}{Q};$$

$$t = \frac{Q(1 - \alpha) + \eta_{reg}[(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)]}{AG}$$

Отражательныя регенеративныя печи съ простыми топками, или генераторами въ тѣлѣ печи, Нераціональный ходъ—неполное горѣніе.

В) $\eta_{gen} = 1$ и $\eta_{reg} = 1$.

$$\eta_f = \frac{Q(1 - \alpha) - P + [(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)]}{Q}$$

$$t = \frac{Q(1 - \alpha) + P_p\ ^*) + \eta_{reg}\ Q'\ ^{**})}{Q}$$

Обыкновенныя шахтныя печи.

Г) $\eta_{gen} < 1$ и $\eta_{reg} = 0$.

$$\eta_f = \frac{Q(\eta_{gen} - \alpha) - P}{Q}; \quad t = \frac{Q(\eta_{gen} - \alpha)}{AC}$$

---

*) Гдѣ Рр—тепло нагрѣтыхъ составныхъ частей шахты, участвующихъ въ горѣніи.

**) Q′ тепло, остающееся въ регенераторахъ, въ случаѣ дожиганія въ нихъ продуктовъ неполнаго горѣнія.

Отражательныя печи, нерегенеративныя, съ отдѣльными генераторами и неполнымъ горѣніемъ.

Самая нераціональная система.

Д) $\eta_{gen} < 1$ и $\eta_{reg} < 1$.

$$\eta_f = \frac{Q(\eta_{gen} - \alpha) - P + \eta_{reg}[(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)]}{Q}$$

$$t = \frac{Q(\eta_{gen} - \alpha) + \eta_{reg}[(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1)]}{AC}$$

Нераціонально работающія печи Сименса.

Е) $\eta_{gen} < 1$ и $\eta_{reg} = 1$.

$$\eta_t = \frac{Q(\eta_{gen} - \alpha) - P + [(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)]}{Q}$$

$$t = \frac{Q(\eta_{gen} - \alpha) + P_P{}^*) + \eta_{reg} Q_1{}^{**})}{AC}$$

Нераціональная система. Шахтныя печи съ отдѣльно стоящими генераторами.

Раціональными, изъ всѣхъ возможныхъ комбинацій, являются: изъ печей полнаго горѣнія, подгруппы А, Б, В, Д и отчасти Е; изъ печей неполнаго горѣнія лишь группы А и В.

Итого шесть основныхъ типовъ печей, изъ которыхъ распространены типы подгруппъ А и Д первой группы и А и Д второй группы. Печи подгруппы Б 1) первой группы начинаютъ получать распространеніе лишь въ послѣднее время, а печи подгруппы В 1) первой группы до сихъ поръ еще въ большомъ видѣ неиспытаны, хотя по условіямъ горѣнія и утилизаціи тепла представляются наивыгоднѣйшими.

Изслѣдованіемъ печей этихъ шести типовъ и системъ ихъ осуществляющихъ и займемся.

Для вычисленія коэффиціентовъ полезнаго дѣйствія печей различныхъ системъ сдѣлаемъ нѣкоторыя допущенія.

Во-первыхъ положимъ, что температура выходящихъ изъ рабочаго пространства печи продуктовъ горѣнія равна 1500°, во-вторыхъ, что температура газовъ, выходящихъ изъ регенератора въ трубу равна 300° (та и другая температура зависитъ отъ процесса), втретьихъ, что коэффиціентъ полезнаго дѣйствія регенератора равенъ 80% и въ четвертыхъ, что при сожиганіи горючаго въ шахтной печи, простой топкѣ и въ генераторѣ расположенномъ въ тѣлѣ самой печи коэффиціентъ генератора равенъ единицѣ, а при предварительномъ образованіи газа изъ горючаго въ отдѣльно стоящемъ генераторѣ получается холодный газъ, т. е. все тепло, сообщенное газу экзотермическими реакціями въ генераторѣ, за исключеніемъ превратившагося въ скрытую форму, теряется до поступленія газа въ рабочее пространство.

Предположимъ, кромѣ того, что въ качествѣ горючаго мы примѣняемъ чистый углеродъ и въ основаніе вычисленій примемъ молекулярные объемы. (См. Industrial Furnaces. Damour et Queneau и статью Горнаго Журнала 1910 г.: „О заводскихъ печахъ и процессахъ“).

Въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ изслѣдованія печи, разумѣется, необходимо отказаться отъ данныхъ допущеній, принятыхъ для упрощенія разсчетовъ.

Группа I. $\alpha = 0$. Печи полнаго горѣнія.

Подгруппа А.

Подгруппа А содержитъ въ себѣ печи, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія генератора которыхъ равенъ единицѣ при коэффиціентѣ регенератора равномъ 0.

Это, какъ мы уже указали, отражательныя печи съ простыми топками безъ регенераторовъ.

Горѣніе углерода въ печахъ съ простыми топками съ теоретическимъ количествомъ воздуха совершается по реакціи:

$$C + O_2 + 4N_2 = CO_2 + 4N_2.$$

Разсчетъ коэффиціента полезнаго дѣйствія печи при температурахъ продуктовъ горѣнія, выходящихъ изъ рабочаго пространства печи:

	въ 1000°	въ 1500°
Общее количество калорій, выдѣляемое единицей горючаго	97,6	97,6
Количество калорій, уносимыхъ молекулярнымъ объемомъ CO_2	12,2	21,1
Количество калорій, уносимыхъ четырьмя объемами N_2	29,7	46,6
Итого . .	41,9	67,5

Откуда $\eta_f = \frac{97,6 - 41,9}{97,6} = 57,4\%$.

$$\eta_f = \frac{97,6 - 67,5}{97,6} = 30,8\%.$$

Какъ мы видимъ даже при температурѣ продуктовъ горѣнія въ 1500° и при теоретическомъ количествѣ воздуха, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печей съ простыми топками довольно высокъ. Однако полное горѣніе въ такихъ печахъ съ теоретическимъ количествомъ воздуха невозможно.

Въ наилучше сконструированныхъ топкахъ мини-

---

1) Печи Лебедева и Померанцева.

мальный избытокъ воздуха составляетъ 50% всего его количества теоретически необходимаго для горѣнія.

Съ другой стороны рѣдко продукты горѣнія, выходящіе съ такой температурой выпускаются непосредственно въ трубу, обыкновенно они предварительно направляются подъ паровой котелъ или въ случаѣ, когда они выходятъ изъ подъ парового котла въ экономайзеры.

При аналогичныхъ температурахъ продуктовъ горѣнія и полуторномъ избыткѣ воздуха, коэффиціенты полезнаго дѣйствія соотвѣтственно опредѣлятся:

Общее количество тепла въ газахъ, входящихъ въ рабочее пространство печи, по предыдущему равно 97,6 калорій.

Тепло въ продуктахъ горѣнія:

	1000°	1500°
Въ молекулярномъ объемѣ CO_2 .	12,2	21,1
Въ 0,5 молекулярнаго объема O_2.	3,71	5,8
Въ 6 молекулярныхъ объемахъ N_2	44,55	69,6
Итого . .	60,46	96,5

$$\eta_f = \frac{97{,}6 - 60{,}46}{97{,}6} = 38{,}03\%. \qquad \eta_f = \frac{97{,}6 - 96{,}5}{97{,}6} = 1{,}14\%.$$

При горѣніи углерода съ двойнымъ избыткомъ воздуха и при выходѣ продуктовъ горѣнія съ температурами въ 200°, 300°, 400° и 600° коэффиціенты полезнаго дѣйствія печи соотвѣтственно будутъ равны: 85,6%, 77,6%, 69,0% и 53,7%.

Какъ мы увидимъ далѣе, при газификаціи горючаго, обусловливающей значительное удороженіе стоимости печей, подобной утилизаціи тепла достигнуть весьма нелегко. Только при температурѣ продуктовъ горѣнія выше 600°, примѣненіе печей съ простыми топками безъ регенераціи тепла продуктовъ горѣнія становится нераціональнымъ.

Достижимая въ печахъ съ простыми топками температура равна 2030°, если горѣніе происходитъ съ теоретическимъ объемомъ воздуха и 1500° при полуторномъ избыткѣ воздуха.

Подгруппа Б.

Переходимъ теперь къ изслѣдованію печей подгруппы Б, съ коэффиціентомъ генератора равнымъ единицѣ и коэффиціентомъ регенератора меньшимъ единицы при полномъ горѣніи горючаго. Какъ было указано выше къ печамъ такого типа принадлежатъ отражательныя регенеративныя печи съ простыми топками и отражательныя регенеративныя печи съ генераторомъ въ тѣлѣ самой печи.

Въ первыхъ печахъ примѣняется твердое и жидкое горючее, въ печахъ съ генераторами въ тѣлѣ печи горючее газифицируется, но потери при газификаціи минимальны, такъ какъ генераторъ открывается непосредственно въ рабочее пространство и вся тепловая энергія газовъ выходящихъ изъ генератора, какъ явная такъ и потенціальная можетъ быть утилизирована въ рабочемъ пространствѣ печи. Какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ весь воздухъ необходимый для горѣнія, какъ первичный, такъ и вторичный подогрѣвается насчетъ тепла продуктовъ горѣнія.

Въ печахъ съ внутреннимъ генераторомъ, газификація можетъ совершаться на счетъ воздуха, воздуха смѣшаннаго съ паромъ и наконецъ насчетъ регенерированныхъ продуктовъ горѣнія.

Разсмотримъ, такимъ образомъ, четыре системы печей этого типа: а) печи съ простыми топками, б) печи съ внутренними генераторами на генераторномъ газѣ, в) на газѣ смѣшанномъ, г) на газѣ регенерированныхъ продуктовъ горѣнія.

Общее количество тепла, выдѣляемое единицей горючаго въ такой печи равно 97,6 калорій. Количество тепла въ продуктахъ горѣнія при 1000°—41,9 калорій, при 1500°—67,5 калорій. Въ продуктахъ горѣнія уходящихъ въ трубу при температурѣ въ 300° содержится 11,32 калоріи. За вычетомъ этого тепла и при отдачѣ регенераторовъ въ 80%, въ подогрѣтомъ воздухѣ будетъ содержаться при температурѣ продуктовъ горѣнія въ 1000°—24,46 калорій, при температурѣ ихъ въ 1500°—44,94 калорій.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи будетъ равенъ:

$$\eta_f = \frac{97{,}6 - 41{,}9 + 24{,}46}{97{,}6} = 82{,}0\%.$$

$$\eta_f = \frac{97{,}6 - 67{,}5 + 44{,}94}{97{,}6} = 77\%.$$

Температура, достижимая въ печахъ этой системы при продуктахъ горѣнія съ температурой въ 1000° равна 2400°, при температурѣ же продуктовъ горѣнія 1500° равна 2700°. Какъ увидимъ далѣе, это наиболѣе высокая температура достижимая въ отражательныхъ печахъ полнаго горѣнія.

Эти коэффиціенты полезнаго дѣйствія и температуры относятся однако лишь къ печамъ съ внутренними генераторами. Какъ показала практика, въ печахъ съ простыми топками, хотя бы и регенеративныхъ полнаго горѣнія съ теоретическимъ количествомъ воздуха достичь нельзя. Необходимъ избытокъ воздуха въ 25%.

При такихъ условіяхъ коэффиціенты полезнаго дѣйствія равны:

$$\eta_f = \frac{97{,}6 - 51{,}19 + 29{,}80}{97{,}6} = 77\%.$$

$$\eta_f = \frac{97{,}6 - 81{,}9 + 53{,}8}{97{,}6} = 71\%.$$

Температуры горѣнія достижимыя въ печахъ регенеративныхъ съ простыми топками равны 2150° и 2450°.

Положимъ теперь, что для образованія газа изъ горючаго, мы пользуемся смѣсью воздуха съ паромъ, вычислимъ при этихъ условіяхъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія.

Такъ какъ реакція образованія водяного газа эндотермична, то непрерывное образованіе его безъ посторонняго источника тепла невозможно. Поэтому для обслуживанія заводскихъ печей примѣняютъ такъ называемый смѣшанный газъ, состоящій изъ смѣси водяного газа съ генераторнымъ въ пропорціи, обусловливающей возможность реакціи: $C + H_2O = CO + H_2$, требующей 28,8 калорій (29,4 — 58,2 = = — 28,8 калорій).

Слѣдовательно x частей углерода сгораетъ съ CO насчетъ H_2O, по формулѣ $x.(C+H_2O) = x \cdot (CO+H_2)$, съ поглощеніемъ 28,8 . x калорій. Остальной углеродъ сгораетъ съ воздухомъ, по формулѣ: $(1-x) \cdot (C+{}^1/_2O_2+2N_2) = (1-x)\cdot(CO+2N_2)$. Съ выдѣленіемъ 29,4 (1 — x) калорій. Смѣсь обоихъ газовъ будетъ имѣть составъ: $CO + x\,H_2 + (1-x)\cdot 2N_2$. Положимъ, что генераторный газъ нагрѣтъ до 600°. Газъ этого состава будетъ содержать 12,9 — 4,3 · x калорій При вдуваніи въ регенераторъ пара и воздуха подогрѣтыхъ до 700°, x будетъ равенъ 0,49, такъ какъ въ парѣ подогрѣтомъ до 700° на одинъ молекулярный объемъ окиси углерода, образующейся изъ $C + H_2O$ содержится 7,05 калорій, а въ воздухѣ при той же температурѣ, участвующемъ въ реакціи $C+{}^1/_2O_2+2N_2$ будетъ 12,6 калорій. Слѣдовательно, термохимическое уравненіе приметъ видъ:

$$-21{,}8 \cdot x + 42{,}0\ (1-x) = 12{,}9 - 4{,}3x.$$

Въ парѣ, вводимомъ въ генераторъ содержится 3,40 калорій (7,05 · 0,49), въ первичномъ воздухѣ 6,42 калорій (12,6 · 0,51). Слѣдовательно въ газѣ, выходящемъ изъ генератора содержится всего кинетическаго тепла 10,70 калорій.

$$(3{,}40 + 6{,}42 - [28{,}8\,.\,0{,}49] + [29{,}4\,.\,0{,}51]).$$

Въ газѣ, входящемъ въ рабочее пространство изъ генератора, слѣдовательно, общая величина тепловой энергіи будетъ равняться 107,4 калоріямъ). (Объемъ CO развиваетъ 68,2 калоріи, 0,49 объемовъ H_2 — 28,5 калорій и явное тепло — 10,7 калорій). Въ продуктахъ горѣнія заключается 47,3 калоріи (41,9 + 5,4). Изъ этого количества уходитъ въ трубу 12,6 калорій (11,32 + 1,30) изъ остающихся 34,70 калорій, при отдачѣ регенераторовъ въ 80% можетъ быть утилизировано 27,76 калорій, изъ которыхъ на нагрѣвъ первичнаго воздуха и пара уже израсходовано 9,80 калорій. Остатокъ для нагрѣва вторичнаго воздуха составитъ 17,96 калорій. Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи при такихъ условіяхъ будетъ равняться:

$$\eta_f = \frac{107{,}4 - 47{,}3 + 17{.}96}{97{,}6} = 80\%.$$

При температурѣ продуктовъ горѣнія въ 1500° подогрѣвъ воздуха и пара можетъ быть доведенъ до 1100° причемъ смѣшанный газъ будетъ заключать 60% водяного и 40% генераторнаго газа.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи, опредѣлится аналогичнымъ способомъ изъ уравненія:

$$\eta_f = \frac{113{,}3 - 78{,}7 + 36{.}96}{97{,}6} = 73\%.$$

Вычислимъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи данной системы при вдуваніи въ регенераторъ, а затѣмъ и въ генераторъ продуктовъ горѣнія той же самой печи.

Такъ какъ реакція $CO_2 + C = 2CO$ совершается съ затратой 38,8 калорій, то слѣдовательно горѣніе углерода въ углекислотѣ требуетъ тепла на каждый молекулярный объемъ на 10 калорій больше, чѣмъ горѣніе его въ парѣ (не принимая во вниманіе скрытой теплоты парообразованія).

Разсчитаемъ аналогично предыдущему, какое количество продуктовъ горѣнія можно вводить въ генераторъ печи для непрерывнаго полученія газа; температуру вдуваемыхъ въ генераторъ продуктовъ горѣнія сначала примемъ равной температурѣ въ трубѣ — 300°, температуру газа, выходящаго изъ генератора равной 600°. Реакція газификаціи совершается по формулѣ:

$$C + CO_2 + 4N_2 = 2CO + 2N_2.$$

Такъ какъ только часть углерода газифицируется углекислотой, то общій составъ газа будетъ:

$$xC + x\,(CO_2 + 4N_2) + (1-x)\,C + (1-x)\cdot({}^1/_2O_2 + 2N_2) = (1+x)\,.\,(CO + 2N_2).$$

Термохимическое уравненіе приметъ видъ:

$$-27{,}48 \cdot x + 29{,}4\,.\,(1-x) = (12{,}6x + 12{,}6).$$

Откуда $x = 0{,}23$. Т. е. 23% всего углерода можетъ быть газифицировано углекислотой.

При этомъ въ генераторъ вводится продуктами горѣнія 2,6 калоріи (11,32 . 0,23), развивается въ генераторѣ горѣніемъ углерода въ воздухѣ 22,64 калоріи (29,4 . 0,77), поглощается реакціей образованія окиси углерода изъ углекислоты 8,9 калорій (38,8 . 0,23). Итого въ газахъ выходящихъ изъ генератора содержится 16,34 калоріи (25,24 — 8,9).

Слѣдовательно общая величина тепловой энергіи въ газѣ, выходящемъ изъ генератора равна 100,22 калорій (1,23 объема окиси углерода при горѣніи развиваютъ 83,88 калорій и въ газѣ содержится еще 16,34 калоріи).

Въ продуктахъ горѣнія, выходящихъ изъ рабочаго пространства печи содержится 51,54 калоріи (41,9 . 1,23). Въ трубу уходитъ 11,32 калоріи, слѣдовательно въ регенераторѣ остается 40,22 калоріи и при отдачѣ регенератора въ 80% можетъ быть использовано всего 32,18 калорій. Изъ этого количества нами уже израсходовано 2,6 калорій, слѣдовательно на нагрѣвъ воздуха пойдетъ 29,56 калорій.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи будетъ равенъ:

$$\eta_f = \frac{100{,}22 - 51{,}54 + 29{,}58}{97{,}6} = 80\%.$$

На самомъ дѣлѣ при такихъ условіяхъ вторичный воздухъ можетъ использовать лишь 15,5 калорій и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи будетъ равенъ 65%.

Если бы продукты горѣнія вмѣстѣ съ воздухомъ сначала поступали въ регенераторъ и затѣмъ уже шли въ генераторъ, то условія горѣнія измѣнились бы. При подогрѣвѣ продуктовъ горѣнія и первичнаго воздуха до температуры въ 700°, $x = 0{,}45$ и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи разсчитанный аналогичнымъ способомъ равняется:

$$\eta_f = \frac{123{,}03 - 60{,}75 + 13{,}00}{97{,}6} = 78\%.$$

Изъ этого примѣра можно видѣть насколько выше полезное дѣйствіе печи, допускающей возможность подогрѣва всего воздуха, необходимаго для горѣнія по сравненію съ печью подогрѣвающей лишь вторичный воздухъ.

Для того чтобы газифицировать весь углеродъ углекислотой необходимо, чтобы продукты горѣнія, имѣли температуру 1450°.

(Реакція требуетъ 38,8 калорій, въ газѣ $2(CO + 2N_2)$ при 600° содержится 25,86 калорій, итого необходимо, чтобы въ продуктахъ горѣнія седержалось 66,66 калорій, т. е. чтобы продукты горѣнія были нагрѣты до температуры въ 1450°).

Отсюда коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи будетъ равенъ:

$$\eta_f = \frac{164{,}26 - 135{,}00 + 45{,}9}{97{,}6} = 76{,}5\%.$$

Температура горѣнія въ данномъ случаѣ будетъ равна 2200°.

Какъ видимъ, слѣдовательно, газифицировать углеродъ въ печи съ внутреннимъ генераторомъ и подогрѣвомъ всего воздуха, необходимаго для горѣнія наиболѣе выгодно непосредственно воздухомъ безъ введенія пара или регенированныхъ продуктовъ горѣнія. При изслѣдованіи печей Сименса мы остановимся болѣе подробно на причинахъ этого явленія.

Подгруппа В.

Къ этой подгруппѣ принадлежатъ печи, условія утилизаціи тепла въ которыхъ представляются наивыгоднѣйшими. При коэффиціентахъ генератора и регенератора равныхъ единицѣ здѣсь α равна 0 т. е. горѣніе полное. Какъ видимъ изъ коэффиціента регенератора данная печь является шахтной; этому не противорѣчитъ и коэффиціентъ генератора. Однако въ шахтныхъ печахъ, обыкновенно примѣняемаго типа, горѣніе не можетъ быть полнымъ.

Даже при полномъ горѣніи горючаго въ нижнихъ слояхъ шахты, продукты горѣнія въ верхнихъ ея частяхъ встрѣчаютъ снова горючее и снова раскисляются, такъ что въ газахъ, выходящихъ изъ печи всегда есть запасъ потенціальной тепловой энергіи.

Данная шахтная печь, очевидно должна обладать отдѣльной топкой, въ которую грузится горючее, непосредственно открывающейся въ шахту, куда загружается руда. Такія печи для простой переплавки рудъ и заводскихъ продуктовъ могутъ оказаться весьма выгодными. При этомъ лишь необходимо дутье, такъ какъ шахта при удаленіи горючаго становится становится менѣе легко проницаемой для газовъ. Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія такой печи при температурѣ продуктовъ горѣнія равной температурѣ наружнаго воздуха равенъ 100%, а при температурѣ ихъ равной 300, равенъ 88%.

$$\eta_f = \frac{97{,}6 - 11{,}32}{97{,}6} = 88\%.$$

Достижимая въ печи температура равна 2040°.

Подгруппа Д.

Отражательныя регенеративныя печи Сименса.

Въ этихъ печахъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія генератора меньше единицы и коэффиціентъ регенератора также меньше единицы. Для послѣдняго мы по предыдущему примемъ величину отдачи въ 80%, а величина перваго зависитъ при нашемъ допущеніи полученія изъ генератора холоднаго газа

отъ способа газообразованія, т. е. отъ того примѣняются ли при газообразованіи паръ и продукты горѣнія или газификація совершается насчетъ одного воздуха.

По предыдущему вычислимъ коэффиціенты полезнаго дѣйствія печей этой системы на газѣ Сименса, на газѣ смѣшанномъ и на регенерированномъ газѣ продуктовъ горѣнія.

а) Отражательныя регенеративныя печи на газѣ Сименса.

Въ печахъ съ отдѣльно стоящими генераторами реакція газообразованія совершается по слѣдующему уравненію:

$$C + {}^1/_2O_2 + 2N_2 = CO + 2N_2$$

съ выдѣленіемъ 29,4 калорій тепла, которыя по нашему допущенію теряются. Горѣніе газа совершается въ рабочемъ пространствѣ печи по уравненію:

$$(CO + 2N_2) + ({}^1/_2O_2 + 2N_2) = CO_2 + 4N_2$$

газъ. вторичный воздухъ.

съ выдѣленіемъ 68,2 калорій. Общее количество тепла, выдѣляемое во всей установкѣ равно слѣдовательно 97,6 калоріямъ, но въ рабочемъ пространствѣ выдѣляется всего 68,2 калоріи.

Коэффиціенты полезнаго дѣйствія опредѣлятся:

$$\eta_f = \frac{68{,}2 - 41{,}9 + 24{,}46}{97.6} = 52\%.$$

$$\eta_f = \frac{68{,}2 - 67{,}5 + 44{,}94}{97{,}6} = 47\%.$$

Температуры, достижимыя въ печи равны 1950° и 2250°.

б) Печи на смѣшанномъ газѣ.

По предыдущему при газообразованіи въ генераторѣ, работающемъ на парѣ съ температурой въ 100° и холодномъ воздухѣ, непрерывное образованіе газа возможно при содержаніи въ газѣ 30% водянаго газа. При такихъ условіяхъ коэффиціенты полезнаго дѣйствія печей опредѣлятся изъ уравненій:

$$\eta_f = \frac{85{,}7 - 45{,}2 + 26{,}5}{97{,}6} = 69\%.$$

$$\eta_f = \frac{85{,}7 - 73{,}0 + 48{,}7}{97{,}6} = 63\%.$$

Температуры, достижимыя въ печахъ равны 2150° и 2400°.

в) Печи на регенерированномъ газѣ продуктовъ горѣнія.

Положимъ, что продукты горѣнія вдуваются въ генераторъ при температурѣ газовъ въ трубѣ (300°) какъ это мы принимали при разсмотрѣніи печей подгруппы Б.

Такъ какъ при этомъ всѣ условія заданія остаются тѣ-же за исключеніемъ лишь потери кинетической тепловой энергіи, содержащейся въ газахъ, выходящихъ изъ генератора, то коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи по предыдущему долженъ равняться:

$$\eta_f = \frac{83{,}88 - 51{,}54 + 29{,}58}{97.6} = 63\%.$$

Какъ видно изъ приведенныхъ выше разсчетовъ, вдуваніе пара и продуктовъ горѣнія въ генераторы печей Сименса, стоящіе отдѣльно отъ печей представляетъ несомнѣнныя выгоды. Значительная часть того тепла, которое выдѣляется при экзотермическихъ реакціяхъ въ генераторахъ Сименса и обыкновенно теряется, при вдуваніи пара или продуктовъ горѣнія въ генераторъ переходитъ въ скрытую форму и такимъ образомъ поступаетъ въ рабочее пространство печи безъ всякихъ потерь. Значительный выгрышъ въ тепловой работѣ обусловливается такимъ образомъ уменьшеніемъ потерь въ теплѣ, содержащемся въ газѣ выходящемъ изъ генератора и введеніемъ, такимъ образомъ въ печь большаго количества тепла на единицу горючаго.

Кромѣ того подогрѣвъ пара, вводимаго въ генераторъ позволяетъ улучшить и регенерацію тепла продуктовъ горѣнія, что однако компенсируется возрастаніемъ потерь въ трубу отъ увеличенія объема продуктовъ горѣнія и ихъ теплоемкости.

Введеніе пара въ генераторы печей подгруппы Б, по приведеннымъ выше разсчетамъ, ухудшаетъ условія работы печей, что и вполнѣ естественно; такъ какъ печи подгруппы Б работаютъ съ коэффиціентомъ генераторовъ равнымъ единицѣ, то сбереженіе тепла по этой статьѣ невозможно. Самое же средство, примѣняемое для сбереженія тепла въ генераторахъ Сименса, сопряжено съ нѣкоторымъ расходомъ тепла. При введеніи пара этотъ расходъ обусловливается большей потерей въ трубу; теоретически при введеніи продуктовъ горѣнія потери тепла должны быть меньше, одкако практически при этомъ всегда приходится вводить паръ для направленія струи газовъ.

Совершенно понятно, что при возможности аккумулировать тепло газификаціи въ газѣ, безразличенъ способъ какимъ это производится, если онъ самъ по себѣ не представляетъ новаго источника потерь. Вся разница между газификаціей углерода при помощи пара и продуктовъ горѣнія заключается въ ,томъ, что для балансированія экзотермическихъ

реакцій въ генераторѣ эндотермическими при помощи пара мы должны увеличить объемъ и теплоемкость продуктовъ горѣнія, выходящихъ въ трубу при газификаціи же продуктами горѣнія, теоретически въ этомъ нѣтъ необходимости.

Въ случаѣ, еслибы продукты горѣнія вводились въ генераторъ непосредственно изъ рабочаго пространства печи, минуя регенераторъ (какъ это было предложено въ 60-тыхъ годахъ Н. П. Лебедевымъ), возможно было бы достичь весьма совершенной отдачи тепла продуктами горѣнія.

Температуры, достижимыя въ печахъ съ отдѣльно стоящими генераторами при вдуваніи пара и продуктовъ горѣнія въ генераторы, выше температуры простыхъ печей Сименса, работающихъ на генераторномъ газѣ, однако ниже температуръ регенеративныхъ печей съ генераторами въ тѣлѣ печи или даже печей съ простыми топками, работающими безъ помощи пара и продуктовъ горѣнія.

II. Группа. $\alpha < 1$ Неполное горѣніе.

Подгруппа А.

Подгруппа А заключаетъ печи съ простыми топками или генераторами въ тѣлѣ печи, такъ какъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія генератора равенъ единицѣ и безъ регенераторовъ, такъ какъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія регенератора равенъ 0. Условіямъ такой печи отвѣчаетъ работа конвертора печи съ внутреннимъ сожиганіемъ горючаго, при неполномъ горѣніи и отсутствіи регенераторовъ.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія генераторовъ очень невысокъ. Горѣніе неполное, продукты горѣнія съ высокой температурой выходятъ изъ печи и все тепло, въ нихъ заключающееся безплодно теряется. Для конвертора стальной плавки, работающаго въ условіяхъ, приведенныхъ проф. Ричардсомъ (Разсчеты по Металлургіи. Томъ II), коэффиціентъ полезнаго дѣйствія равенъ 30%.

Всего тепла отъ реакцій въ печи 2,358,780 калорій, тепла въ газахъ, выходящихъ изъ печи 1,214,624, теплопроизводительная способность горючаго 3.826,718.

Отъ окисленія составн. частей шахты	3.468,260
Отъ образованія шлака	26,216
Избытокъ тепла въ конвенторѣ. . .	293,300
	3.826,716

$$\eta_{lf} = \frac{2{,}358{,}780 - 1{,}214{,}624}{3{,}826{,}716} = 30\%.$$

Температура, достижимая въ конверторѣ и вычисленная по формулѣ, приведенной нами выше, при $\alpha = 0{,}20$ и въ предположеніи, что горючимъ является въ конверторѣ углеродъ (предположеніе чисто фиктивное для сравненія температуръ достижимыхъ въ конверторахъ съ температурами печей другихъ системъ) при теоретическомъ количествѣ воздуха будетъ равна 1950°.

Подгруппа В.

Теперь намъ остается изслѣдовать печи неполнаго горѣнія съ коэффиціентомъ генератора и регенератора равными единицѣ т. е. обыкновенныя шахтныя печи.

Горючее въ шахтной печи загружается вмѣстѣ съ рудой. Въ нижнихъ слояхъ горючее можетъ сожигаться сразу или постепенно до степени полнаго горѣнія, но продукты горѣнія, поднимаясь въ верхніе слои шахты и встрѣчая тамъ горючее раскисляются. Продукты горѣнія могутъ быть выпускаемы при температурѣ окружающаго воздуха и горючія составныя части, въ нихъ заключающіяся могутъ дожигаться въ особыхъ печахъ для подогрѣва воздуха, необходимаго для горѣнія или въ двигателяхъ для обслуживанія печи механической энергіей.

Воздухъ можетъ вводиться въ печь нагрѣтымъ или ненагрѣтымъ, т. е. тепло продуктовъ горѣнія можетъ быть использовано болѣе или менѣе. Въ зависимости отъ процесса, въ продуктахъ горѣнія можетъ быть болѣе кинетической тепловой энергіи, чѣмъ потенціальной и наоборотъ.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія доменной печи (являющейся наиболѣе совершеннымъ представителемъ группы шахтныхъ печей неполнаго горѣнія) при условіяхъ, приведенныхъ проф. Ричардсомъ (Разсчеты по Металлургіи Томъ II) равенъ 50%.

Общій приходъ тепла въ печи равенъ 390,880 калорій.

Тепла въ продуктахъ горѣнія, выходящихъ изъ печи 43,836 калорій.

Полезная теплопроизводительность горючаго израсходованнаго въ печи 697,836 калорій.

И такъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи по предыдущему:

$$\eta_{lf} = \frac{390{,}880 - 43{,}836}{697{,}836} = 50\%.$$

Температура въ печи при $\alpha = \alpha_1 = 0{,}20$ — 2200°
при $\alpha = \alpha_1 = 0{,}50$ — 2000°
при $\alpha = 0{,}50$ и $\alpha_1 = 0{,}25$ — 2600°

Принимая въ послѣднемъ случаѣ, что отдача регенератора, въ которомъ дожигается газъ и по-

догрѣвается воздухъ равна 80% и что тепло въ горючемъ равно 0,5t — 120 на килограммъ.

Какъ видимъ при помощи неполнаго горѣнія горючаго и дожиганія его части съ нагрѣвомъ насчетъ получающагося тепла воздуха, необходимаго для горѣнія, можно значительно повысить пирометрическій эффектъ горѣнія. Это явленіе объясняется уменьшеніемъ объема продуктовъ горѣнія, которые все же получаютъ количество тепла близкое къ теплопроизводительной способности горючаго. Однако повышенію такимъ образомъ температуры горѣнія кладетъ предѣлъ невозможность передать небольшому количеству воздуха необходимому для неполнаго горѣнія значительное количество тепла, заключающееся въ продуктахъ неполнаго горѣнія.

Изъ всѣхъ примѣняемыхъ въ настоящее время печей, остались пока неразсмотрѣнными лишь электрическія печи.

Въ электрическихъ печахъ передача тепла веществамъ процесса совершается безъ помощи пламени, нагрѣваніемъ веществъ токомъ непосредственно или помощью индукціи.

При этомъ уравненіе коэффиціента полезнаго дѣйствія печи приметъ видъ:

$$\eta_f = \frac{Q\eta_{gen}}{Q} = \eta_{gen}$$

гдѣ слѣдуетъ объяснить значеніе η_{gen} и Q.

η_{gen} отвѣчаетъ полнотѣ превращенія механической энергіи въ тепловую, если электрическая энергія получается изъ водяной силы или — химической энергіи горѣнія въ тепловую, если электрическая энергія получается изъ химической энергіи горѣнія.

Q въ послѣднемъ случаѣ равняется полезной теплопроизводительности горючаго; въ первомъ случаѣ—количеству тепловой энергіи эквивалентному всему количеству использованной механической энергіи.

Перейдемъ къ вычисленію максимальнаго коэффиціента полезнаго дѣйствія электрическихъ печей.

Если электрическая энергія получается изъ химической энергіи горѣнія, то при наилучшемъ газомоторѣ, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія котораго равенъ 35%, на превращеніе химической энергіи въ механическую надо затратить безполезно 65% всего запаса энергіи горючаго. При дальнѣйшемъ превращеніи механической энергіи въ электрическую и далѣе въ тепловую мы должны потерять еще около 15% механической энергіи. Такимъ образомъ въ печь поступаетъ всего 30% тепловой энергіи, заключающейся въ горючемъ.

Коэффиціенты полезнаго дѣйствія печей и достижимыя въ нихъ температуры.

Группа I.

Подгруппа.	Коэффиціентъ пол. дѣйст. при темпер. прод. горѣнія: 1000°	1500°	Теоретическая температура пламени.	
А	38% [1]	1,14% [1]	1500°	
Б	77% [2]	71% [2]	2150°	2400°
	82% [3]	77% [3]	2400°	2700°
	80% [4]	73% [4]		
	80% [5]	76% [6]		2200°
В	88%		2240°	
Д	52% [3]	47% [3]	1950°	2250°
	69% [4]	63% [4]	2150°	2400°
	63% [5]			

Группа II.

А		30%		1950°
В	50% [7]		2200 [7]	2600° [8]

Группа III. Электрическія печи.

30%

1) Съ полуторнымъ избыткомъ воздуха.
2) Съ избыткомъ 25% воздуха.
3) Печи на газѣ Сименса.
4) Печи на смѣшанномъ газѣ.
5) Печи на газѣ регенерированныхъ продуктовъ горѣнія, вдуваемыхъ въ генераторъ съ температурой въ 300°.
6) Температура регенерируемыхъ продуктовъ горѣнія 1450°.
7) При $\alpha = \alpha_1 = 0{,}20$.
8) При $\alpha = 0{,}50$, $\alpha_1 = 0{,}25$.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія процесса.

Какъ мы указывали выше, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи зависитъ отчасти отъ совершающагося въ печи процесса. Эта зависимость главнымъ образомъ опредѣляется тѣмъ, что температура выходящихъ изъ рабочаго пространства продуктовъ горѣнія обусловливается совершающимися въ печи процессомъ. Какъ видно, однако изъ разсчетовъ

коэффиціентовъ полезнаго дѣйствія печей при температурахъ продуктовъ горѣнія въ 1500° и 1000° эта зависимость въ обычныхъ заводскихъ условіяхъ вліяетъ на степень полезнаго дѣйствія печей не особенно значительно.

Въ слѣдующихъ двухъ случаяхъ эта зависимость уничтожается:

1) Когда $G = P$ т. е. въ рабочемъ пространствѣ печи вовсе не остается тепла и 2) когда коэффиціентъ регенератора равенъ единицѣ, при температурѣ выходящихъ продуктовъ горѣнія равной О.

При этомъ наоборотъ все тепло, содержащееся въ газахъ остается въ рабочемъ пространствѣ печи. Въ послѣднемъ случаѣ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи равенъ:

$$\eta_{lf} = \eta_{lgen} - \alpha.$$

Разумѣется оба эти случая въ практикѣ не встрѣчаются, но изъ этого видно, что коэффиціенты полезнаго дѣйствія печей, въ которыхъ продукты горѣнія содержатъ тепла очень мало или наоборотъ содержаніе въ нихъ тепла близко къ его содержанію въ самомъ горючемъ, отъ совершающагося въ печахъ процесса почти не зависятъ.

Замѣтимъ также, что при P близкомъ къ P_c, зависимость коэффиціента полезнаго дѣйствія печи отъ коэффиціента полезнаго дѣйствія регенератора небольшая и на оборотъ при P близкомъ къ G эта зависимость весьма значительна. Другими словами при высокой температурѣ продуктовъ горѣнія, выходящихъ изъ рабочаго пространства необходимо примѣненіе регенераторовъ, при низкой ихъ температурѣ регенераторы безполезны.

Если обозначимъ количество тепла, потребнаго для совершенія эндотермическихъ реакцій процесса на единицу шахты, черезъ q, количество единицъ шахты черезъ n, теплоемкость продуктовъ плавки черезъ c_p и ихъ температуру черезъ t_p, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія процесса черезъ η_p и наконецъ количество вѣсовыхъ единицъ горючаго потребнаго для даннаго процесса въ данной печи черезъ M, то выраженіе для коэффиціента полезнаго дѣйствія процесса, т. е. отношенія между количествомъ тепла, потребнымъ для совершенія даннаго процесса и количествомъ тепла, остающимся въ рабочемъ пространствѣ данной печи при данномъ процессѣ будетъ равняться:

$$\eta^p = \frac{n(q + c_p t_p)}{\{G - P + \eta_{reg}[(P + \alpha Q) - (P_c^r + \alpha_1 Q)]\} M},$$

Или:

$$\eta_p = \frac{\eta(q + c_p t_p)}{\{Act - A_1 c_1 t_1 + \eta_{reg}[(A_1 c_1 t_1 + \alpha Q) - (A_2 c_2 t_2 + \alpha_1 Q\} M}$$

Положимъ теперь, что мы знаемъ температуру входящихъ въ рабочее пространство газовъ, вычислимъ зависимость температуры выходящихъ газовъ отъ условій, совершающагося въ печи процесса т. е. въ функціи η_p и отношенія $\frac{n}{M}$.

Положимъ для простоты, что горѣніе въ печи полное, что горючее сожигается съ теоретическимъ количествомъ воздуха и наконецъ что t_p равно t_1. Составъ продуктовъ горѣнія будетъ при этомъ равенъ $CO_2 + 4N_2$ и теплоемкость ихъ $0{,}322 + 0{,}00083t$.

Полагая температуру входящихъ въ рабочее пространство газовъ равной 1700° и температуру газовъ выходящихъ въ трубу равной 250° получимъ слѣдующія данныя.

Тепло въ куб. метрѣ продуктовъ горѣнія при 1700° — 787,3. Тепло при 250° — 85,7

Положимъ, что разсматриваемый нами процессъ. плавка одного килограмма чугуна, тогда $c_p = 0{,}175$; $n = 1$.

и $$\eta_p = \frac{0{,}175\, t_1}{(-0{,}000147\, t_1^2 - 0{,}5669\, t_1 + 6360{,}5) M},$$

Откуда

$$t = \frac{0{,}5699 + \frac{0{,}175}{M\eta_p} - \sqrt{4{,}07 + \frac{01{,}995}{M\eta_p} + \frac{0{,}0306}{M^2\eta_p^2}}}{-0{,}000294}$$

Для опредѣленія максимума t_1, приравниваемъ О первую производную нашего уравненія. по $x = M\eta_p$ при чемъ получаемъ, что $M\eta_p = O$, что даетъ максимумъ t_1 при $\eta_p = O$, т. е. при t_1 максимумъ (равномъ t) процессъ вовсе не усваеваетъ тепла. Для плавки чугуна въ мартеновской печи $\eta_p = 0.40$ $M = 0.118$ откуда $t_1 = 1560°$

Если примемъ температуру t_1 равной О, то при полномъ горѣніи и коэффиціентѣ генератора, равномъ единицѣ получимъ печь работающую совершенно, т. е. коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи будетъ равенъ единицѣ.

Если температура продуктовъ горѣнія печи, описанной въ подгруппѣ В первой группы будетъ равна температурѣ наружнаго воздуха, то коэффиціентъ полезнаго дѣйствія такой печи будетъ равенъ единицѣ.

Въ печахъ, въ которыхъ продукты горѣнія не удаляются изъ печи, количество тепла этой статьи расхода также равно О, поэтому эти печи также находятся въ выгодныхъ условіяхъ въ этомъ отношеніи. Къ типу такихъ печей принадлежатъ электрическія печи.

Если бы идущій въ обыкновенный печи процессъ способенъ былъ поглощать вводимые въ печь газы, то получились бы тѣ же условія. Такимъ образомъ

тѣ процессы, которые поглощаютъ хотя бы часть вводимыхъ въ печь газовъ, выгоднѣе процессовъ, выдѣляющихъ газы, при прочихъ равныхъ условіяхъ.

Для того, чтобы газы поглощались веществами, участвующими въ процессѣ, необходимо, чтобы они взаимно реагировали. При этомъ и самая передача тепла совершается, какъ увидимъ далѣе, наиболѣе полно. Наиболѣе выгодно, въ смыслѣ использованія тепла, остающагося въ рабочемъ пространствѣ, чтобы получающіеся въ результатѣ реакціи газовъ, вводимыхъ въ печь съ веществами въ печи тѣло, было какъ разъ тѣмъ тѣломъ, которое необходимо нагрѣть. Другими словами весьма выгодно, для условій передачи тепла веществамъ процесса, чтобы горючимъ являлась составная часть шахты.

Вычислимъ коэффиціенты наиболѣе употребительныхъ заводскихъ процессовъ и установимъ условія, отъ которыхъ зависитъ ихъ величина.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія плавки чугуна въ печи Сименса, описанной проф. Ричардсомъ (Расчеты по Металлургіи. Томъ II. 136 стр.) опредѣлится слѣдующимъ образомъ:

Всего въ рабочее пространство вносится 6,066,810 калорій, при 1400° изъ рабочаго пространства выходитъ 3,816,400 калорій. Полезная теплопроизводительная способность израсходованнаго въ печи горючаге равна 5,647,400 калорій, слѣдовательно коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи равенъ:

$$\eta_{1f} = \frac{6{,}066{,}810 - 3{,}816{,}400}{5{,}647{,}400} = 40\%.$$

Такъ какъ въ продуктахъ плавки заключается 900,000 калорій и процессъ не требуетъ тепла для совершенія эндотермическихъ реакцій, то коэффиціентъ полезнаго дѣйствія процесса будетъ равенъ:

$$\eta_{1p} = \frac{900{,}000}{6{,}066{,}810 - 3{,}816{,}400} = 40\%.$$

Вычислимъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія мартеновскаго процесса.

Возьмемъ для примѣра условія работы мартеновской печи, описанныя проф. Ричардсомъ (Разсчеты спо металлургіи. Томъ II. стр. 121).

Приходъ тепла.	калорій.
Тепло въ завалкѣ	189,210
Тепло въ воздухѣ	99,480
Тепло въ газѣ	360,550
Тепло отъ горѣнія газовъ . .	6,202,300
Тепло окисленія матеріаловъ .	833,600
Тепло образованія шлака . .	24,200
Итого . .	7,709,340

Расходъ тепла.	калорій.
Тепло въ стали	1,437,900
Тепло разложенія известняка .	9,200
Тепло въ шлакѣ	238,000
Тепло уносимое газами въ трубу	3,065,350
Тепло по прочимъ статьямъ .	2,958,890
Итого . .	7,709,340

При отдачѣ генераторовъ равной 80% теплопроизводительная способность горючаго, израсходованнаго въ генераторахъ равна — 8,328,000 калор. и общее количество тепловой энергіи въ израсходованныхъ горючихъ матеріалахъ равно 9,375,016 калорій. Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи будетъ равенъ:

(Потеря въ регенераторахъ дана равной 379,200 калорій: 10,295,000 — 3,065,350 — 6,850,450 = 379,200 калорій).

$$\eta_{1f} = \frac{7{,}709{,}340 - 3{,}444{,}550}{9{,}375{,}016} = 46\%.$$

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія процесса будетъ равенъ отношенію количества тепла потребнаго для совершенія процесса (9,200 + 238,000 + + 1,437,900 = 1,685,100 калорій) равнаго теплу, содержащемуся въ продуктахъ плавки и пошедшему на совершеніе эндотермическихъ реакцій процесса.

Слѣдовательно коэффиціентъ полезнаго дѣйствія мартеновскаго процесса въ печи Сименса равенъ:

$$\eta_{1p} = \frac{1{,}685{,}100}{7{,}709{,}340 - 3{,}444{,}550} = 40\%.$$

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія доменнаго процесса опредѣлимъ также для домны приведенной проф. Ричардсомъ (Расчеты по Металлургіи. Томъ II. Стр. 42).

Приходъ тепла.	калорій.
Отъ окисленія C въ CO_2	131,220
Отъ окисленія C въ CO	213,030
Въ парахъ воды	39,385
Въ воздухѣ	
Образованіе чугуна	2,820
Образованіе шлака	4,425
Итого . .	390,880

Расходъ тепла.	калорій.
Эндотермическія реакціи	217,379
Тепло въ чугунѣ и шлакѣ . . .	62,950
Тепло въ газахъ (281°)	43,836
Лучеиспусканіе, конвекція . . .	66,705
Итого . .	390,880

Если-бы весь углеродъ горючаго сгоралъ въ углекислоту, то получилось бы 650,430 калорій и общій приходъ тепла равнялся бы 697,100 калорій. Слѣдовательно коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи:

$$\eta_f = \frac{390{,}880 - 43{,}836}{697{,}100} = 50\%.$$

И коэффиціентъ полезнаго дѣйствія процесса:

$$\eta_p = \frac{280{,}329}{390{,}880 - 43{,}836} = 80\%.$$

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія процесса бессемерованія чугуна въ конверторѣ, разсчитанный аналогичнымъ образомъ получится приблизительно равнымъ 100.

Таковъ же коэффиціентъ полезнаго дѣйствія процесса, напримѣръ плавки стали въ электрическихъ печахъ.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія производства.

Подставивъ въ уравненіе коэффиціента полезнаго дѣйствія процесса значеніе $G - P + \eta_{reg}[(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)]$ изъ уравненія коэффиціента полезнаго дѣйствія печи равное $\eta_f Q$, получимъ $\eta p = \frac{n(q + c_p t_p)}{\eta f \cdot Q \cdot M}$ или $\eta_p \cdot \eta_f = \frac{n(q + c_p t_p)}{M Q}$, обозначимъ $\eta_p \cdot \eta_f$ черезъ η_{pf} назовемъ его коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія производства. Этотъ коэффиціентъ вполнѣ характеризуетъ количество тепла, необходимое для совершенія даннаго процесса въ данной печи и имѣетъ наибольшее практическое значеніе, почему въ технической литературѣ и имѣется много опредѣленій этого коэффиціента, хотя и называемаго до сихъ поръ ошибочно коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія печи.

Этотъ коэффиціентъ можетъ быть разумѣется полученъ и самостоятельно, не прибѣгая къ предварительному вычисленію коэффиціентовъ полезнаго дѣйствія печи и процесса. Коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія производства, мы называемъ отношеніе количества тепла, необходимаго для совершенія процесса къ общей теплопроизводительной способности всего количества горючаго, израсходованнаго въ печи.

Опредѣлимъ коэффиціенты полезнаго дѣйствія производства наиболѣе обыкновенныхъ процессовъ въ печахъ распространенныхъ типовъ.

Прежде всего опредѣлимъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія простой переплавки чугуна въ печи Сименса. Возьмемъ данныя уже цитированнаго нами примѣра проф. Ричардса и для коэффиціента производства получимъ слѣдующую величину:

$$\eta_{pf} = \frac{900{,}000}{5{,}647{,}400} = 16\%.$$

Произведеніе изъ коэффиціентовъ полезнаго дѣйствія процесса и печи должно дать ту же величину.

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія мартеновскаго процесса въ печи Сименса равенъ для цитированнаго нами примѣра:

$$\eta_{pf} = \frac{1{,}685{,}100}{9{,}375{,}016} = 18\%.$$

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія производства доменной плавки равенъ по предыдущему:

$$\eta_{pf} = \frac{280{,}329}{697{,}100} = 40\%.$$

Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія производства бессемерованія опредѣлится аналогичнымъ образомъ въ 30% и электрическаго сталеплавильнаго производства въ 30%.

Коэффиціентъ производства печей подгруппы Б для процесса плавки мѣдныхъ рудъ, описаннаго въ статьѣ Г. Леллепа (Metallurgie 1910 г. Heft II „Lebedeff—Pomeranzeff Ofen") будетъ равенъ:

$$\eta_{pf} = \frac{207}{788} = 26\%.$$

Теперь понятно, почему при незначительномъ полезномъ дѣйствіи электрическихъ печей, онѣ все же могутъ съ выгодой употребляться для процессовъ съ невысокимъ коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія.

Опредѣлимъ условія, отъ которыхъ зависитъ величина коэффиціента полезнаго дѣйствія процесса, т. е. причины, которыми объясняется то обстоятельство, что изъ тепла, остающагося въ рабочемъ пространствѣ мартеновской печи утилизируется процессомъ всего 40%, тогда какъ изъ того же тепла, въ доменной печи 80—90% наконецъ въ конверторѣ и электрической печи 100%.

Для этого необходимо изслѣдовать условія передачи тепла въ заводскихъ печахъ.

Входящіе въ рабочее пространство печи и нагрѣтые до высокой температуры газы, передаютъ свое тепло, какъ стѣнкамъ печи, такъ и матеріаламъ процесса помощью лучеиспусканія и конвекціи.

Передача тепла лучеиспусканіемъ зависитъ, при данномъ источникѣ тепла, отъ поверхности которой передается тепло, отъ особаго коэффиціента поглощенія тепла, зависящаго отъ свойствъ тѣла, которому тепло передается и наконецъ отъ разности температуръ между тѣломъ, излучающимъ тепло и его воспринимающимъ. Согласно закону Stefan—

Boltzmann'a это количество тепла пропорціонально разности четвертыхъ степеней абсолютныхъ температуръ тѣла и среды.

Такъ напримѣръ, если извѣстно количество тепла воспринятаго при излученіи единицей поверхности тѣла при разницѣ температуръ въ 100° и 0°, то для того же тѣла при абсолютной температурѣ тѣла T_2, а среды T_1 количество поглощенной тепловой энергіи будетъ равно:

$$\frac{(T_2)^4 - (T_1)^4}{(373)^4 - (273)^4}.$$

Замѣтимъ, что коэффиціенты лучеиспусканія, а слѣдовательно и поглощенія тепла (по закону Кирхгофа) для желѣза, шлака и огнеупорнаго кирпича очень близки между собой, такъ что въ печи съ ванной расплавленнаго металла пламя опредѣленной температуры передаетъ въ единицу времени на единицу поверхности равной, температуры путемъ лучеиспусканія одинаковое количество тепла безразлично будетъ ли то поверхность металла или стѣнокъ печи.

Кромѣ лучеиспусканія пламя передаетъ свое тепло также при помощи конвекціи т. е. непосредственнымъ соприкосновеніемъ.

(Явленія передачи тепла пламенемъ сложнѣе нежели предлагаемая ихъ схема. Передача тепла матеріаламъ сильно накаленными стѣнками и люминисценція усложняютъ явленія, тѣмъ не менѣе практически приводимая схема можетъ быть вполнѣ удовлетворительна).

Передача тепла конвекціей зависитъ отъ поверхности тѣлъ, которымъ передается тепло опредѣленнымъ его источникомъ, отъ ихъ теплопроводности, отъ разстоянія поверхностей между которыми передается тепло, отъ разности температуръ и въ случаѣ, если тепло передается отъ газа къ матеріалу. или отъ матеріала къ газу, то отъ скорости газовъ.

Входящее въ печь пламя должно нагрѣвать всѣ матеріалы, находящіеся въ печи; для этого газъ долженъ передать свое тепло внутренней поверхности стѣнокъ печи, затѣмъ нагрѣть кирпичъ стѣнокъ и наконецъ поверхностная конвекція должна нагрѣть воздухъ около печи.

Для нагрѣва металла, пламя прежде всего должно путемъ конвекціи передать свое тепло поверхности металла, затѣмъ въ зависимости отъ теплопроводности металла, и его массы нагрѣть болѣе или менѣе быстро металлъ, наконецъ нагрѣть кирпичъ, воду ванны, арматуру и воздухъ снизу печи.

Замѣтимъ, что при передачѣ тепла конвекціей отъ газа къ металлу, величина ея не зависитъ отъ состава металла, а опредѣляется лишь величиной поверхности тѣла, которому передается тепло, разностью температуръ газа и тѣла и наконецъ скоростью газа.

Величина этой поверхностной теплопроводимости на единицу поверхности въ единицу времени при разности температуръ въ 1° при передачѣ тепла газомъ металлу и при скорости газа въ v сантиметровъ выражается формулой $C = 0{,}000028\,(2 + \sqrt{v})$

Слѣдовательно скорость передачи тепла въ печи обусловливается теплопроводностью и массой матеріаловъ въ печи, вѣрнѣе сказать, ихъ сопротивляемостью передачѣ тепла.

Если принять, что толщина набойки пода равна толщинѣ свода и стѣнокъ печи и что набойка сдѣлана изъ того же матеріала какъ и стѣнки, что воздухъ около печи какъ снизу, такъ и сверху движется съ одинаковой скоростью, то принимая во вниманіе значительную теплопроводность металла, а слѣдовательно его незначительную сопротивляемость передачѣ тепла, можемъ принять, что передача тепла путемъ конвекціи совершается съ одинаковой скоростью по всѣмъ направленіямъ въ печи, т. е., что путемъ конвекціи, единицѣ поверхности металла передается то же количество тепла, какъ и единицѣ поверхности стѣнокъ печи, подвергающихся непосредственному дѣйствію пламени, допуская что температура шахты и стѣнокъ печи одинакова. Числовые подсчеты вполнѣ оправдываютъ это допущеніе.

Такимъ образомъ пламя передаетъ свое тепло путемъ лучеиспусканія и конвекціи какъ стѣнкамъ печи, такъ и матеріаламъ процесса въ приблизительно одинаковыхъ количествахъ въ единицу времени на единицу поверхности; слѣдовательно отношеніе количествъ тепла, передаваемыхъ матеріаламъ процесса и матеріаламъ, изъ которыхъ сложена печь при опредѣленной разности температуръ равно отношенію между поверхностями шихты въ печи и стѣнокъ печи, непосредственно подвергающимися дѣйствію пламени. Этотъ приблизительный законъ утилизаціи тепла въ заводскихъ печахъ заводскими процессами имѣетъ большую важность для уясненія явленій, происходящихъ въ печи.

Посмотримъ, дѣйствительно, каково отношеніе стѣнокъ печи непосредственно подвергающихся дѣйствію пламени къ поверхности шахты въ шахтныхъ печахъ, отражательныхъ конверторахъ и электрическихъ печахъ.

Прежде всего опредѣлимъ это отношеніе въ мартеновской печи. Для примѣра возьмемъ печь Кушвинскаго завода (Атласъ проф. Павлова). Отношеніе поверхности ванны къ поверхности стѣнокъ и свода печи подвергающихся непосреественному

дѣйствію пламени въ рабочемъ пространствѣ равно 24 : 52 т. е. поверхность ванны составляетъ всего 31% общей поверхности. Разумѣется при садкѣ металла, до его расплавленія поверхность шихты значительно больше (Слѣдуетъ, замѣтить, что полнаго равенства температуръ стѣнокъ печи и ванны на самомъ дѣлѣ нѣтъ.)

Въ шахтной печи, напримѣръ, діаметромъ въ 2 метра, при шахтѣ въ кускахъ діаметромъ въ 0,1 метра, поверхность стѣнокъ печи составитъ 19% общей поверхности шахты.

Положимъ, что шахта состоитъ изъ шаровъ діаметромъ 2r и такихъ шаровъ по діаметру въ одномъ слоѣ шахты, равномъ повысотѣ діаметру шара — n. Всего слѣдовательно такихъ шаровъ въ этомъ слоѣ будетъ $\frac{\pi n^2}{4}$ и общая поверхность шахты равна $\frac{\pi n^2}{4} \cdot 4\pi r^2$. Поверхность цилиндра заключающаго шахту будетъ равна $-2nr \cdot 2\pi r = 4\pi r n^2$ Отношеніе между поверхностями будетъ пропорціонально т. е. чѣмъ больше будетъ въ одномъ слоѣ шаровъ, тѣмъ больше будетъ отношеніе поверхности шахты къ поверхности стѣнокъ.

Отношеніе поверхности шахты къ поверхности стѣнокъ увеличивается при уменьшеніи діаметра кусковъ шахты и при увеличеніи діаметра печи.

Что касается этого отношенія въ конверторѣ, то величина поверхности шахты, съ которой приходитъ въ соприкосновеніе струя газовъ настолька велика, что тепломъ, теряющимся черезъ излученіе и конвекцію въ окружающее печь пространство можно пренебречь.

Положимъ, что имѣемъ n частицъ газа объемомъ въ a^3. Масса газа, слѣдовательно будетъ равна $M = n.a^3$. и поверхность соприкосновенія газа съ металломъ ($n\,4\,a^2 h$), гдѣ h — глубина ванны, а $4\,a^2$ поверхность каждой частицы газа.

При линейномъ уменьшеніи частицы газа въ p разъ, объемъ частицы будетъ равенъ $\frac{a^3}{p^3}$ и при неизмѣнившемся общемъ объемѣ газа число частицъ возрастетъ въ p^3 разъ.

Слѣдовательно масса газа выразится величиной $M = p^3 n. \frac{a^3}{p^3}$ и поверхность соприкасанія газа съ металломъ будетъ равна $p^3 n. 4 \frac{a^2}{p^2} h$. Отношеніе поверхностей равно p. Другими словами, линейное уменьшеніе частицы газа пропорціонально увеличенію поверхности соприкасанія метала съ газомъ, другими словами при безконечно малой частицѣ газа поверхность соприкасанія металла съ газомъ безконечно велика.

Если примемъ, что черезъ ванну конвертора въ въ секунду проходитъ 25 кубическихъ метровъ воздуха и частица газа имѣетъ величину въ одинъ кубическій миллиметръ, то газъ коснется поверхности металла въ 60,000,000 кв. метровъ. На самомъ же дѣлѣ, конечно, величина этой поверхности безконечно велика, такъ какъ самыя молекулы при прохожденіи сквозь ванну металла расщепляются на атомы.

Такимъ образомъ коэффиціентъ процесса въ конверторѣ долженъ равняться единицѣ.

Разумѣется эти данныя являются вполнѣ сравнимыми лишь для одинаковой разности температуръ между источникомъ тепла и нагрѣваемымъ тѣломъ. Для сравненія процессовъ одинаковаго характера, т. е. одинаковыхъ температуръ знаніе ихъ весьма важно. Какъ видимъ, выведенная нами зависимость подтверждается и практическими данными. Разумѣется для полнаго совпаденія слѣдуетъ принимать во вниманіе въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ тѣ поправки, которыя нами были откинуты для приданія общаго характера выведенной нами зависимости (главнымъ образомъ неравенство температуръ матеріаловъ и стѣнокъ печи).

Такимъ образомъ процессъ вліяетъ на коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи, опредѣляя количество тепловой энергіи, содержащееся въ продуктахъ горѣнія, выходящихъ изъ печи. Это количество, разумѣется зависитъ отъ объема продуктовъ горѣнія, ихъ теплоемкости и температуры.

Коэффиціентъ же полезнаго дѣйствія самаго процесса т. е. большее или меньшее использованіе тепла, остающагося въ рабочемъ пространствѣ печи зависитъ отъ отношенія между тепломъ полезнымъ-усвоеннымъ процессомъ и тепломъ потяннымъ въ окружающее печь пространство посредствомъ конвенціи и лучеиспусканія.

Это отношеніе, какъ нами показано, характеризуется при данной разницѣ температуръ источника тепла и всѣхъ матеріаловъ нагрѣваемыхъ въ печи, отношеніемъ между поверхностью матеріаловъ процесса и поверхностью печныхъ стѣнокъ непосредственно подвергающимися дѣйствію пламени.

Температура рабочаго пространства печи.

Слѣдуетъ также болѣе подробно остановиться на понятіи—температуры печи.

Какъ извѣстно, температура какого-либо процесса горѣнія вычисляется при помощи дѣленія количества калорій, развиваемаго горѣніемъ на произведеніе изъ объема продуктовъ горѣнія на ихъ

теплоемкость. При этомъ получается, такъ называемая теоритическая температура горѣнія, при чемъ, если принять во вниманіе коэффиціентъ диссоціаціи, зависящій отъ высоты температуры и парціальнаго давленія способнаго диссоціировать соединенія, то достигается достаточная степень точности.

Однако непосредственныя измѣренія температуръ въ печахъ даютъ величины значительно болѣе низкія.

Легко, конечно, предположить, какъ это и дѣлаютъ нѣкоторые авторы, что законъ возрастанія теплоемкостей съ повышеніемъ температуры опредѣленъ еще недостаточно точно.

Однако теоретическія температуры и не должны быть равны при всякихъ условіяхъ температурамъ, практически опредѣляемымъ въ печахъ. Температура пламени должна зависѣть отъ условій среды, въ которой находится пламя.

Если температура этой среды такова, что передача пламенемъ тепла происходитъ быстро, то температура пламени ниже, чѣмъ въ средѣ съ высокой температурой, при которой пламя отдаетъ свое тепло медленно. Такъ какъ потери тепла пламенемъ могутъ быть равны нолю только въ томъ случаѣ когда среда обладаетъ той же температурой что и пламя, то при заводскихъ условіяхъ рѣдко можно найти въ рабочемъ пространствѣ печи теоретическую температуру.

Въ заводской практикѣ важное значеніе имѣетъ понятіе температуры рабочаго пространства, которое слѣдуетъ отмѣчать въ каждомъ случаѣ изслѣдованія печи.

Какъ мы видѣли, температура пламени въ печи зависитъ отъ количества тепла въ газахъ, входящихъ въ рабочее пространство и той быстроты, съ которой пламя передастъ свое тепло въ рабочемъ пространствѣ. Другими словами температура рабочаго пространства зависитъ отъ совершающагося въ печи процесса, которымъ опредѣляется температура выходящихъ изъ печи продуктовъ горѣнія. Какъ ясно изъ предыдущаго, температура продуктовъ горѣнія выходящихъ изъ печи равна количеству тепла въ газахъ входящихъ въ печь минусъ тепло остающееся въ рабочемъ пространствѣ дѣленное наобъемъ продуктовъ горѣнія и на ихъ теплоемкость, т. е.

$$t_1 = \frac{E - [n(q + c_p t_p) + P_{kr}']}{AC_1}$$

Для того, чтобы получить среднюю температуру рабочаго пространства изъ общаго количества тепла необходимо вычесть лишь половину приведенной величины. Такимъ образомъ для температуры рабочаго пространства получаемъ выраженіе:

$$t_f = \frac{E - \frac{n(q + c_p t_p) + P_{kr}'}{2}}{AC_f}$$

или $$\frac{E + P}{2AC_f} \; ; \; n(q + c_p t_p) + P_{kr}' = E - P$$

(гдѣ Pkr′ тепло, теряющееся въ окружающее печь пространство изъ рабочаго пространства печи, смыслъ остальныхъ обозначеній сохраненъ прежній).

Разумѣется въ рабочемъ пространствѣ печи съ неоднообразной температурой можетъ быть такимъ же образомъ вычислена температура отдѣльныхъ частей рабочаго пространства.

Изъ этого уравненія слѣдуетъ, что въ печи, въ которой продукты горѣнія, уходящіе изъ рабочаго пространства имѣютъ температуру равную О, температура рабочаго пространства равна половинѣ теоретической температуры, такъ какъ $n(q + c_p t_p) + P kr = E$.

Наоборотъ въ печи, температура продуктовъ горѣнія которой равна температурѣ входящихъ въ печь газовъ температура рабочаго пространства равна теоретической температурѣ, такъ какъ при этомъ $n(q + c_p t_p) + P kr' = O$.

Если температура продуктовъ горѣнія, выходящихъ изъ рабочаго пространства не равна ни О ни t, то эта температура, а слѣдовательно и температура рабочаго пространства тѣмъ выше, чѣмъ меньше тепла остается въ рабочемъ пространствѣ печи.

Замѣтимъ, однако, что не всѣ потери тепла имѣютъ одинаковое знченіе для температуры рабочаго пространства. Тогда какъ потери въ окружающее печь пространство и на эндотермическія реакціи процесса просто понижаютъ температуру пламени, тепло идущее на нагрѣвъ шихты $n(q + c_p t_p)$ поднимаетъ температуру среды, въ которой находится пламя, слѣдовательно вліяетъ и на поднятіе температуры пламени.

При большой потерѣ тепла въ окружающее печь пространство температура шихты поднимается медленнѣе чѣмъ въ томъ случаѣ, когда при тѣхъ же условіяхъ эта потеря тепла уменьшится за счетъ увеличенія нагрѣва шихты. Въ послѣднемъ случаѣ температура рабочаго пространства тѣмъ ближе къ теоретической, чѣмъ меньше отношеніе теряющагося тепла къ общему его количеству. Здѣсь слѣдовательно имѣетъ большое значеніе и количество сожигаемаго горючаго въ единицу времени.

Этимъ объясняется, что температура бессемеровскаго конвертора весьма близка къ теоретической въ концѣ операціи, что температура шахтной печи

ближе къ теоретической, чѣмъ температура отражательной печи.

При непрерывныхъ процессахъ между температурой пламени и температурой шахты устанавливается извѣстное равновѣсіе, тогда какъ въ процессахъ періодическихъ это отношеніе измѣняется, такъ какъ величина $n(q + c_p t_p)$ въ періодическихъ процессахъ является перемѣнной.

Въ пустой печи разумѣется температура рабочаго пространства печи должна быть выше, нежели въ печи съ холодной шахтой. Въ печи, въ которой идетъ процессъ съ выдѣленіемъ тепла температура рабочаго пространства будетъ выше, чѣмъ въ той же печи при процессѣ поглощающемъ тепло, при прочихъ равныхъ условіяхъ.

Температура любой сферы пламени горючаго, горящаго непосредственно на воздухѣ равна общему количеству тепла развиваемому горѣніемъ, сложенному съ количествомъ тепла въ продуктахъ горѣнія температуры поверхности сферы, и дѣленному на удвоенное произведеніе изъ объема продуктовъ горѣнія на ихъ теплоемкость при средней температурѣ:

$$t_f = \frac{Act + Ac_1 t_1}{2Ac_f}$$

Это правило имѣетъ большое практическое значеніе.

Перейдемъ къ опредѣленію температуръ рабочаго пространства печей различныхъ типовъ.

Положимъ, напримѣръ, что въ горнѣ доменной печи, приведенной Проф. Ричардсомъ въ уже цитированномъ примѣрѣ, не совершается эндотермическихъ реакцій.

На единицу углерода выдѣляется всего 3595 калорій.

Такъ какъ въ выходящихъ газахъ содержится 11% всего запаса тепла, то въ рабочемъ пространствѣ остается 89%, потеря же въ окружающее печь пространство равна 20% этого количества или 17,8% всего тепла, входящаго въ печь или

$$3595 \cdot 17{,}8 = 640 \text{ калорій.}$$

Это количество тепла тратится на единицу горючаго во всей печи, положимъ, что на горнъ печи выше фурмъ и до половины заплечиковъ приходится одна треть этого количества, слѣдовательно:

$$3595 - 213 = 3382 \text{ калорій.}$$

Теоретическая температура равна:

$0{,}00014t^2 + 1{,}6t - 3595 = 0$. Откуда $t = 1930^2$.

Температура продуктовъ горѣнія въ данномъ мѣстѣ:

$0{,}00014t_1^2 + 1{,}6t_1 - 3382 = 0$. Откуда $t_1 = 1830°$.

Температура рабочаго пространства:

$0{,}00014tf^2 + 1{,}6tf - 3488 = 0$. Откуда $tf = 1870°$.

Температуру мартеновской печи, приведенной Проф. Ричардсомъ и нами уже описанной опредѣлимъ по формулѣ:

$$t_f = \frac{11{,}903{,}900}{5{,}615 + 1{,}0226\, t_f} = 1668°.$$

Гдѣ 11,903,900 калорій равны разности между 13,512,800 калоріями, развиваемыми въ рабочемъ пространствѣ горѣніемъ горючаго и 1,608,900 калоріями равными половинѣ всего количества тепла остающагося въ рабочемъ пространствѣ печи. (3,217,800 калорій). $5{,}615 + 1{,}0226t$ — теплоемкость продуктовъ горѣнія.

Температура рабочаго пространства мартеновской печи должна быть выше въ концѣ операціи, такъ какъ среда въ концѣ операціи обладаетъ болѣе высокой температурой.

Температура въ рабочемъ пространствѣ бессемеровскаго конвертора къ концу операціи должна быть весьма близкой къ теоретической температурѣ, такъ какъ потерями въ окружающее конверторъ пространство по ихъ незначительности можно пренебречь и отдача тепла процессу въ концѣ операцін ничтожна.

Въ своей статьѣ „Тепловой балансъ печи Лебедева и Померанцева“ (Извѣстія Общества Горныхъ Инженеровъ 1910 годъ) Г. Лелленъ находитъ непосредственнымъ измѣреніемъ (конусами Зегера) температуру въ рабочемъ пространствѣ въ 1700°, тогда какъ теоретическая температура равна 2090°.

Принимая коэффиціентъ полезнаго дѣйствія топки (вслѣдствіе потерь при ручной загрузкѣ горючаго) въ 90%, получимъ температуру рабочаго пространства равной:

$$t_f = \frac{1184 - 165}{0{,}438 + 0{,}000094\, t_f}$$

или $0{,}000094\, t_f^2 + 0{,}438\, t_f - 1019 = 0$.

Гдѣ $0{,}438 + 0{,}000094t$ теплоемкость продуктовъ горѣнія, а 1184 общее количество тепла входящее въ рабочее пространство печи ($1315 \cdot 0{,}90 = 1184$).

Откуда $f_f = 1700°$.

Общіе выводы.

1) Система печи, какъ теплового прибора характеризуется величинами коэффиціентовъ полезнаго дѣйствія генератора, регенератора и полноты горѣнія.

2) Уравненія коэффиціента полезнаго дѣйствія печи:

$$\eta_f = \frac{G - P + \eta_{reg}\,[(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)]}{Q}.$$

3) Процессъ, совершающійся въ печи опредѣляетъ объемъ, теплоемкость и температуру продуктовъ горѣнія, выходящихъ изъ рабочаго пространства и слѣдовательно опредѣляетъ количество тепла, остающагося въ рабочемъ пространствѣ, чѣмъ и вліяетъ на коэффиціентъ полезнаго дѣйствія печи.

4) Процессъ, совершающійся въ печи, какъ тепловой процессъ утилизаціи тепла въ рабочемъ пространствѣ печи опредѣляется отношеніемъ между поверхностью печныхъ стѣнокъ и матеріаловъ, подвергающихся непосредственному дѣйствію пламени (при равенствѣ температуръ матеріаловъ и стѣнокъ).

5) Уравненіе коэффиціента полезнаго дѣйствія процесса:

$$\eta_{lp} = \frac{n\,(q + c_p t_p}{\{G - P + \eta_{reg}\,[(P + \alpha Q) - (P_c + \alpha_1 Q)]\}M}$$

6) Уравненіе коэффиціента полезнаго дѣйствія производства:

$$\eta_{lfp} = \frac{n\,(q + c_p t_p)}{MQ}$$

7) Температура рабочаго пространства печи равна:

$$t_f = \frac{E - \frac{n\,(q + c_p t_p) + P_{kr}'}{2}}{AC_f} = \frac{E + P}{2AC^f}.$$

1-го іюля 1910 года.
Ораніенбаумъ.