

Г.А. СИСОЯН

**Электрическая
дуго в электрической печи**

ср

Г. А. СИСОЯН

Электрическая дуга в электрической печи

**Издание третье,
исправленное
и дополненное**



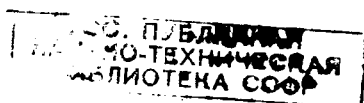
Москва „Металлургия“

1974

Электрическая дуга в электрической печи. 3-е изд.
С и с о я н Г. А., М., «Металлургия», 1974, 304 с.

Книга содержит систематическое изложение результатов исследования электрической дуги в электрических печах. Рассматриваются общая теория горения электрической дуги, особенности мощной низковольтной дуги и исследование дуги мощной электрической печи при выплавке электростали, ферросилиция, силикомарганца и карбида кальция.

Предназначена для работников научно-исследовательских институтов и инженерно-технического персонала заводов; может служить пособием для студентов и аспирантов, специализирующихся в области электрических печей. Ил. 211. Табл. 27. Список лит. 45 назв.



84
29530

74-214798

© Издательство «Металлургия», 1974 г.

С $\frac{31005-098}{040(01)-74}$ 48-74

Список основных принятых обозначений

- A — удельный расход электроэнергии;
- $a_k = eU_k$ — кинетическая энергия электрона;
- $a_i = eU_i$ — потенциальная энергия электрона;
- B — магнитная индукция;
- C — емкость;
- D_T — диаметр тигля;
- $D_{\text{э}}$ — диаметр электрода;
- $D_{\text{в}}$ — диаметр ванны;
- $d_{\text{м.э}}$ — расстояние между электродами;
- $d_{\text{э.с}}$ — расстояние между электродами и стенкой печи;
- D — коэффициент диффузии;
- $E_{\text{ц}}$ — э. д. с. цепи;
- E — напряженность поля у катода;
- $E_{\text{д}}$ — градиент потенциала в столбе дуги;
- e_0 — заряд электрона;
- F — сила;
- G — производительность установки;
- $g_{\text{г}}$ — квантовый статистический вес состояния молекул;
- $g_{\text{р}}$ — квантовый статистический вес состояния ионов;
- H — напряженность магнитного поля;
- I — сила тока;
- i — мгновенное значение силы тока;
- I_m — амплитудное значение силы тока;
- j — проводимость;
- k — постоянная Больцмана;
- k_e — подвижность электронов;
- $K_{\text{о.н.т}}$ — относительное изменение температуры;
- $L_{\text{к}}$ — индуктивность контура;
- $l_{\text{д}}$ — длина дуги;
- m_i — масса иона;
- m_e — масса электрона;
- n — концентрация частиц;
- P — подводенная активная мощность;
- $P_{\text{к}}$ — мощность электрических потерь в контуре;
- $P_{\text{п.т}}$ — мощность тепловых потерь;
- $P_{\text{т}}$ — мощность, расходуемая для технологических целей;
- $P_{\text{н}}$ — мощность, выделяющаяся в печи (на нагрузке);
- p — давление;
- $R_{\text{р}}$ — радиус распада электродов;
- $S_{\text{д}}$ — сечение столба дуги;
- $S_{\text{м.у}}$ — общая мощность установки;
- t, T — температура;
- $T_{\text{д}}$ — температура дуги;
- $r_{\text{д}}$ — сопротивление дуги;
- $r_{\text{к}}$ — активное сопротивление контура;
- v — скорость движения частицы;
- u — мгновенное (текущее) напряжение;
- $u_{\text{взз}}$ — напряжение зажигания дуги;
- $u_{\text{ис}}$ — напряжение погасания дуги;
- $u_{\text{д}}$ — напряжение дуги;
- $u_{\text{ф}}$ — фазное падение напряжения;
- U_m — амплитудное значение напряжения;
- $U_{\text{кат}}$ — катодное падение напряжения;
- $U_{\text{ан}}$ — анодное падение напряжения;
- U_i — потенция ионизации;
- $U_{\text{п}}$ — падение напряжения в переходных областях;
- $U_{\text{ст}}$ — падение напряжения в столбе;
- $x_{\text{к}}$ — индуктивное сопротивление контура;
- x — степень ионизации;

z — полное сопротивление;
 α — обозначение угла;
 α_p — коэффициент рекомбинации;
 α_t — температурный коэффициент;
 β — коэффициент;
 δ — плотность тока;
 γ — электропроводность;
 γ_v — объемный вес;
 γ_e — степень электризации;
 λ_e — длина свободного пробега электрона;
 λ_g — длина свободного пробега молекулы;
 λ_t — коэффициент теплопроводности;
 η_t — технологический к. п. д.;
 $\eta_{эл}$ — электрический к. п. д.;
 ρ — удельное сопротивление, объемная плотность заряда;
 τ — время;
 τ_d — постоянная времени электризации;
 $\cos \varphi$ — коэффициент мощности;
 Φ, Φ_m — поток сцепления и его амплитудное значение.
 ω — фазовый угол;

Из предисловия к первому изданию

История открытия электрической дуги и возникновения электротермии связана с именем русского ученого — акад. Василия Владимировича Петрова, который в 1802 г. провел свои знаменитые опыты плавки металлов при помощи вольтовой дуги. Результаты опытов В. В. Петров опубликовал в 1803 г. в специальном труде «Известия о гальвани-вольтовых опытах», в котором отдельная глава посвящена плавке металлов — «О расплавлении и сжигании металлов и многих других горючих тел, а также о превращении некоторых оксидов в металлы посредством гальвани-вольтовой жидкости».

С открытиями В. В. Петрова перекликаются работы знаменитого изобретателя лампы накаливания А. Н. Лодыгина, создавшего электропечи разнообразных типов. Ему принадлежат патенты на печи для выплавки металлов из руд, для нагрева бандажей перед насаживанием их на колеса, для закалки и отжига орудийных колец, для выплавки фосфора. Наконец, в 1900—1905 гг. А. Н. Лодыгин построил и пустил ряд мощных производственных печей для получения феррохрома и ферросилиция.

В дореволюционные годы обширные исследования природы горения электрической дуги были проведены акад. В. Ф. Миткевичем. Но изучение мощной электрической дуги по-настоящему началось только после Октябрьской революции. Проблеме горения дуги в руднотермической печи посвятили свои работы М. С. Максименко, С. И. Тельный, И. Т. Жердев и С. И. Хитрик, Г. А. Сисоян и др. Значительное внимание этой проблеме уделено также в работах Н. В. Огорокова.

Исключительно большую роль в разработке теории электрической дуги сыграли советские ученые, работающие в области электросварки. Часть разработки теории сварочной дуги, являющейся одним из видов электрической дуги, принадлежит В. П. Никитину, Е. О. Патону, К. К. Хренову и др.

Тем не менее ряд вопросов горения мощной руднотермической дуги до настоящего времени остается неясным.

Из предисловия ко второму изданию

Электросталь, основные виды ферросплавов и карбид кальция вырабатываются в мощных электрических печах. Выбор оптимального режима последних определяет и качество продукции, и экономное расходование электроэнергии.

В предлагаемой читателю книге рассмотрена одна из наиболее важных проблем выбора режима работы печи — горение электрической дуги.

В процессе подготовки книги к переизданию она была значительно расширена. В новое издание включен ряд вопросов, которые не были освещены в первом издании.

В связи с этим изменено и наименование книги.

В 1954 г. вышло первое издание предлагаемой книги под названием: «Электрическая дуга в руднотермической печи».

Это была, пожалуй, первая попытка систематического изложения физических основ теории горения мощной электрической дуги в электрических печах и результатов экспериментального исследования дуги в руднотермических печах при различных видах технологических процессов. Потребность в такого рода монографии в то время была весьма велика, так как многие вопросы горения электрической дуги в замкнутом, недоступном для визуального наблюдения пространстве оставались (да и сейчас остаются) неясными.

Первое издание книги было широко обсуждено на ряде заводов и в научно-исследовательских институтах, и было принято решение о ее переиздании.

Второе издание книги было выпущено Металлургиздатом в 1961 г. под названием «Электрическая дуга в электрической печи».

В соответствии с пожеланиями, высказанными при обсуждении книги, объем и тематика были расширены.

Второе издание книги также быстро разошлось, и возникла необходимость третьего издания.

За последнее десятилетие резко возросла мощность печных агрегатов. И технологические и физические процессы в таких агрегатах протекают иначе, чем в печах малой мощности. Поэтому при подготовке книги к третьему изданию ряд материалов пришлось переработать.

Во всех разделах книги основное внимание уделено физическим особенностям горения дуги, вопросы конструирования печных агрегатов исключены из рассмотрения.

В процессе изложения материала возникли затруднения при выборе терминов и обозначений. В ряде случаев мы отклонились от применения обычных терминов или от дословного перевода иностранных терминов. Насколько удачно это сделано, пусть судит читатель.

Настоящее издание, так же как и предыдущее, было тщательно просмотрено А. Д. Свенчанским. Автор выражает ему искреннюю благодарность за этот тяжелый труд.

Замечания о недостатках книги и пожелания будут приняты автором с благодарностью.

Краткие сведения об электрических печах

1. Общая классификация электрических печей

По способу преобразования электроэнергии электропечи делят на три класса — печи сопротивления, газоразрядные и смешанные.

В печах сопротивления электрическая энергия преобразуется в тепловую в твердой или жидкой среде; в газоразрядных печах преобразование электроэнергии происходит в газовой среде; наконец, в смешанных печах преобразование электроэнергии в тепло может происходить в среде любого агрегатного состояния.

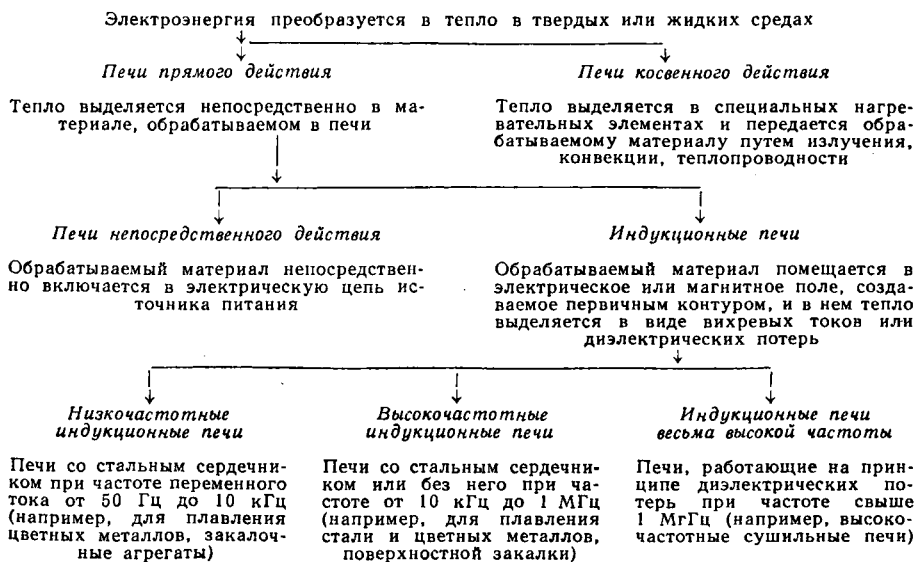
Помимо этого, электрические печи классифицируют по характеру рабочего тела. Если электроэнергия преобразуется в самом материале, перерабатываемом в печи, это будет печь прямого действия. Если же перерабатываемый в печи материал не принимает участия в преобразовании энергии и для этой цели служит специальная проводящая среда, то печь называется печью косвенного действия.

Могут быть, конечно, и такие печи, в которых одновременно происходит и прямой, и косвенный нагрев.

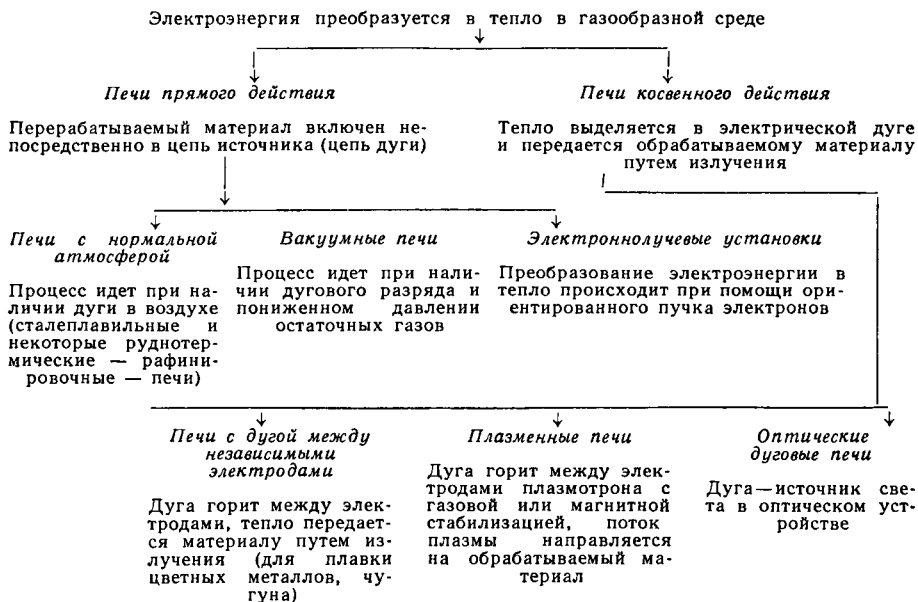
Несмотря на большое разнообразие электропечей, по конструкции и способу преобразования энергии все они охватываются классификацией, приведенной ниже (см. схему).

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ ПО СПОСОБУ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

1. ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ



II. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ (ДУГОВЫЕ) ПЕЧИ



III. ПЕЧИ СМЕШАННОГО ДЕЙСТВИЯ

Электроэнергия преобразуется в тепло в твердой (или жидкой) и в газообразной средах

↓

Многие руднотермические (восстановительные) печи

2. Характеристика руднотермических печей

Наибольшую группу печей, в которых применяется дуговой нагрев, составляют руднотермические печи. Поэтому прежде, чем перейти к рассмотрению физики дугового разряда, остановимся на общей характеристике руднотермических печей.

К руднотермическим¹ печам относят очень большое число типов печей самого разнообразного назначения.

К ним относятся, например, фосфорные, ферросплавные печи, печи для производства муллита, карборунда, различных карбидов и т. д.

Несмотря на такое разнообразие, мы можем все же указать на ряд признаков, характеризующих эти печи.

В руднотермических электропечах протекают эндотермические химические реакции, сопровождаемые поглощением значительного количества энергии. Обычно в руднотермических печах протекают

¹ Едва ли следует признать этот термин удачным. Еще менее удачен встречающийся иногда в литературе термин «рудовосстановительные», так как он не всегда характеризует процессы, протекающие в этих печах. (Прим. авт.)

процессы восстановления основных элементов из их окислов, подаваемых в печь в виде руды.

Другим признаком руднотермических печей является работа при высоких температурах для того, чтобы обеспечить осуществление восстановительных химических реакций. Как известно, температурный потенциал различных источников тепла неодинаков. Для топлива каждого вида достигим только определенный уровень температуры, при которой происходит теплоотдача. Для электронагрева же достижимый уровень температуры практически почти не ограничен. Действительно, при помощи электрической дуги можно создать любые температурные условия (вплоть до десятков тысяч градусов), требуемые для технологических процессов.

Правда, ряд руднотермических процессов, осуществляемых в электропечах, протекает при сравнительно низких температурах, достижимых и при использовании энергии других видов, но в этом случае применение электропечей объясняется особыми преимуществами электронагрева. Во-первых, пользуясь электронагревом, можно получить продукцию исключительной чистоты, и, во-вторых, при электронагреве можно исключительно быстро и точно регулировать подвод энергии, что недостижимо при использовании других видов нагрева. Наряду с этим электроэнергия имеет один очень важный недостаток — она стоит дороже, чем все другие виды энергии.

Поэтому применение электроэнергии для руднотермических целей прежде всего должно быть обосновано технологическими и экономическими соображениями.

При классификации руднотермических печей почти всегда пытаются отнести их, в соответствии с протекающими в них отдельными руднотермическими процессами, к определенным классам печей.

Такой подход к классификации руднотермических процессов приемлем только в первом приближении, так как в большинстве случаев он приводит к сильному упрощению действительных процессов в печах.

Признавая неудовлетворительность такой классификации, проф. М. С. Максименко предложил другую, в основу которой он положил «распределение энергии в различных зонах или горизонтах горна» [18]. Для этого он ввел три параметра: поглощение энергии в контакте между концом электрода и шихтой (или шлаком) — p , поглощение энергии в шлаке (или в расплаве) — q и поглощение энергии металлом — r .

Считая r очень малой величиной по сравнению с p и q , М. С. Максименко пренебрегает ею и намечает два класса нагрева:

1. Процессы, при которых $p > q$.
2. Процессы, при которых $p < q$.

Эта классификация по существу мало отличается от классификации по характеру токопроводящей среды.

Действительно, в контакте между концом электрода и шихтой поглощение электроэнергии может происходить двояко.

Если конец электрода непосредственно соприкасается с шихтой, находящейся в твердом или жидком состоянии, то сопротивление

контактного слоя будет незначительным и преобразующаяся в этом слое электроэнергия будет настолько мала, что в большинстве случаев ею можно пренебречь.

Если же между концом электрода и твердой или жидкой шихтой образуется газовая прослойка, то ток будет проходить через газы, т. е. будет происходить электрический разряд в газе. Для подавляющего большинства руднотермических процессов, которые обычно протекают при давлениях, близких к атмосферному, это будет дуговой разряд.

Таким образом, мы видим, что параметр p в первом случае равен нулю, а во втором — энергии, выделяющейся в дуге. Поэтому в классификации М. С. Максименко параметр p можно рассматривать как энергию, выделяющуюся при дуговом разряде.

Более неопределенными являются параметры q — поглощение энергии в шлаке (или расплаве) и r — поглощение энергии металлом. Шлак, расплав и металл появляются только после нагрева и осуществления ряда химических реакций, т. е. после поглощения значительного количества тепла. Таким образом, из приведенной классификации неясно, каким же параметром определяется поглощение энергии, которое приводит сырые материалы в состояние шлака или расплава.

Кроме того, в самой классификации не указано на возможность поглощения электроэнергии в шихте, а между тем в ряде процессов решающим фактором является именно этот вид преобразования электроэнергии.

Во втором разделе классификации, данной М. С. Максименко («Отдельные производства»), показано, что под параметром p следует понимать поглощение электроэнергии в дуге, а под параметром q — поглощение электроэнергии в жидких и твердых проводниках, включая и шихту.

Из характеристики отдельных сплавов, по данным М. С. Максименко, следует, что в сталеплавильной печи дуга выражена явно и поэтому $p > q$. В печи карбида кальция максимум поглощения энергии приходится на дугу. При производстве феррохрома наибольшая часть энергии поглощается дугой. При производстве ферросилиция часть энергии поглощается шихтой, часть газовым проводником на конце электрода, и для ферросилиция $p > q$.

Далее сказано, что при электровозгонке фосфора главное поглощение энергии имеет место в шихте со шлаком. При производстве карборунда параметр p очень мал; максимальное поглощение энергии идет в керне. При производстве карбида серы (сероуглерода) основное количество энергии поглощается шихтой.

Все это показывает, что М. С. Максименко под параметром p понимает трансформацию электроэнергии в газовой среде, а под параметром q — в твердой или жидкой среде.

Как было отмечено выше, классификация руднотермических процессов по этим двум параметрам не всегда достаточно четка, так как во многих случаях один и тот же руднотермический процесс может быть осуществлен при различных соотношениях величин

энергии дуги и энергии шихтовой проводимости, т. е. параметров p и q .

Кроме того, классификация по этим двум параметрам не отражает различия между прямой и косвенной трансформацией электроэнергии в тепло.

Одна и та же продукция может быть получена в печах различных типов и классов.

Поэтому не следует искать однозначного решения проблемы и полагать, что для данного руднотермического процесса применим только один определенный вид трансформации электроэнергии и неприменимы другие.

Скажем больше: в некоторых случаях на различных стадиях технологического процесса требуются различного типа трансформации электроэнергии. В качестве иллюстрации укажем на производство муллита.

Муллитовые печи являются печами периодического действия. В начале запуска печи необходимо расплавить новую порцию шихты. Так как температура плавления шихтовых материалов относительно велика (выше 1800°C), то для форсированного хода печи необходима большая мощность при ее высоких объемных плотностях. После же того, как плавление в основном закончено, необходимо некоторое время выдержать расплав для его рафинирования.

Конечно, в первый период желательно, чтобы печь работала при мощном дуговом разряде, а во второй период лучше уменьшить мощность дуги и увеличить мощность, выделяющуюся в расплаве.

Как видим, в первом периоде печь будет работать в дуговом режиме, а во втором — в смешанном.

Рассмотрим еще получение рафинированного ферромарганца. В начальный период производственного цикла печь работает по принципу смешанных печей, так как шихта характеризуется достаточно высокой электропроводностью и значительная доля тока течет от электрода к поду через шихту. Но и в этот период дуга в печи явно выражена.

Во второй период после расплавления всей шихты печь работает только в дуговом режиме.

Из сказанного можно сделать вывод, что режим работы руднотермических печей может меняться в широком диапазоне.

На практике мы встречаемся и с дуговым режимом, и с режимом сопротивления, и со смешанным режимом. Наконец, для одного и того же процесса в различных стадиях могут требоваться различные режимы.

Поэтому при решении вопроса об оптимальном режиме для того или другого процесса, с одной стороны, нужно знать, какие требования предъявляет этот процесс к электропечи, а с другой — надо ясно представлять индивидуальные свойства отдельных режимов.

В целом вопрос следует решать для каждого процесса в отдельности.

Так как режим печи в значительной степени зависит от ее размеров и мощности, то при анализе работы печи должны быть учтены и эти факторы.

3. Энергетические параметры ванны электрических печей

Энергетические параметры ванны печи установим, следуя идеям М. С. Максименко. Однако дополнительно будем учитывать прямую и косвенную трансформацию энергии и объемную плотность мощности.

Энергетические параметры ванны выразим в относительных единицах. За единицу примем всю электроэнергию, трансформирующуюся в ванне печи. Если энергия выделяется непосредственно в перерабатываемом материале, т. е. происходит прямой процесс, то к символу, обозначающему энергию, добавляется индекс «п», если же энергия выделяется в специальном проводнике, а потом передается перерабатываемому материалу, т. е. если происходит процесс косвенного действия, то к символу добавляется индекс «к».

Введем следующие обозначения:

1) долю электрической мощности, выделяющуюся в электроде, обозначим через O . Эта величина мала и, как справедливо указывает М. С. Максименко, в приближенных расчетах ею можно пренебречь;

2) долю электрической мощности, выделяющуюся в газовой среде, обозначим через p .

Так как газовый разряд может быть и прямого и косвенного действия, то в общем случае эти доли соответственно обозначим через p_p и p_k ;

3) долю электрической мощности, выделяющуюся в твердом проводнике, обозначим через q ; и здесь, в общем случае, для разряда прямого и косвенного действия примем обозначения q_p и q_k ;

4) долю электрической мощности, выделяющуюся в жидком проводнике, обозначим через t ; и здесь, в общем случае, запишем t_p и t_k .

Таким образом, всю электрическую мощность, трансформирующуюся в ванне печи, можно выразить уравнением

$$O + p_p + p_k + q_p + q_k + t_p + t_k = 1. \quad (I-1)$$

Если пренебречь трансформацией электроэнергии в электроде, то уравнение (I-1) приобретает вид

$$p_p + p_k + q_p + q_k + t_p + t_k = 1. \quad (I-2)$$

Этим уравнением можно выразить баланс преобразования электроэнергии в любой электрической печи.

Но для всякого руднотермического процесса в конечном счете существенно важен не способ преобразования электроэнергии, а объемная плотность получаемой тепловой энергии и уровень температуры, при котором она выделяется.

Поэтому основными параметрами любого руднотермического процесса являются объемная плотность энергии и ее мощность w , т. е.

энергия, выделяющаяся в единице объема в единицу времени, и температура ϑ , при которой происходит выделение энергии.

Но обе эти величины — w и ϑ — в различных точках ванны имеют различное значение и в то же время зависят от распределения электрического поля и плотности тока в ванне печи.

Таким образом, задача определения оптимальных режимов процессов плавки в целом сводится к изучению электрического и теплового полей ванны.

В некоторых случаях однородной среды при наличии только параметра q или только параметра t оба эти поля совпадают и тогда речь идет о теплоэлектрическом поле. Но при неоднородной среде удельная теплопроводность и электрическая проводимость различных зон материала в ванне печи различны. Вследствие этого электрическое и тепловое поля уже не подобны друг другу и должны рассматриваться раздельно.

Иначе обстоит дело при наличии только параметра p , т. е. газового разряда. В этом случае нельзя ограничиваться рассмотрением одной теплопроводности среды, а приходится учитывать излучение и конвекцию, в результате которых основная часть тепловой энергии передается перерабатываемому материалу.

Еще сложнее обстоит дело, когда одновременно известны два или три параметра.

Оптимальные величины необходимой температуры ϑ и объемной мощности w определяются, конечно, технологией процесса. Но, чтобы достичь этих величин, необходимо знать их зависимость от p , q и t . Основная задача правильного расчета печи все же заключается в определении зависимости этих параметров печи от распределения напряжения и тока. Распределение последних в значительной степени зависит от геометрических размеров и конфигурации ванны. Отметим, однако, что у двух печей, даже при наличии геометрического подобия, электрические и тепловые поля не всегда будут подобными.

Глава II

Теория электрической дуги (дугового разряда)

1. Открытие электрической дуги (исторический обзор)

Приоритет открытия электрической дуги принадлежит русскому ученому акад. Василию Владимировичу Петрову (1761—1834).

Результаты знаменитых опытов с лягушкой Гальвани опубликовал в 1791 г., а через восемь лет, в конце 1799 г., Вольт построил свой «вольтов» столб. Первые сообщения об открытии Вольты в печати появились в 1800 г. При помощи вольты столба ученому удалось воспроизвести электрические явления, уже известные до его открытия, но новые свойства гальванического электричества им найдены не были.

В апреле 1800 г. Никольсон построил вольтов столб из 17 пар пластинок и повторил эксперименты Вольты.

ИЗВѢСТІЕ

О

ГАЛЬВАНИ - ВОЛЬТОВСКИХЪ

О П Ы Т А Х Ъ,

которые производилъ

Профессоръ Физики Василій Петровъ,

посредствомъ огромной наипаче бат-
терей, состоявшей иногда изъ 4200
мѣдныхъ и цинковыхъ кружковъ, и на-
ходящейся при Санкт - Петербургской
Медико - Хирургической Академіи.

ВЪ САНКТ-ПЕТЕРБУРГѢ,

Въ Типографіи Государственной Ме-
дицинской Коллегіи, 1803 года.

Рис. 1. Титульный лист книги В. В. Петрова
«Известие о гальвани-вольтовыхъ опытахъ»

расположены четырьмя горизонтальными рядами длиною 3 м каждый. В своем труде В. В. Петров подробно описывает батарею и обосновывает ее расчет. Эта батарея в течение, по крайней мере, одного десятилетия была самой мощной в мире.

Получив такую мощную и уникальную по тому времени установку, В. В. Петров немедленно приступил к опытам.

Исследования В. В. Петрова создали новую эпоху в области изучения электрических явлений. Это прекрасно сознавал сам автор исследований. Поэтому, закончив в исключительно короткий срок свои эксперименты, он поспешил с их опубликованием.

Книга В. В. Петрова поступила в продажу в ноябре 1803 г. Следовательно, на проведение экспериментов, составление книги и на ее издание В. В. Петрову понадобилось всего около полутора лет. Учитывая возможности и темпы того времени, следует отметить, что работа была проведена и опубликована в исключительно короткие сроки.

Книга В. В. Петрова называется «Известие о гальвани-вольтовыхъ опытах, которые производил профессор физики Василій Петров, посредством огромной наипаче батареи, состоявшей иногда изъ 4200 медных и цинковых кружков, и находящейся при Санкт-Петербургской Медико-хирургической академіи» (рис. 1).

Книга состоит из восьми статей и одного «прибавления».

Известие об открытии Вольта очень быстро распространилось среди физиков того времени. Уже в октябре 1800 г. русский посланник в Гааге Д. А. Голицын писал в Петербургскую академию наук об открытиях Гальвани и Вольта.

Петербургские ученые весьма энергично взялись за экспериментальное исследование вольтова столба. Примерно через год — 16 сентября 1801 г. — известный русский исследователь в области химии и физики А. А. Мусин-Пушкин демонстрировал в Академии наук опыты с вольтовым столбом из 300 пластинок.

Опыты с вольтовым столбом проводил и профессор Медико-хирургической академии В. В. Петров. Однако В. В. Петров сознавал, что для достижения крупных научных результатов нужно располагать мощной батареей. Поэтому, по предложению В. В. Петрова, руководство Медико-хирургической академии 24 ноября 1801 г. приняло решение построить такой «... гальванический прибор, посредством которого можно было бы производить не только уже известные достопримечательнейшие физико-медико-химические опыты, но и с надежнейшим успехом заняться исследованиями».

Такая мощная батарея была изготовлена в апреле 1802 г. Она состояла из 4200 пар медных и цинковых кружков диаметром 3,5 см и толщиной 0,3 см. Кружки были

Электрической дуге посвящены статьи VI, VII, VIII «Известия» В. Петрова. Электрическую дугу Петров классифицирует как «светоносные явления, происходящие от гальванической вольтовской жидкости».

В статье VII описано явление дуги в атмосфере при нормальном давлении. «Если на стеклянную пластинку или на скамеечку со стеклянными ножками будут положены два или три древесных угля, способные для произведения светоносных явлений посредством гальванической вольтовской жидкости, и если потом металлическими изолированными направляющими (directores), сообщенными с обоими полюсами огромной батареи, приближать оные один к другому на расстояние от одной до трех линий, то является между ними весьма яркий белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медленнее загораются, и от которого покой довольно ясно освещен быть может». Затем описываются опыты с расплавлением металлов. Если в электрическую дугу между электродами внести листы металла («куски листового олова, серебра, золота, цинка»), то от пламени дуги «сии металлы иногда мгновенно расплавляются, сгорают также с пламенем какого-нибудь цвета и превращаются в оксид. . . Если же металлы будут сжигаемы в стеклянном шаре, то можно собрать большее или меньшее количество оксида, свойственного каждому металлу цвета».

Петров проводил опыты и обратного порядка — получение чистых металлов из их окисей: «. . оксиды (металлов), смешанные с порошком древесных углей, салом и выжатыми маслами, при сгорании. . . принимали настоящий металлический вид. . .».

В европейской литературе первые сведения об электрической дуге появились только в 1812 г.

В июле 1810 г. английский ученый Дэви в Лондонском королевском институте создал вольтов столб, состоящий из 2000 пар пластинок.

Эта батарея в то время считалась самой мощной в Европе. Пользуясь этой батареей, Дэви провел ряд экспериментов, с помощью которых установил световые и тепловые действия тока. Результаты своих опытов Дэви опубликовал в 1812 г.

Вот как он описывает полученную им электрическую дугу: «Когда два куска древесного угля в 1 дюйм длины и $\frac{1}{8}$ дюйма в поперечнике были сближены между собою на расстоянии $\frac{1}{30}$ или $\frac{1}{40}$ дюйма (будучи включены в цепь), то получилась яркая искра и угли больше чем на половину накалились добела. Когда же затем концы углей начали раздвигаться, то между ними происходил постоянный разряд через накаленный воздух на расстоянии, по крайней мере, 4 дюймов в виде необыкновенно блестящей световой дуги конической формы, обращенной выпуклостью вверх. Любое вещество, введенное в дугу, тотчас же накалялось; платина расплавилась в этом пламени также легко, как воск в пламени обыкновенной свечи. . . Когда полюсы батареи были соединены в разреженном воздухе, то расстояние, при котором получились разряды, могло быть увеличено соразмерно степени разрежения. Когда последнее достигало $\frac{1}{4}$ дюйма ртутного давления, искры перескакивали на расстояние до $\frac{1}{2}$ дюйма, а при удалении полюсов на 6—7 дюймов разряды происходили в виде необычайно красивой пурпуровой струи света».

Как видим, опыты Дэви представляют повторение опытов, проведенных за 9—10 лет до него В. В. Петровым.

В заключительной части своего «Известия» Петров пишет: «Я надеюсь, что просвещенные и беспристрастные физики по крайней мере некогда¹ согласятся отдать трудам моим ту справедливость, которую важность сих последних опытов заслуживает».

Действительно, признание пришло «некогда». Только через 100 лет после его смерти, при советской власти, было отдано должное его трудам. Постановлением ЦИК СССР от 8 июня 1935 г. восстановлен приоритет В. В. Петрова — «первого русского электротехника, открывшего в 1802 г., за несколько лет до Дэви, явление вольтовой дуги и предсказавшего применение этого явления в технике».

Советская власть приняла соответствующие меры для увековечения памяти В. В. Петрова.

В первые годы после открытия электрическая дуга вызвала большой интерес, однако в дальнейшем внимание ученых к этому явлению значительно ослабло. Только по истечении 60—70 лет интерес к дуговому разряду возрос в связи с исполь-

¹ Курсив В. В. Петрова.

зованием его для искусственного освещения. Особенно большой интерес вызвал дуговой разряд в связи с изобретением «свечи» Яблочкова.

Однако и в этот период изучался только внешний эффект дугового разряда как источника света.

Переломным моментом в области изучения электрической дуги следует признать исследования Г. Айртон, в результате которых в 1902 г. появилась ее монография об электрической дуге, содержащая описание всех основных явлений, связанных с внешним эффектом дугового разряда, и первые попытки его математической интерпретации.

Первые во времени исследования, посвященные физическим процессам, протекающим в дуговом разряде, были проведены В. Ф. Миткевичем. В 1905 г. им опубликована диссертация о природе явлений, протекающих в столбе и пограничных областях дуги. Выводы В. Ф. Миткевича легли в основу современной теории дугового разряда.

Дальнейшее развитие теории электрической дуги связано с бурным развитием электрической сварки, электрических печей, выпрямительных устройств и коммутационной аппаратуры.

Несмотря на такое глубокое проникновение электрической дуги в технологию ряда промышленных производств, теория горения дуги изучена недостаточно и сведения о физических процессах горения дуги иногда излагаются бессистемно или в отрыве от производственных процессов. Вследствие этого возможности такого мощного технологического фактора, как электрическая дуга, далеко не исчерпаны. Поэтому ниже излагаются основные теоретические вопросы горения дуги и перспективы его применения в электрометаллургии.

2. Виды электрических разрядов в газах

Электрическая дуга, или дуговой разряд, представляет собой один из видов электрических разрядов в газах. По своему характеру и внешним признакам разряды в газах весьма разнообразны и к ним относится обширная область физических явлений.

Для того чтобы показать, какое место среди электрических разрядов в газах занимает дуговой разряд, здесь приведена их краткая характеристика.

Все электрические разряды в газах обычно делят на две группы: несамостоятельные и самостоятельные.

Электрический разряд называется несамостоятельным, если для его поддержания требуется образование в разрядном промежутке заряженных частиц под действием внешних факторов—ионизаторов.

Все виды электрических разрядов, существование которых не обусловлено внешними ионизаторами, называют самостоятельными.

По характеру физических процессов, протекающих в разрядном промежутке, обычно различают следующие виды разрядов: *электронный, темный (таунсендовский, или тихий), тлеющий и дуговой*.

Электронным называется разряд, в котором в качестве заряженных частиц участвуют в основном электроны. Электронные разряды происходят в трубках при весьма высоком вакууме.

Темным называется разряд, при котором электрическое поле в разрядном промежутке определяется в основном потенциалами пограничных поверхностей и пренебрежимо мало искажается объемными зарядами.

Темный самостоятельный разряд характеризуется малым разрядным током и малой интенсивностью свечения. Плотность тока в таком разряде обычно не превышает 10^{-6} А/см².

В *тлеющем* разряде электрическое поле разрядного промежутка в основном определяется величиной и расположением объемного заряда, кроме того, тлеющий разряд характеризуется катодным падением потенциала, значительно превосходящим потенциал ионизации газа, и испусканием электронов катодом под действием удара о него тяжелых частиц.

Характерной особенностью тлеющего разряда является существование в нем ряда областей с различной степенью свечения газов. Плотность тока тлеющего разряда значительно больше, чем тихого разряда, и достигает 10^{-4} — 10^{-2} А/см².

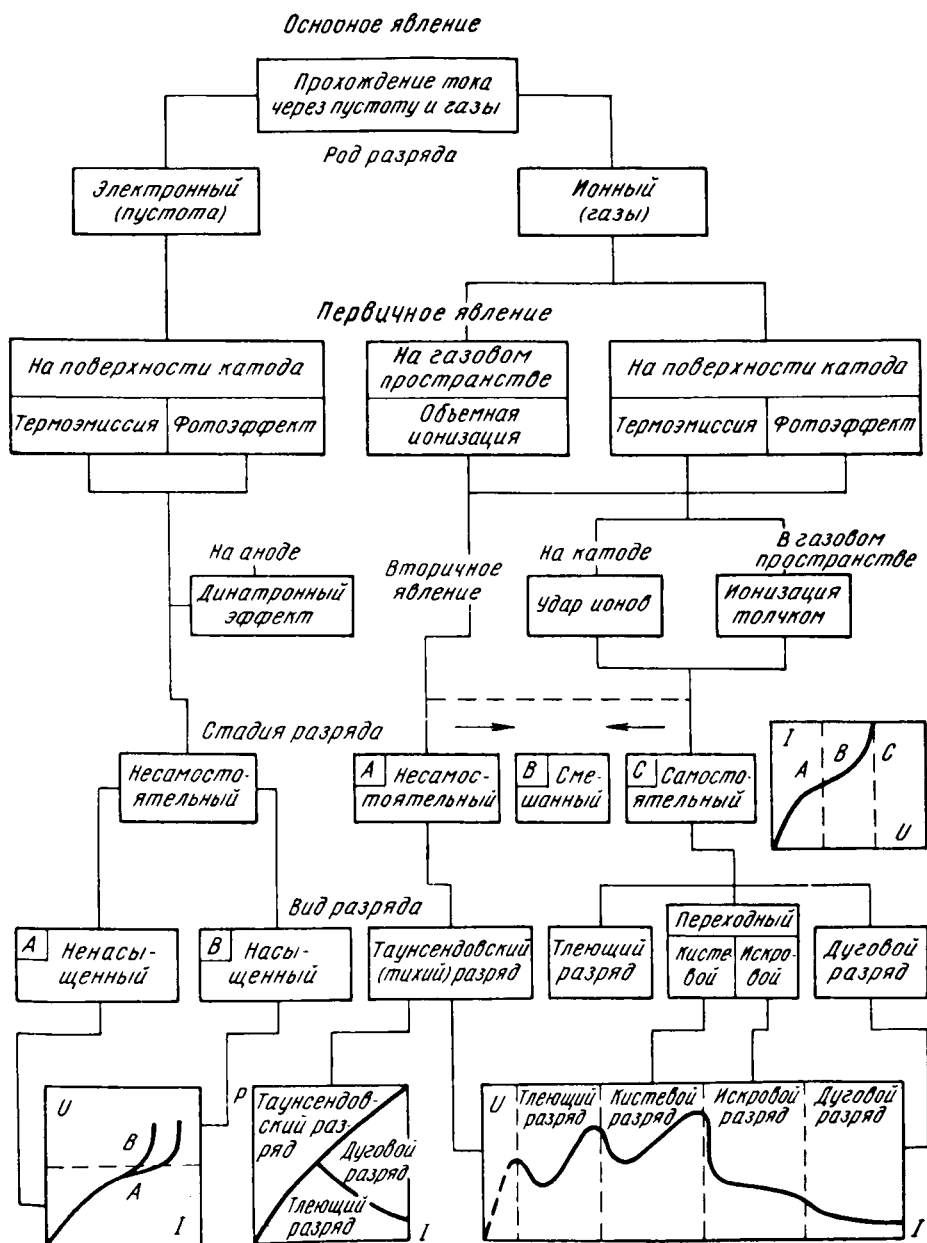


Рис. 2. Классификация разрядов в пустоте и газы

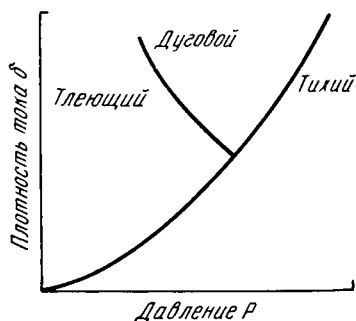


Рис. 3. Области тихого, тлеющего и дугового разряда

разрядами отдельных видов существуют переходные формы, а некоторые виды разрядов просто не укладываются в классификацию из-за их специфических свойств (как например, высокочастотные и сверхвысокочастотные разряды, которые протекают в замкнутом газовом объеме в высокочастотных электромагнитных полях без участия в разряде электродов).

В литературе встречаются различные классификации электрических разрядов. Наиболее полную классификацию газовых разрядов дает Н. А. Капцов [12]. В основу его классификации положены электрические процессы в объеме разрядного газа. По этому признаку определяют тип и область разряда. Для каждого типа дана характеристика элементарных процессов в пограничной области разряда и объяснена роль объемного заряда в процессе его протекания.

На рис. 2 приведена более краткая классификация электрических разрядов. В этой классификации разряды различают по роду среды, в которой протекает разряд, по явлениям на катоде и по стадиям развития разряда.

Вопрос о виде (или типе) разряда, устанавливающегося при определенных условиях газовой среды и определенных параметрах электрического контура, в котором протекает разряд, имеет большое значение для практики. Зависимость типа разряда от указанных внешних условий очень сложна и к тому же не однозначна. Дело в том, что форма разряда зависит еще и от его предыстории, т. е. от последовательности пройденных газом энергетических и электрических состояний. Тем не менее, внимательное ознакомление с вопросом показывает, что действует ряд факторов, обуславливающих появление того или другого вида разряда.

При изменении этих факторов разряд переходит из одной формы в другую. Решающими факторами являются плотность разрядного тока и давление газа. На рис. 3 представлены области различных видов разрядов в зависимости от этих двух факторов.

Как видно из этого рисунка, тлеющие разряды могут существовать при малых давлениях и высоких плотностях тока, и, наоборот, тихие разряды возникают при больших давлениях.

Дуговой разряд характеризуется как высокими плотностями токов, так и высокими давлениями.

Из рис. 3 также следует, что при одной и той же плотности тока могут существовать в зависимости от давления разряды всех трех видов, но при снижении плотности тока ниже предельной величины существование или возникновение дуги становится невозможным.

Обычно дуговой разряд развивается из тлеющего разряда, но может возникнуть и независимо от него.

Так как самостоятельные разряды характеризуются величиной катодного падения потенциала и величиной тока, проследим, как меняются эти величины при переходе от тлеющего разряда к дуговому.

Пусть между двумя тугоплавкими электродами в инертной газовой среде протекает тлеющий разряд. Станем увеличивать разрядный ток, меняя внешнее сопротивление разрядного контура. По мере увеличения тока напряжение сначала будет

Полный ток разряда в зависимости от площади электродов колеблется в довольно широких пределах; например, в обычных тлеющих лампах он составляет 1—10 мА.

Дуговой разряд характеризуется малым катодным падением потенциала и высокой плотностью разрядного тока. Электрическое поле в его разрядном промежутке определяется в основном величиной и расположением в разрядном промежутке объемных зарядов. Дуговой разряд возможен как при термоэлектронной, так и при автоэлектронной эмиссии.

В этой классификации виды разрядов расположены в той последовательности, в которой обычно один разряд переходит в другой. Такая классификация не может претендовать на полноту, так как между

оставаться постоянным, а занятая разрядом часть поверхности катода расти. После заполнения разрядом всей поверхности катода напряжение между электродами начнет повышаться и, достигнув некоторого максимума, снова резко упадет. В точке максимума напряжения начнется переход от тлеющего разряда к дуговому.

На рис. 4 показан ход изменения катодного падения напряжения в зависимости от тока для одного из видов такого переходного режима.

Критическое (максимальное) напряжение наступает при токе порядка 0,01 А.

Переходу тлеющего разряда в дуговой дан ряд объяснений. Все они сводятся к тому, что при переходе тока через критическое значение в области катода появляются дополнительная ионизация и термоэлектронная эмиссия.

Не будем подробно останавливаться на анализе перехода тлеющего разряда в дуговой, так как происхождение дуги в электропечах, с которой мы имеем дело, иное.

Если привести в соприкосновение два электрода, а потом раздвинуть их, то между ними образуется дуговой разряд. При раздвижении электродов сопротивление в точках контакта растет, выделяющаяся в контакте, и температура в нем достигает такой большой величины, что в месте контакта возникает дуга.

Таков обычно характер возникновения электрической дуги во всех выключающих устройствах электрических цепей.

Так же возникает электрическая дуга в электропечах. При первоначальном пуске печи обычно под электрод подкладывают куски кокса или электродного лома и замыкают цепь. По мере нагревания и обгорания кокса и конца электрода в отдельных точках возникают маленькие дуги, которые затем развиваются в общую дугу под электродом.

При повторных включениях печи, находящейся уже в эксплуатации, дуга возникает по-разному. Если печь была отключена на небольшой промежуток времени

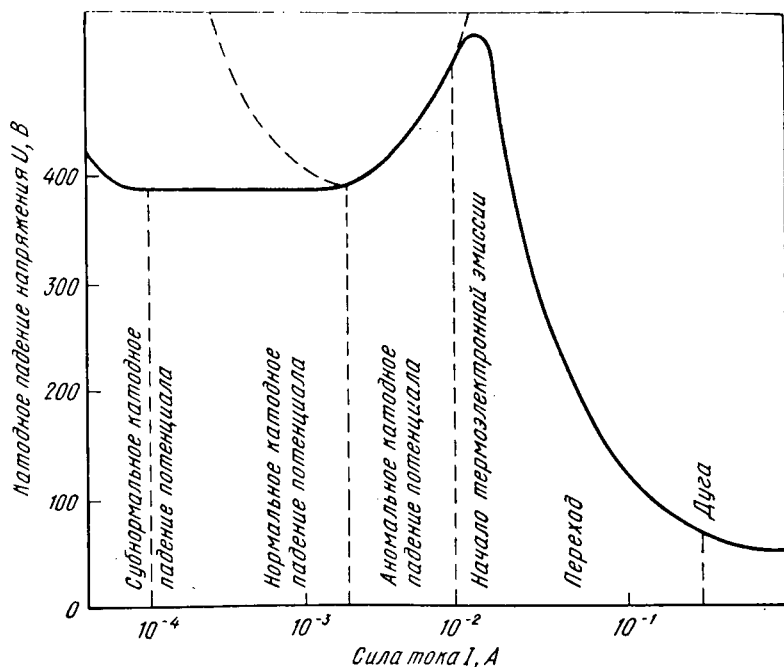


Рис. 4. Зависимость катодного падения напряжения от тока при переходе от тлеющего разряда к дуговому

и в тигле ванны сохранилась достаточно высокая температура, то с пуском печи, с углублением электрода в тигель появляются токи проводимости, стенки тигля быстро разогреваются и создаются благоприятные условия для горения дуги.

Если же печь простояла долго, то обычно снижают напряжение и длительно держат печь под током шихтовой проводимости для постепенного разогрева ванны и установления благоприятных условий горения мощной дуги. Подробнее эти вопросы будут рассмотрены ниже.

3. Классификация дуговых разрядов

Понятие «дуговой разряд» охватывает все виды электрических разрядов, которые характеризуются большой плотностью тока и малым катодным падением потенциала, не превосходящим нескольких десятков вольт.

Дуговые разряды настолько разнообразны, что их трудно включить в одну общую классификацию. Их классифицируют обычно по различным признакам.

По явлениям на катоде дуговые разряды делят на дуги с холодным катодом и горячим катодом.

При холодном катоде дуга поддерживается электростатической (автоэлектронной) эмиссией, поэтому ее иногда называют *автоэлектронной дугой*.

При разряде с горячим катодом дуга поддерживается термоэлектронной эмиссией, поэтому ее иногда называют *термоэлектронной*, или *термической дугой*.

По роду среды, в которой происходит дуговой разряд, различают *дуги в вакууме, газах и парах*.

Дуга в газах возникает в тех случаях, когда электроды тугоплавки и не принимают участия в образовании газообразной среды, в которой протекает разряд.

Если же в процессе горения дуги сами электроды испаряются и создают атмосферу разрядного промежутка, то разряд называется *дугой в парах*.

По внешнему признаку дуги делят на длинные и короткие.

Если катод и анод настолько удалены друг от друга, что тепловой режим одного из них не влияет на тепловой режим другого, дуга называется *длинной*. Если же электроды настолько сближены, что они находятся в тесном тепловом взаимодействии друг с другом, дуга называется *короткой*.

Существует также деление дуг по явлениям на аноде, по конструкции катода и т. д.

Дуга в электропечах в большинстве случаев относится к дугам с горячим катодом, так как все процессы в электропечи протекают при весьма высоких температурах не только электродов, но и всего объема тигля, в котором возникают газовые разряды. Следовательно, в печной дуге должна обязательно происходить термоэлектронная эмиссия. Но, как увидим далее, специфическая структура столба отличает печную дугу от других дуг с горячим катодом.

Электрическая дуга в печи горит между угольным или металлическим электродом и поверхностью сплава. Электрод принимает

пассивное участие в создании разрядной атмосферы. Совершенно по-другому ведет себя другой электрод—сплав. Температура плавления и испарения всех элементов, входящих в сплавы (кальция, марганца, кремния и т. д.), ниже температуры дуги, поэтому атмосферу дуги создают пары элементов сплава. Следовательно, печные дуги должны быть отнесены к разряду дуг в парах, а не в газах.

Наконец, длина дуги в печах настолько велика, что тепловые режимы непосредственно в областях катода и анода почти независимы один от другого. Значит, печная дуга должна быть отнесена к типу длинных дуг.

Итак, печная дуга может быть охарактеризована как длинная термическая дуга в парах со специфическим строением столба.

Дуга может возникнуть между электродами и при высоком вакууме. После своего возникновения такая дуга горит в парах, возникающих в результате горения дуги. Поэтому основной проблемой вакуумной дуги является процесс ее зажигания.

4. Общее описание дугового промежутка

На рис. 5 приведена электрическая схема, при помощи которой можно получить электрическую дугу постоянного тока. Она состоит из источника постоянной э. д. с. $E_{\text{ц}}$, регулируемого сопротивления контура $r_{\text{к}}$ и двух электродов — катода, присоединенного к отрицательному полюсу источника, и анода, присоединенного к его положительному полюсу. Когда электроды находятся в соприкосновении друг с другом («замкнуты накоротко»), в цепи протекает ток I , определяемый величинами сопротивления $r_{\text{к}}$ и э. д. с. цепи $E_{\text{ц}}$. Пусть величины $E_{\text{ц}}$ и $r_{\text{к}}$ подобраны так, что при атмосферном давлении сила тока в цепи I превышает 0,5 А.

Если раздвигать электроды, то при нарушении контакта между ними возникает проводящий слой, состоящий из раскаленных частиц воздуха и паров оплавившихся частиц электродов. Этот проводящий слой и представляет собой дуговой разряд. При этом ток в цепи уменьшается, так как последовательно с сопротивлением $r_{\text{к}}$ будет включено сопротивление проводящей дуги $r_{\text{д}}$.

При математическом описании процесса формальной разницы между $r_{\text{к}}$ и $r_{\text{д}}$ нет. Цепь, содержащую дугу, можно заменить эквивалентной схемой, приведенной на рис. 6, и силу тока в цепи определить из уравнения

$$I = E_{\text{ц}} / (r_{\text{к}} + r_{\text{д}}). \quad (\text{II-1})$$

Как известно, почти любое электрическое сопротивление в определенной степени зависит от тока и напряжения и, следовательно, является нелинейным элементом. Вопрос этот подробно будет рассмотрен ниже. Здесь же заметим, что сопротивление электрической дуги характеризуется весьма высокой степенью нелинейности и в зависимости от характера разряда очень быстро может меняться по величине от долей ома до бесконечно большой величины.

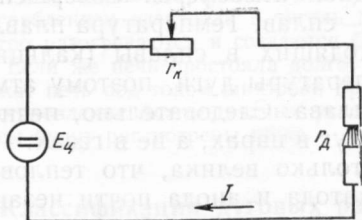


Рис. 5. Электрическая схема возбуждения дуги

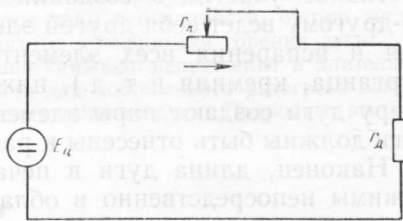


Рис. 6. Эквивалентная схема дугового контура



Рис. 7. Фотография дуги в мощной сталеплавильной печи

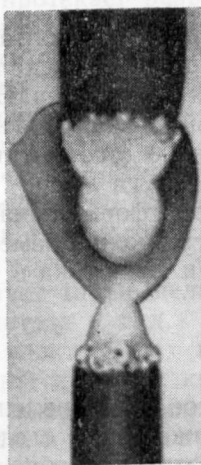


Рис. 8. Фотография дуги в воздухе

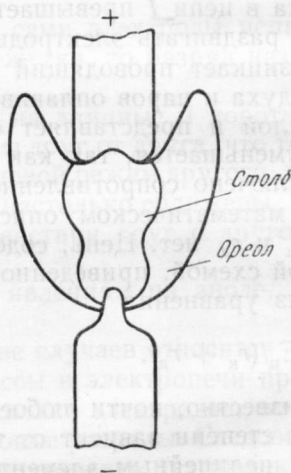


Рис. 9. Схема характерных областей дуги

На рис. 7 приведена дуга в мощной сталеплавильной печи, а на рис. 8 — общеизвестная фотография дуги, горящей между угольными электродами.

Дуговой разряд состоит из ионизированной газовой среды, по которой протекает ток — разрядного промежутка, и ограничивающих поверхностей. У основания разрядного промежутка ограничивающими поверхностями являются электроды — катод у отрицательного основания и анод у положительного.

Боковую поверхность разрядного промежутка представляют раскаленные газы («ореол»), не принимающие участия в прохождении тока.

За «ореолом» следует нейтральная ограничивающая среда (газовая, жидкая или твердая).

Наблюдения показывают, что при длительном горении дуги катод срабатывается под конус, а у анода в центральной его части образуется углубление. На рис. 9 изображено строение дугового разряда.

Строение разрядного промежутка довольно сложное. Непосредственно к катоду прилегает катодная область разрядного промежутка. Длина этой области очень мала (порядка 10^{-5} см) и не зависит от общей длины разрядного промежутка. В катодной области протекают процессы электризации элементарных частиц.

В центре катодной области расположено катодное пятно. Оно представляет собой яркий светящийся участок, через который ток проникает в катод. Плотность тока в катодном пятне значительно больше, чем в окружающих областях поверхности катода.

Непосредственно к катодной области примыкает столб разряда. Это — самая длинная часть разрядного промежутка. Столб разряда состоит из газовой среды, содержащей заряженные частицы, осуществляющие прохождение тока через дугу. В столбе разряда происходит трансформация основной части электрической энергии в тепловую.

За столбом разряда расположена анодная часть разрядного промежутка. Эта область прилегает непосредственно к аноду. Ее длина также очень мала и не зависит от длины разрядного промежутка.

Теперь кратко опишем сравнительно лучше изученные дуги при малых токах и одновременно приведем соображения о печных дугах, в которых токи достигают нескольких десятков и даже сотен кА.

На поверхности катода дуга обычно сосредоточивается на определенной, довольно резко очерченной площадке — катодном пятне. На угольном электроде катодное пятно при устойчивом горении дуги находится почти в неподвижном состоянии, в то время как на металлических электродах оно все время перемещается. Плотность тока на катоде меняется в весьма широких пределах и зависит от материала электродов, среды, в которой горит дуга, давления и т. д.

В табл. 1 приведены плотности токов для разных электродов и среды при малых значениях токов.

ПЛОТНОСТЬ НА КАТОДНОМ ПЯТНЕ ДУГИ

Материал катода	Газ	Плотность тока, А/см ²		Общая сила тока, А
		электронного	ионного	
Уголь	Воздух Азот	470	65	1,5—10 4—10
		500	70	
Железо	Азот	7 000	—	20
Медь	Воздух Вакуум	3 000	600	20 15—30
		14 000	—	
Ртуть	Вакуум	4 000	—	5—40

При уменьшении давления катодное пятно начинает увеличиваться и плотность тока на нем уменьшается.

Определение размеров катодных пятен при более высоких значениях токов было проведено К. К. Хреновым в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР. В первой серии этих опытов были использованы графитовые электроды. Катод имел квадратное сечение 17×17 мм, а анод — круглое сечение диаметром 75 мм. При напряжении дуги 40—50 В сила тока менялась от 60 до 600 А. Средняя плотность тока на катоде при 100 опытах получилась 2800 А/см² с максимальными отклонениями 2340—3570 А/см². Большинство результатов измерений укладывалось в интервале 2700—2900 А/см².

Во второй серии опытов был определен диаметр анодного пятна. По 43 опытам средняя плотность анодного тока составила 300 А/см² при разбросе точек от 200 до 400 А/см².

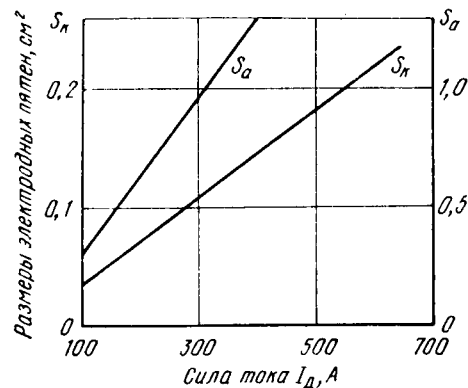


Рис. 10. Зависимость размеров электродных пятен от силы тока

На рис. 10 приведены результаты испытаний К. К. Хренова. Они показывают, что с увеличением силы тока площадь электродных пятен (S_a — анода и S_k — катода) растет прямо пропорционально силе тока дуги.

Отметим еще одно обстоятельство, вытекающее из опытов К. К. Хренова. Так как плотность катодного тока примерно в девять раз больше плотности анодного, то площадь катода во столько же раз меньше

площади анода и, следовательно, ствол дуги должен иметь коническую форму.

Как известно, катодное пятно имеет резко очерченный контур. Эта резкость очертания катодного пятна объясняется температурными условиями на катоде. Так как излучение пропорционально четвертой степени абсолютной температуры, а термоэлектронная эмиссия находится в экспоненциальной зависимости от нее (закон Ричардсона), то при данном изменении температуры пятна получается весьма резкое изменение как излучения, так и термоэлектронной эмиссии с катодного пятна. На рис. 11 приведены кривые распределения температуры для катодного пятна одной дуги.

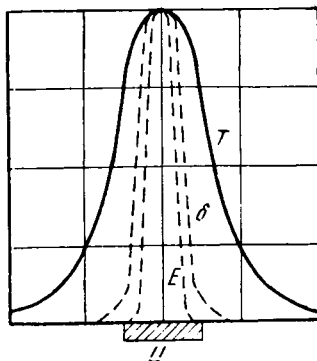


Рис. 11. Распределение температуры T катодного пятна, яркости свечения E и плотности тока j термоэлектронной эмиссии в области катодного пятна

Как же обстоит дело с катодным пятном в печной дуге? В большинстве руднотермических печей дуга горит под шихтой, что исключает визуальные наблюдения. Но в сталеплавильных печах, где условия горения примерно такие же, как и в руднотермических, можно наблюдать за дугой. Эти наблюдения показывают, что дуга в печи горит не по всему торцу электрода, а сосредоточивается в определенной, вполне ограниченной его площади. Следовательно, и в данном случае образуется катодное пятно. Определение площади пятна в сталеплавильных печах представляет большие экспериментальные трудности. Ниже приведены некоторые данные о такой дуге и дана их оценка.

В рассматриваемых печах катодом поочередно являются угольный электрод и сплав или металл в жидком виде; горение дуги происходит примерно при атмосферном давлении, и катод не подвергается резкому охлаждению. Благодаря этому термоэлектронная эмиссия должна распространиться на большую площадь основания дуги и, следовательно, плотности тока на катоде должны быть сравнительно невелики. Если и для мощных электропечей принять плотность тока по аналогии с маломощной дугой ~ 500 А/см², то для катодных пятен получаем необычно большие размеры. Так, для сталеплавильной печи емкостью 3 т при силе тока 4 кА получаем катодное пятно площадью до 8 см². Для мощной руднотермической печи при силе тока 30 000—40 000 А площадь катодного пятна должна составить ~ 60 —80 см². Диаметр катодного пятна получается при этом равным ~ 9 —10 см.

Если для расчета катодных пятен принять плотности тока по опытам К. К. Хренова, площади катодных пятен уменьшатся в 5—6 раз, но и в этом случае их размеры будут значительными. При силе тока 4000 А площадь катодного пятна будет $\sim 1,5$ см², а при силе тока 30 000—40 000 А она возрастет до 10—15 см².

Не надо забывать, что даже в этом случае площадь анодного пятна будет в девять раз больше, т. е. ~ 100 —130 см². Таким обра-

зом, можно сделать вывод, что столб мощной печной дуги должен опираться, по крайней мере одним своим концом, на значительную площадь.

Для иллюстрации этого положения на рис. 12 приведены результаты экспериментального исследования пятна дуги [44].

Очень важным фактором для суждения о строении дуги в руднотермической электропечи является конфигурация огарков электрода. Горец электрода обычно обгорает довольно равномерно, а диаметр торца всего на 10—15% меньше расчетного диаметра электрода. На поверхности торца в определенном закономерном порядке расположены углубления. Обычно число углублений соответствует числу ребер кожуха электрода. На ферросплавных печах мощностью 7500 кВА, например, на кожухе предусмотрено десять ребер и на торце наблюдается по десяти углублений, расположенных под следами обгоревших ребер на расстоянии 10—15 см от периферии электрода. Диаметр углублений равен ~ 10 см. Образование этих углублений понятно. В верхней зоне электрода, где кожух и ребра целы, ток течет по железу кожуха. Вблизи же торца, вследствие высокой температуры, ребра оплавляются, и ток, переходя в тело электрода или в дугу, создает эти глубокие очаги. Естественно, что эти очаги и являются началами дуги на электроде.

Простой расчет показывает, что все эти пятна расположены в непосредственной близости друг к другу и почти сливаются, однако между отдельными очагами все же существуют зазоры.

В рассматриваемом примере диаметр всего пространства, занятого дугой, составляет 50—60 см. Как мы увидим ниже, примерно к такому же размеру диаметра дуги приводят и энергетические расчеты.

Расположению всех катодных пятен в непосредственной близости друг к другу способствует и явление сжатия.

На рис. 13 показан снимок конца электрода, обрубленного после его обрыва. На снимке ясно видны углубления, образовавшиеся в результате оплавления ребер кожуха печи и последующего горения дуг.

Непосредственно к поверхности катода прилегает область катодного падения напряжения. Как было отмечено, протяженность этой области составляет величину порядка 10^{-5} см. При абсолютной величине катодного падения напряжения, не превосходящего 8—10 В, в этой области создаются градиенты напряжения, достигающие 10^6 В/см.

Видимо, по строению этой области дуга в электропечи ничем не отличается от дуговых разрядов других типов.

Для дуги, горящей при атмосферном давлении у электродов (как у анода, так и у катода), обычно образуются так называемые «пламена». Все пространство между электродами занято ярко светящимися газами, в которых протекают различные химические реакции. Пламена у электродов и ореол представляют собой раскаленные массы газов, в которых также происходят различные химические реакции между составными частями газов.



Рис. 12. Поведение электрической дуги над жидкой ванной в 25-т печи в три различных момента (а—в) одного и того же периода



Рис. 13. Обрубок электрода ферросплавной печи со следами оплавления ребер кожуха и горения дуги

Центральную часть дуги составляет ее столб, который заканчивается анодным пространством в непосредственной близости к аноду.

Очертания торца электрода и столба дуги легко просматриваются в сталеплавильной печи в период рафинирования.

В это время дуга имеет весьма устойчивый характер, горит длительно и спокойно, сохраняя свои размеры (длину и поперечное сечение); электроды же стоят почти неподвижно.

5. Распределение потенциала в дуговом промежутке

Экспериментальное исследование распределения потенциала вдоль дуги представляет громадные трудности по двум причинам: с одной стороны, некоторые характерные области дугового разряда, как например, область катодного падения потенциала, имеют весьма малые линейные размеры; с другой стороны, в области дуги существуют высокие температуры, что затрудняет применение такого эффективного метода измерений, как метод зондов.

На рис. 14 приведена примерная картина распределения напряжения в дуге. Здесь AB — катодная часть разрядного промежутка, BC — столб разряда, CD — анодная часть.

Соответственно этим областям на оси ординат показано падение потенциала в катодной части, столбе и анодной части.

Длины отдельных областей показаны без соблюдения масштаба, так как участки AB и CD характеризуются значительно меньшими размерами, чем участок BC .

Анодное и катодное падения потенциалов не зависят ни от длины дуги, ни от величины общего напряжения, приложенного к разрядному промежутку. Статистические материалы показывают, что сумма обоих этих потенциалов приблизительно равна потенциалу ионизации газа или пара, в котором происходит разряд. Таким образом, разность потенциалов столба близка к разности приложенного к дуге напряжения и потенциала ионизации.

При нормальном горении дуги продольный градиент поля в столбе — величина постоянная, что указывает на отсутствие объемных зарядов в столбе.

На рис. 14 даны три кривые распределения потенциалов в дуговом промежутке при различном давлении. Как показывают эти кривые, с увеличением давления общий уровень напряжения дуги растет, но характер распределения потенциала между отдельными участками дуги сохраняется.

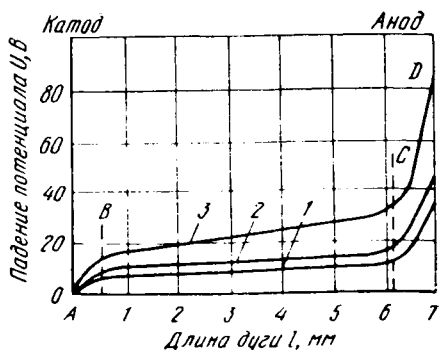


Рис. 14. Распределение напряжения в дуге при различном давлении, мм рт. ст.:

1 — 2; 2 — 10; 3 — 16

6. Прохождение тока через дугу

Характер прохождения тока в области катода у дуг с холодным и горячим катодом различен. Рассмотрим каждую из этих дуг в отдельности.

В дуге с горячим катодом выход электронов с катода объясняется термоэлектронной эмиссией. Электроны, вылетая из катода, ускоряются сильным электрическим полем в области катодного падения потенциала и начинают ионизировать атомы газа, окружающего катод. Ионизация происходит в слое газа, находящемся от поверхности катода на расстоянии, равном примерно одному свободному пробегу электрона.

Образующиеся при этом положительные ионы под действием электрического поля устремляются к катоду. Полученную в электрическом поле энергию ионы при столкновении отдают катоду и тем самым поддерживают его температуру на уровне, необходимом для термической ионизации.

Ионизация слоя газа непосредственно за областью катодного падения потенциала приводит к образованию такого количества свободных электронов, что они могут осуществлять перенос тока. Отсюда и начинается столб дуги. Так как в столбе градиент потенциала постоянен, то заряды в нем должны быть скомпенсированы. Следовательно, число ионов в столбе должно приблизительно равняться числу движущихся по нему электронов. Но при равном числе положительных ионов и электронов плотности токов, пере-

носимых ими, будут зависеть от их подвижности. Так как подвижность электронов во много раз больше подвижности ионов, то можно сделать вывод, что почти 99% тока в столбе должно переноситься электронами. В действительности же, как увидим в дальнейшем, соотношение между электронной и ионной составляющими тока получается иное.

В столбе дуги происходят явления рекомбинации и диффузии, что приводит к уменьшению числа свободных заряженных частиц. Убыль последних компенсируется тепловой ионизацией в самом столбе. Помимо этого, столб теряет энергию вследствие теплопроводности, излучения и конвекции.

Так как основным источником энергии, выделяющейся в столбе, является электрическое поле, градиент потенциала в столбе должен быть таким, чтобы энергия, выделяющаяся в единице длины столба, могла покрывать тепловые потери столба и поддерживать температуру последнего на уровне, достаточном для термической ионизации. Это играет весьма важную роль в механизме печной дуги.

Переход тока из столба на анод происходит через концентрированное светящееся пятно, внешне похожее на катодное.

При высоких температурах в дуге переход тока на анод обычно сопровождается испарением материала анода.

Рассмотрим теперь условия возникновения дуги при электростатической эмиссии с катода.

Если у поверхности катода создать электрическое поле напряженностью в 10^6 — 10^8 В/см, то катод начинает эмитировать электроны. Эта эмиссия в достаточно широких пределах не зависит от температуры и называется холодной, или электростатической.

Для создания таких полей необходима высокая концентрация положительных объемных зарядов в непосредственной близости к катодному пространству. Условием возникновения таких высоких концентраций зарядов является прежде всего большая плотность газов или паров, окружающих катод. Как указывают некоторые авторы, плотность атмосферного воздуха на катоде не всегда достаточна для электростатической эмиссии и, по-видимому, образование дуги с холодным катодом всегда связано с испарением катода.

Подробнее с обоими видами эмиссии познакомимся позже; здесь лишь отметим, что типичной дугой с «холодным» катодом, т. е. с электростатической эмиссией, является ртутная дуга, а термоэлектронной дугой — дуга между угольными электродами в воздухе.

В ряде случаев трудно отличить термоэлектронную дугу от дуги с электростатической эмиссией.

В электропечи один электрод всегда угольный, второй представляет собой жидкий металл. Температура в тигле, а следовательно, и на электродах всегда очень высока; это значит, что процесс термоэлектронной эмиссии в печной дуге должен быть всегда явно выражен.

Поэтому мы и определили выше печную дугу как термоэлектронную. Следует, однако, подчеркнуть, что при давлениях несколько выше атмосферного в печной дуге имеет место также электростати-

ческая эмиссия, чему благоприятствуют большие плотности токов дуги.

Столб и анодное пространство термоэлектронной и электростатической дуг мало отличаются друг от друга.

Характер протекания тока в дуге в основном определяется физическими процессами, проходящими на границе электродов с разрядным промежутком и в самом разрядном промежутке. Поэтому остановимся подробнее на этих процессах.

7. Катодная область дуги

Выше мы определили печную дугу как термоэлектронную, полагая, что ток у катода в основном поддерживается термоэлектронной эмиссией.

Рассмотрим теперь этот вопрос несколько подробнее.

Впервые мысль о термоэлектронной эмиссии с катода электрической дуги была высказана В. Ф. Миткевичем в 1905 г. Им же были поставлены опыты, которые подтвердили эту мысль.

В настоящее время явление термоэлектронной эмиссии изучено достаточно хорошо. Зависимость между плотностью тока эмиссии и температурой выражается формулами:

$$\delta = a_1 T^{1/2} \cdot e^{-\frac{b_1}{T}}, \quad (\text{II-2})$$

$$\delta = A_1 T^2 e^{-\frac{B_1}{T}}. \quad (\text{II-3})$$

где

δ — плотность тока эмиссии, А/см²;

T — абсолютная температура, К;

e — основание натуральных логарифмов;

a_1, b_1, A_1, B_1 — постоянные, зависящие от вещества катода.

Первая из этих формул была предложена Ричардсоном, вторая представляет собой дальнейшее развитие первой и выведена Дешменом. Несмотря на то, что в первую формулу входит множитель $T^{1/2}$, а во вторую T^2 , разница в результатах расчетов получается небольшая, так как зависимость плотности тока от температуры в основном определяется степенным множителем. Практически обе эти формулы равноценны. В табл. 2 приведены постоянные электронной эмиссии для некоторых элементов.

ТАБЛИЦА 2

ПОСТОЯННЫЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Элементы	a_1	$b_1 \cdot 10^4$	A_1	$B_1 \cdot 10^4$
Уголь	$2,37 \cdot 10^6$	4,87	5,93	4,57
Кальций	$1,74 \cdot 10^4$	3,65	0,12	3,50
Вольфрам	$1,05 \cdot 10^7$	5,30	60,2	5,27

Формулы, характеризующие электронную эмиссию, показывают, что с увеличением температуры ток эмиссии растет очень быстро. Так, например, для вольфрамового катода в вакууме плотность тока эмиссии при 1500 К составляет всего 10^{-7} А/см², а при температуре 3500 К повышается до 225 А/см², т. е. увеличивается более, чем в 10^9 раз.

В печной дуге, как правило, одним электродом является уголь, а вторым — жидкий сплав. Многочисленные измерения показывают, что при угольной дуге в области катода господствует высокая температура. Так, например, для угольной дуги в атмосфере азота температура катода составила $\sim 3600^\circ\text{C}$, что соответствует току эмиссии от 500 до 800 А/см². Можно было бы привести и другие примеры, показывающие более широкий диапазон колебаний плотности тока эмиссии.

Следует указать, что формулы термической эмиссии нужно применять с большой осторожностью. Действительно, в приведенных формулах не учтены специфические свойства дуги и прежде всего большая роль, которую могут играть химические реакции. На роль химических реакций в дуговом разряде в свое время указывали П. Н. Яблочков и Д. И. Менделеев. В отношении мощной руднотермической дуги ряд выводов сделал М. С. Максименко.

К. К. Хренов, рассматривая сварочную дугу, также высказывает сомнение в чисто термоэлектронной природе освобождения электронов на катоде. Действительно, температура кипения большинства материалов, которые могут входить в состав сварочных электродов, низкая; исключения составляют углерод и железо; углерод «кипит» или расплывается при 4200, а железо — при 3500 К. Если и для катода дуги воспользоваться постоянными, приведенными в табл. 2, то при угольном катоде и 4200 К плотность тока эмиссии получается ~ 2000 А/см², а для железного катода при температуре, близкой к кипению, — всего только 194 А/см². Получающееся при этом несоответствие приводит К. К. Хренова к мысли, что в сварочной дуге явления на катоде нельзя исчерпывающе объяснить одной термоэлектронной эмиссией и наряду с последней должна происходить также электростатическая эмиссия.

В руднотермической печи условия горения дуги сильно отличаются от условий горения сварочной дуги. Печная дуга в тепловом отношении изолирована лучше сварочной, порядок величины токов тоже больше; ток печной дуги измеряется десятками тысяч ампер, в то время как ток сварочной дуги измеряется сотнями ампер. Поэтому температурные условия на катоде печной дуги, несомненно, должны быть лучше, чем на катоде сварочной дуги.

Как было отмечено, в руднотермической печи катодом служат поочередно угольный электрод и расплав.

При переменном токе в течение полупериода, когда катодом служит угольный электрод, по-видимому, условия для термоэлектронной эмиссии вполне благоприятны и она обеспечивает достаточную плотность тока для поддержания дуги. Но осциллограммы печной дуги показывают, что в течение второй полуволны тока,

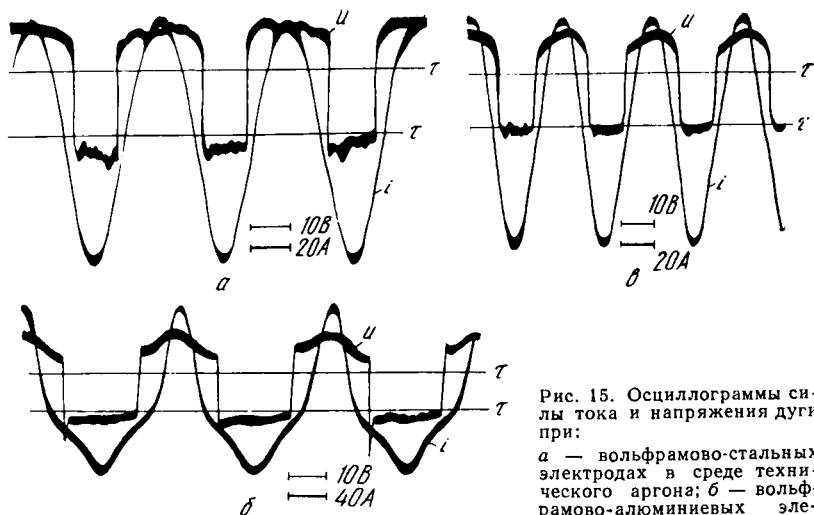


Рис. 15. Осциллограммы силы тока и напряжения дуги при:

а — вольфрамово-стальных электродах в среде технического аргона; *б* — вольфрамово-алюминиевых электродах; напряжение холостого хода $U = 220$ В; длина дуги 2,7 мм; *в* — вольфрамово-магневых электродах в техническом аргоне $U = 2000$ В; длина дуги 5,2 мм

когда катодом является расплав, дуга горит без значительного вентильного эффекта и, следовательно, в этой полуволне катод дает достаточно высокую эмиссию. В сварочной же дуге запирающий эффект почти всегда ясно выражен. Наличие постоянной составляющей тока и напряжения в сварочной дуге подтверждается рис. 15, *а—в*, на которых приведены три осциллограммы по данным А. Я. Бродского. На этих осциллограммах сняты сварочные дуги в аргоне. В качестве одного электрода во всех трех случаях служил вольфрам. Вторым электродом были сталь, алюминий и магний. Сравнительно с вольфрамом эти материалы характеризуются низкими точками плавления и испарения. Однако объяснить появление постоянной составляющей тока или напряжения дуги только этим едва ли возможно. Несомненно, низкие температуры плавления и испарения играют роль, но все же основная причина появления постоянной составляющей — усиленное охлаждение основания дуги, обусловленное перемещением дуги вдоль линии сварки. Отметим, кстати, что в случае устойчивой сварочной дуги во второй полуволне, когда вольфрам не является катодом, выделяющаяся мощность больше, чем в первой полуволне и, по-видимому, разница между ними идет на покрытие усиленных потерь в области катода.

В печной дуге тепловые условия и при неугольном катоде значительно лучше. Поверхность сплава, на которую опирается дуга, находится в жидком состоянии и непрерывно испаряется («кипит»). Так как тепловая изоляция сплава велика, то температура элементов сплава может быть выше температуры их кипения. Эмитирующее катодное пятно не обязательно должно находиться на твердой поверхности электрода. Эмиссия электронов может происходить с поверхности тонкого газового слоя, покрывающего поверхность

жидкого сплава. Температура слоя выше температуры самого сплава. Далее, как будет показано ниже, основание дуги испытывает давление со стороны столба дуги и при жидком состоянии катода (или анода) на последнем образуются углубления. Благодаря этому еще больше возрастает теплоизоляция жидкого сплава, на который опирается дуга, и повышается температура области катода. Поэтому вентильный эффект в печной дуге проявляется гораздо слабее, чем в сварочной.

Рассмотрим несколько подробнее процесс электростатической эмиссии.

Если к поверхности электрода приложить электрическое поле достаточно высокой напряженности, то эта поверхность начинает испускать электроны. Эмиссия при низкой температуре (до 1000°C) не зависит от температуры и поэтому ее иногда называют холодной, или электростатической, электронной эмиссией.

Напряженность поля, при которой начинается электростатическая эмиссия, зависит от материалов электрода и состояния его поверхности.

Плотность тока электростатической эмиссии можно подсчитать по эмпирической формуле.

$$\delta = a_2 E^2 e^{-\frac{b_2}{E}}, \quad (\text{II-4})$$

где E — напряженность поля, действующая у поверхности катода;

a_2, b_2 — постоянные, зависящие от остальных условий эмиссии.

При температуре $> 1000\text{ K}$ ток эмиссии уже не определяется этим уравнением и идет гораздо энергичнее. Для иллюстрации отметим, что плотность тока эмиссии для вольфрама при 1800°C в несколько раз больше, чем при 20°C .

Таким образом, если в области катода одновременно существуют оба благоприятствующих фактора — высокая напряженность поля и высокая температура, — то на катоде наблюдаются оба вида эмиссии. Плотность тока эмиссии в этом случае определяют по эмпирической формуле

$$\delta = A (T + c \cdot E)^2 \cdot e^{-\frac{b}{T + cE}}. \quad (\text{II-5})$$

При $T = 0$ она обращается в формулу электростатической эмиссии, а при $E = 0$ выражает плотность тока термоэлектронной эмиссии.

Конечно, не исключена возможность электростатической эмиссии в дуге руднотермической печи, но автор полагает, что тут она играет подчиненную роль.

В целом, механизм прохождения тока в области катода можно охарактеризовать следующим образом.

Электроны, вырываясь с поверхности катода, устремляются в катодное пространство. Получив там достаточное ускорение, они, при столкновении с нейтральными атомами и молекулами газа, ионизируют их. Если предположить, что электроны ионизируют

нейтральные частицы при первом же соударении, то толщина катодного пространства будет приблизительно равна длине свободного пробега электрона.

Таким образом, катодное пространство можно рассматривать как тонкий слой высокого вакуума, на одной границе которого (поверхность катода) расположен источник отрицательных зарядов — электронов, на второй — источник положительных зарядов — ионов.

Рассмотрим величины, входящие в уравнение (II-5).

Выше было отмечено, что в первом приближении катодную часть разрядного промежутка можно рассматривать как вакуум. При определении напряженности поля такое предположение уже не дает удовлетворительного результата. Подробное изучение процесса показывает, что напряженность поля в катодной части разряда

$$E = 4U_{\text{кат}}/3s, \quad (\text{II-6})$$

где $U_{\text{кат}}$ — падение потенциала в катодной части;
 s — толщина катодной части.

Если в первом приближении принять s равной длине свободного пробега электрона, то формула для напряженности поля приобретает вид

$$E = 4U_{\text{кат}}/3\lambda. \quad (\text{II-7})$$

При температуре, отличной от нуля, длина свободного пробега электрона определяется формулой

$$\lambda_e = \lambda_0 \frac{T}{273}. \quad (\text{II-8})$$

Следует отметить, что свободный пробег электронов больше свободного пробега молекул и соотношение между ними определяется равенством

$$\lambda_e = 4\sqrt{2}\lambda_g, \quad (\text{II-9})$$

где λ_e и λ_g — свободные пробеги электронов и молекул газа при одних и тех же условиях температуры и давления.

Экспериментальные данные для значения λ дают довольно большой разброс.

В табл. 3 приведены наиболее достоверные значения λ_e и λ_g для некоторых газов.

ТАБЛИЦА 3

ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ И МОЛЕКУЛ
 НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ

Длина свободного пробега	He	Ar	H ₂	N ₂	O ₂	Na	Hg	Воздух
$\lambda_g \cdot 10^{-3}$ см	13,1	7,73	13,3	6,33	7,22	8,07	4,88	4,62
$\lambda_e \cdot 10^{-3}$ см	74,1	43,7	75,2	53,8	40,8	45,6	27,6	26,1

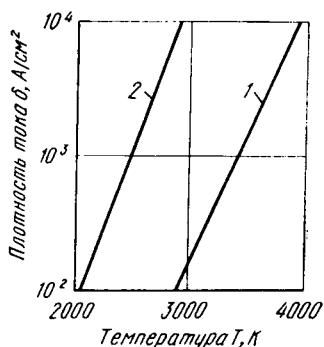


Рис. 16. Зависимость плотности тока на катодном пятне от температуры для катодов:

1 — из угля; 2 — из железа

Постоянная A в формуле (II-5) достаточно хорошо изучена для чистых металлов; для всех металлов она одинакова и равна $120,4 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}^2)$. Загрязнения, конечно, искажают ее. Постоянные c и b для различных материалов различны по величине и изучены мало; для железа, например, c приблизительно равна 0,01. Постоянная b , по литературным данным, равна для углерода 46 500, для меди 51 000, для железа 37 000, для вольфрама 52 500.

На рис. 16 приведены кривые зависимости плотности тока на катодном пятне от температуры для угля и для железа, рассчитанные по формуле (II-5).

Как видно, они дают определенные отклонения от приведенных экспериментальных данных и поэтому формулу (II-5) следует рассматривать как приближенную.

Остановимся на соотношении токов электронной и ионной проводимости в катодной области, которое лучше всего уясняется из энергетических соображений. Поэтому рассмотрим сначала баланс энергии на катоде.

Катод получает энергию от бомбардирующих его положительных ионов, от экзотермических химических реакций между материалом катода и окружающими его газами и (если он подогревается) от посторонних источников.

Катод теряет энергию на термическую эмиссию, отдачу тепла теплопроводностью и излучением, испарение материала катода и поддержание эндотермических химических реакций.

При ударе о катод ион может отдать ему всю свою потенциальную и кинетическую энергию. Но за счет энергии иона совершается и работа выхода электрона, который нейтрализует данный ион. Поэтому максимальная энергия, которую может отдать ион самому катоду, равна разности полной его энергии и энергии выхода электрона.

Если обозначить через δ^+ плотность ионного тока, через $e_0 U_k$ — кинетическую энергию иона, через $e_0 U_i$ — его потенциальную энергию, через $e_0 U_{\text{вых}}$ — работу выхода электрона, то максимальная поверхностная плотность мощности, отдаваемой ионным током катоду, будет равна:

$$P_{\delta^+} = \delta^+ (U_k + U_i - U_{\text{вых}}). \quad (\text{II-10})$$

Фактически ионы отдают катоду меньше энергии, так как часть энергии они уносят с собой при отскакивании от катода.

Для поддержания термической эмиссии с катода требуется мощность

$$P_{\delta^-} = \delta^- U_{\text{вых}}, \quad (\text{II-11})$$

где δ^- — плотность электронного тока эмиссии.

Химические реакции, как эндо-, так и экзотермические, могут значительно исказить баланс энергии на катоде, но влияние их на баланс токов маловероятно.

Поэтому при анализе токов будем исходить из предположения, что процессы протекают в инертной среде без химических реакций. Подогрев катода посторонним источником легко исключить из баланса.

В этом случае в приходной части баланса энергии на катоде остается только энергия, доставляемая ионным током.

Максимальную величину плотности тока на катоде получим, если исключить из расходной части баланса потери остальных видов.

Разделив уравнение (II-10) на (II-11), получим соотношение между электронным и ионной составляющими плотности тока на катоде:

$$\left(\frac{\delta^-}{\delta^+}\right)_{\max} = \frac{U_k + U_i - U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}}. \quad (\text{II-12})$$

Рассмотрим два примера.

Для угловых электродов в атмосфере азота ($U_k = U_i = 15,8$ В; $U_{\text{вых}} = 2,5$ В) электронный ток получается примерно в пять раз больше ионного; для медных электродов в парах меди ($U_k = U_i = 7,7$ В; $U_{\text{вых}} = 4,3$ В) это соотношение равно 2,5.

Существенно важным в этом выводе является то, что ионный ток может достигать 20—30% электронного.

Потери энергии с катода (теплопроводность, излучение, испарение и т. д.) трудно поддаются подсчету, во всяком случае, они повышают долю ионного тока. Нижний предел отношения величин электронного и ионного токов можно получить, если предположить, что каждый электрон, вылетающий из катода вследствие ионизации, создает только один-единственный ион. В этом случае отношение электронного тока к ионному может достигнуть единицы. Можно полагать, что ионный ток в катодном пространстве может составить ~10—50% электронного тока.

Для подсчета абсолютной величины плотности тока можем воспользоваться общеизвестной теорией разряда в высоком вакууме с постоянным электрическим полем при наличии объемных зарядов.

Для плотности ионного тока расчетная формула принимает следующий вид:

$$\delta^+ = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e_0}{m_i}} \cdot \frac{U_{\text{кат}}^{1,5}}{\lambda^2}, \quad (\text{II-13})$$

где $U_{\text{кат}}$ — катодное падение потенциала;

m_i — масса иона;

λ — толщина катодного слоя.

Если принять $U_{\text{кат}}$ равным потенциалу ионизации, то для азота при атмосферном давлении и 2000—3000 К плотность ионного тока получится $\delta^+ = 180$ А/см², при плотности электронного тока, равной ~1000 А/см².

Приведенный выше расчет основан на предположении, что толщина катодного слоя равна свободному пробегу электронов и явление ступенчатой ионизации отсутствует. Эти допущения весьма снижают надежность формул. Поэтому экспериментальные данные иногда значительно расходятся с расчетными величинами.

Общеизвестно, что плотность тока на катоде возрастает с увеличением давления, а эта закономерность в приведенных формулах не находит точного отражения. На рис. 17 дана зависимость плотности тока от давления для катода, выполненного из чистого угля в воздухе. Мы видим, как с увеличением давления плотность тока растет и при атмосферном давлении достигает 450—470 А/см².

В предыдущих выкладках мы предполагали, что в области катодного падения потенциала отсутствуют химические реакции. Для электропечи это допущение неверно. Во всем объеме тигля электропечи, а следовательно, и в области дуги химические реагенты присутствуют. Например, при выплавке ферросилиция в области дуги могут находиться в парообразном состоянии кремний, кремниевая кислота

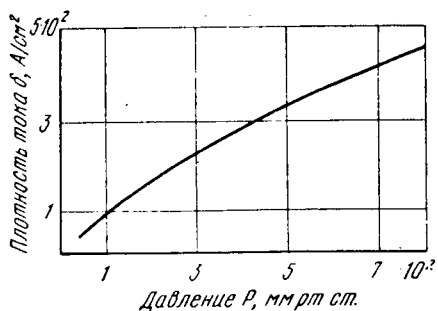


Рис. 17. Зависимость плотности тока на катоде от давления (катод из чистого угля, дуга в воздухе)

Так как дуга электропечи относится к разряду длинных дуг и трансформация энергии в основном происходит в области столба, то явления на катоде дуги постоянного тока существенного значения не имеют. Они приобретают значение при рассмотрении процессов, происходящих в дуге переменного тока.

Как известно, физические процессы, протекающие в нейтральном газе, описываются кинетической теорией Больцмана. При протекании в газе электрических токов газ меняет свои физические свойства — он превращается в плазму. Плазмой в широком смысле этого слова называется газ, содержащий некоторое количество ионизированных частиц, которые создают вокруг себя электромагнитные поля. Поэтому для описания процессов в плазме дуги кинетическая теория Больцмана уже недостаточна. Прежде чем перейти к изучению столба дуги, рассмотрим некоторые элементарные процессы, протекающие в газах при электрическом разряде. Основными из них являются ионизация и рекомбинация элементарных частиц, а также электризация и диэлектризация газовой среды в целом.

8. Ионизация газов

Ионизацией элементарной частицы (атома или молекулы) называется процесс, в результате которого на частице возникает электрический заряд или возрастает его величина. Вследствие ионизации в газе образуются заряженные частицы трех видов — электроны, положительные ионы и отрицательные ионы. Если процесс ионизации протекает ступенчато, то в газовой среде образуются еще возбужденные атомы и молекулы, т. е. частицы, у которых увеличена внутренняя энергия без изменения заряда.

Виды ионизации элементарных частиц весьма разнообразны. Рассмотрим основные из них.

А. Контактная ионизация атомов и молекул. Она происходит на границе газовой сферы с ограничивающими ее твердыми и жидкими телами. На торцах газового промежутка такими телами являются электроды, обладающие разными потенциалами. Поэтому ионизация на этих поверхностях является как результатом ударов электронов о поверхности электродов, так и следствием воздействия

и железо. Естественно, что они могут попадать в область катодного падения потенциала. При наблюдаемых в электропечи высоких температурах и температурных градиентах, вероятно, происходят экзотермические и эндотермические реакции, которые в корне могут изменить количественные соотношения приведенных выше выкладок. При современных знаниях о процессах горения дуги едва ли возможно дать какую-либо количественную оценку этим химическим факторам.

Отметим только одно: химические реакции не могут влиять на граничные условия, и диапазон соотношения электронной и ионной составляющих тока останется при всех условиях химических реакций в указанных выше пределах.

электрического поля электродов и приэлектродных частей разрядного промежутка на среду. О них было сказано выше.

Для боковой поверхности разрядного промежутка электрическое поле не играет роли и ионизация элементарных частиц у этих поверхностей является результатом их взаимодействия (удара) с элементарными частицами твердых и жидких веществ, ограничивающих разрядный промежуток.

Так как в электрических печах дуга горит в обширном замкнутом объеме («тигле») и ограничивающие поверхности находятся далеко от разрядного промежутка, то значение ионизации этого вида для дуги невелико.

Б. Фотоионизация элементарных частиц. Эта ионизация происходит при поглощении атомом излучения.

Как известно, каждый квант излучения обладает энергией

$$a_v = h\nu, \quad (II-14)$$

где ν — частота излучения;

h — постоянная Планка.

Для ионизации элементарной частицы необходима работа ионизации

$$a_i = e_0 U_i, \quad (II-15)$$

где e_0 — заряд электрона;

U_i — потенциал ионизации данного газа.

Если $a_v \geq a_i$, то очевидно, что в результате поглощения энергии, равной a_v , атом ионизируется.

Как видно из формулы (II-14), энергия кванта пропорциональна частоте излучения. Для значительной части спектра излучения энергия кванта обычно бывает недостаточной для ионизации газов.

Только энергия квантов при частотах ультрафиолетового излучения и выше становится больше работы ионизации паров щелочных металлов (Ca, Na). Большинство же газов и паров металлов не может быть ионизировано в результате однократного поглощения кванта излучения. Однако нейтральные атомы при каждом таком поглощении приходят в возбужденное состояние. В результате нескольких элементарных процессов атом может, наконец, ионизироваться. Ионизация такого вида называется ступенчатой.

В печных дугах сечение разрядного промежутка очень большое, температуры, господствующие там, также очень велики, особенно в центральной части столба разряда. Поэтому надо полагать, что в этой части столба фотоионизация играет определенную роль.

В. Ионизация элементарных частиц при соударении. В дуговых разрядах это наиболее важный вид ионизации. В зависимости от вида соударяющихся частиц различают ионизацию при соударении частиц газа с электронами и частиц газа с ионами.

Ионизация при соударении частиц газа с электронами. Работу ионизации можно выразить формулой $a_i = eU_i$.

При перемещении в электрическом поле электрон приобретает кинетическую энергию

$$a_k = m_e v^2 / 2, \quad (\text{II-16})$$

где m_e — масса электрона;
 v — его скорость.

Очевидно, электрон только тогда ионизирует атом (или молекулу), когда его кинетическая энергия в момент соударения с атомом будет равна или больше работы ионизации:

$$a_k \geq a_i,$$

или

$$\frac{m_e v^2}{2} \geq e_0 U_i. \quad (\text{II-17})$$

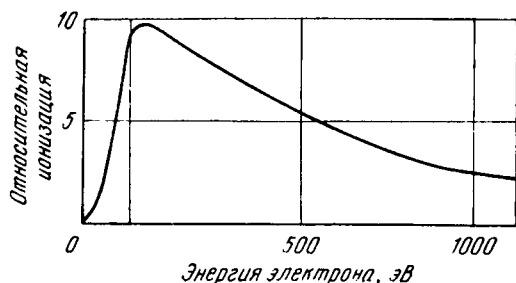
Если кинетическая энергия движущегося электрона настолько мала, что его сближение (соударение) с нейтральной частицей не вызывает изменения величины их внутренней энергии, то соударение называют упругим.

Но соударение может быть и неупругим и привести либо к возбуждению нейтральной частицы, либо, если соблюдено условие (II-17), к ее ионизации.

Очевидно, что чем больше скорость электрона, тем больше его кинетическая энергия и, следовательно, тем больше число нейтральных частиц он ионизирует на единице длины пути своего пробега. Число нейтральных частиц, ионизированных одним электроном при пробеге, равном 1 см, называется относительной ионизацией.

На рис. 18 приведена зависимость относительной ионизации от энергии ионизирующего электрона для воздуха при давлении 1 мм рт. ст. и температуре 0° С. Из рисунка видно, что относительная ионизация при увеличении энергии электрона сначала растет почти прямолинейно, а потом падает, асимптотически приближаясь к некоторой постоянной величине. Это объясняется тем, что с увеличением скорости электрона уменьшается время его пребывания в зоне воздействия на нейтральную частицу и вследствие этого уменьшается вероятность ионизации.

В дальнейшем мы увидим, что в дуговых разрядах, особенно в печных дугах, непосредственная ионизация газов, происходящая



вследствие соударения нейтральных частиц с электронами, играет вспомогательную роль. Но зато обусловленное соударениями с электронами возбуждение атомов способствует наиболее важному виду ионизации газов — термической.

Ионизация частиц газа при со-

Рис. 18. Зависимость относительной ионизации от энергии ионизирующего электрона

ударении с ионами. Масса ионов почти в 2000 раз больше массы электронов, а между тем электрические заряды тех и других равны. Значит, при воздействии одинаковой разности потенциалов электрическое поле сообщает и электронам и ионам одинаковую энергию. Но вследствие большой массы ионы приобретают меньшие скорости. Несмотря на это, и ионы в некоторых случаях могут приобрести кинетическую энергию, достаточную для ионизации соударяющейся нейтральной частицы. Но в большинстве случаев энергия, приобретаемая ионами в электрическом поле, настолько мала, что этим видом ионизации можно пренебречь.

Термическая ионизация газов. Ионизация этого вида играет исключительно важную роль в дуговых разрядах: поэтому остановимся подробнее на процессе ее протекания.

Если газ находится в замкнутом объеме и не подвергается воздействию внешних ионизирующих факторов (облучение, электрическое поле и т. д.), то в этом газе возможны следующие ионизационные процессы:

1) расщепление нейтральных частиц при соударении их друг с другом;

2) фотоионизация частиц, обусловленная тепловым излучением стенок, ограничивающих объем газа;

3) ионизация вследствие соударения нейтральных молекул и электронов, возникающих в газе благодаря первым двум процессам.

Теоретически все эти процессы должны происходить при любой температуре, практически же они начинают играть роль при температурах газа выше 2000—3000 К.

Параллельно с ионизацией в газовом объеме происходит процесс деионизации — рекомбинация ионов и электронов в нейтральные частицы.

При установившемся состоянии процессы ионизации и рекомбинации уравниваются друг друга и при данной температуре число свободных электронов, ионов и нейтральных молекул является вполне определенным. Процесс ионизации и рекомбинации в газовом объеме можно выразить одним уравнением

$$N + e_0 U_i \rightleftharpoons N^+ + e_0, \quad (\text{II-18})$$

где N — элементарные частицы в нейтральном состоянии;

$e_0 U_i$ — работа ионизации;

e_0 — элементарный отрицательный заряд;

N^+ — положительно заряженные частицы.

Однако математический расчет равновесного состояния газа вызывает некоторые трудности из-за отсутствия ряда констант процессов рекомбинации, которые будут рассмотрены ниже.

Так как по своему характеру процесс тепловой ионизации газов аналогичен процессу диссоциации, то обычно для расчета тепловой ионизации пользуются методами термодинамического расчета, применяемыми в расчетах химических реакций.

Согласно этой теории, процесс тепловой ионизации рассматривают как химическую реакцию, которую можно выразить следующим

образом: 1 моль электронов + 1 моль ионов = 1 моль нейтрального газа + работа ионизации на 1 моль, и наоборот, 1 моль нейтрального газа + работа ионизации на 1 моль = 1 моль электронов + 1 моль ионов.

Из условия равновесия процессов ионизации и рекомбинации выведена общеизвестная формула Саха:

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot p = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot T^{2,5} e^{-\frac{11600U_i}{T}}, \quad (\text{II-19})$$

где x — степень ионизации, т. е. отношение числа ионизированных молекул к полному числу молекул до ионизации в единице объема.

Однако в приведенном виде уравнение Саха имеет существенный недостаток. Оно не учитывает квантовых статистических весов состояния молекул g_g и образующихся ионов g_p . Неучет этих факторов может вызвать ошибку в определении степени ионизации в несколько раз.

Учтя эти факторы, В. Л. Грановский [3], дает уравнение термической ионизации в следующем виде:

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot p = 4,9 \cdot 10^{-4} \frac{g_p}{g_g} T^{2,5} e^{-\frac{11600U_i}{T}}. \quad (\text{II-20})$$

На рис. 19, 20 приведено решение этого уравнения с исправлениями, сделанными В. Л. Грановским.

Если обозначить левую часть уравнения (II-20) через z , то

$$z = \frac{x^2}{1-x^2} \cdot p = \frac{g_p}{g_g} \cdot f(T). \quad (\text{II-21})$$

Задаваясь значениями T , можно построить графики

$$z \cdot \frac{g_g}{g_p} = f(T). \quad (\text{II-22})$$

Такие графики для различных значений потенциала ионизации построены на рис. 19.

Зная g_g и g_p и задаваясь температурой и потенциалом ионизации, можно подсчитать величину z .

При малых значениях степени ионизации ($x \ll 1$), можно пренебречь значением x^2 в знаменателе средней части уравнения (II-21) и положить

$$z \approx x^2 p,$$

откуда

$$x \approx \sqrt{z/p}.$$

На рис. 20 построена обратная кривая $x = f(p/z)$.

Степень ионизации определяют следующим образом. По заданному потенциалу ионизации (U_i В) и температуре (К) по первой

кривой определяют $z \cdot g_g/g_p$; по данным g_g и g_p вычисляют z и отношение p/z для заданного значения давления. Наконец, из кривой на рис. 20 определяют x . К сожалению, величины g_p и g_g для различных условий изучены мало, и это затрудняет использование приведенных выше номограмм.

По рис. 20 можно определить значение степени ионизации x при любом давлении.

Уравнение Саха дает приемлемые результаты для малых и средних значений степени ионизации, но оно становится непригодным, когда степень ионизации приближается к единице.

В табл. 4 приведены значения наименьших потенциалов ионизации и возбуждения для элементов, с которыми чаще всего приходится встречаться в руднотермических процессах.

На рис. 21 приведены графики степени ионизации некоторых элементов в зависимости от температуры. На рис. 22 показаны начальные стадии ионизации этих же элементов, так как для руднотермических процессов наибольшее значение имеет именно начальная стадия.

Так как в руднотермических печах дуга обычно горит при давлении, близком к одной атмосфере, для всех кривых давление принято равным $1,033 \text{ кгс/см}^2$ (760 мм рт. ст.). Однако надо иметь в виду, что давление весьма существенно влияет на степень ионизации. Как видно из формулы Саха, степень ионизации обратно пропорциональна давлению. Следовательно, с повышением давления степень ионизации понижается. При неправильной эксплуатации руднотермических

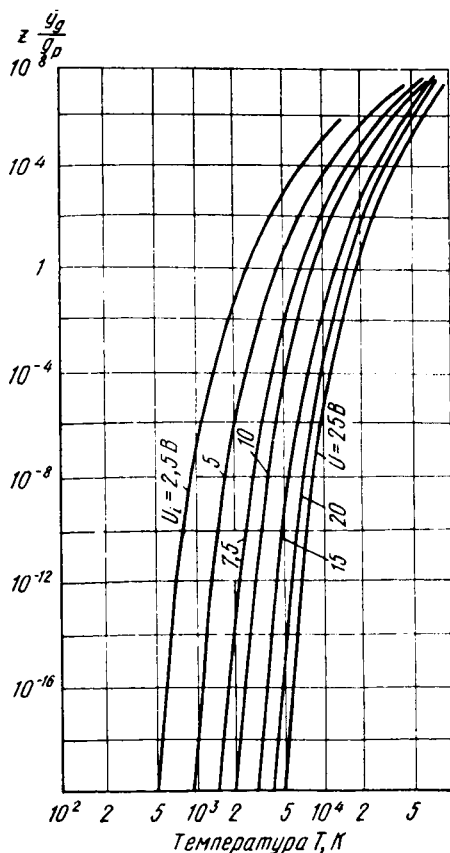


Рис. 19. Приближенное решение уравнения Саха; нахождение $z \frac{g_g}{g_p}$

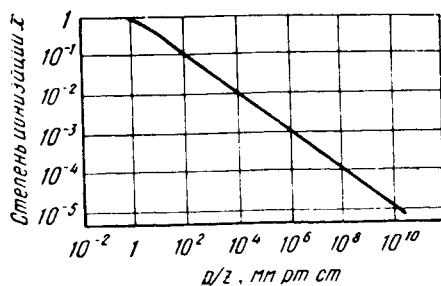


Рис. 20. Приближенное решение уравнения Саха; нахождение x при $p/z > 10 \text{ мм рт. ст.}$

ТАБЛИЦА 4

НАИМЕНЬШИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ И ВОЗБУЖДЕНИЯ
НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Название элементов	Порядковый номер	Атомный вес	Наименьший потенциал, В	
			ионизации	возбуждения
Серебро	47	107,9	7,54	3,65
Алюминий	13	27,0	5,96	—
Углерод	6	12,0	11,22	—
Кальций	20	40,1	6,10	—
Хром	24	52,0	6,74	—
Медь	29	63,6	7,69	—
Железо	26	55,8	7,83	—
Водород:				
одноатомный	1	1,0	13,54	10,2
двухатомный	—	—	15,40	7,0
Калий	19	39,1	4,33	1,6
Магний	12	24,3	7,61	2,7
Марганец	25	54,9	7,40	—
Молибден	42	96,0	7,35	—
Азот:				
одноатомный	7	14,0	14,5	—
двухатомный	—	—	15,8	—
Натрий	11	23	5,12	—
Кислород:				
одноатомный	8	16	13,6	7,9
двухатомный	—	—	12,50	—
Кремний	14	28,1	7,94	—

ких печей иногда под слоем шихты образуются газонепроницаемые корки. Вследствие этого газы скапливаются в тигле, давление внутри тигля повышается, степень ионизации газов падает и дуга либо горит ненормально, либо совсем гаснет. Такие отклонения от режима обычно кончаются появлением на колошнике печи

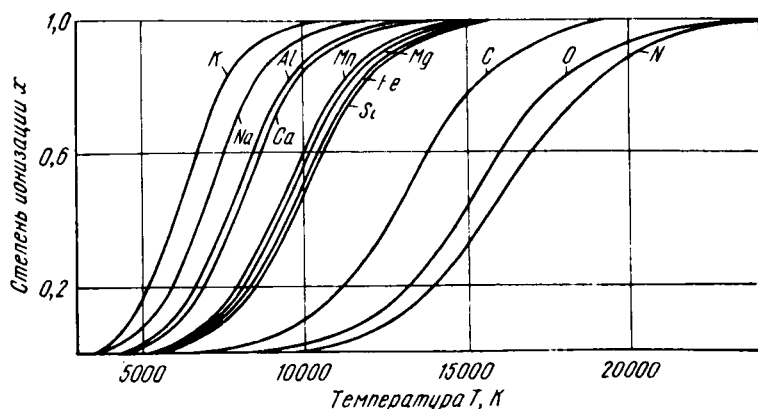


Рис. 21. Зависимость степени ионизации некоторых элементов от температуры

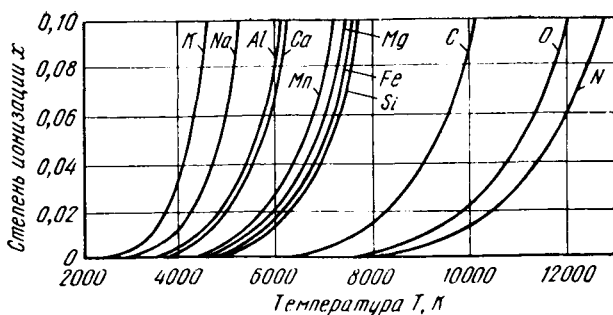


Рис. 22. Зависимость степени ионизации некоторых элементов от температуры для начальной стадии ионизации

так называемых свищей. Для восстановления нормального хода печи в этих случаях требуется тщательная шуровка печи.

Возвращаясь к рис. 22, следует отметить, что более или менее значительная ионизация для основных материалов ферросплавных печей наступает только при температуре, превышающей 5000 К, причем из всех элементов, имеющих значение в процессах, происходящих в руднотермических печах, легче всего ионизируется кальций, ионизационный потенциал которого $U_i = 6,1$ В.

Ионизационный потенциал остальных материалов близок к 7,5 В; для марганца он составляет 7,4, для железа 7,83, для кремния 7,94 В. Поэтому кривые этих материалов располагаются близко друг к другу. Для марганца, например, при 7000 К в ионизированном состоянии находится $\sim 10\%$ всех молекул газа. Примерно такую же картину дают железо и кремний.

В руднотермических печах мы имеем обычно дело со смесью нескольких газов. Например, при выплавке ферросилиция газовая сфера дуги состоит из паров железа и кремния.

Для смеси нескольких газов вводят понятие о *средней степени ионизации всей смеси*, под которой понимают отношение числа всех ионизированных молекул к полному числу молекул в смеси до ионизации.

Если обозначить через x_k степень ионизации, N_{ok} — число нейтральных молекул, а через N_{ik} — число ионизированных молекул k -того газа, то

$$x_k = \frac{N_{ik}}{N_{ok} + N_{ik}}. \quad (\text{II-23})$$

Средняя же степень ионизации всей смеси

$$x_{\text{рез}} = \frac{\sum_i^k N_{ik}}{\sum_i^k (N_{ok} + N_{ik})}. \quad (\text{II-24})$$

Между x_k и $x_{\text{рез}}$, температурой и потенциалом ионизаций существует следующее соотношение:

$$\frac{x_k}{1-x_k} \cdot \frac{x_{\text{рез}}}{1-x_{\text{рез}}} \cdot p = 4,9 \cdot 10^{-4} \frac{g_{pk}}{g_g} T^{2,5} \cdot e^{-\frac{11600U_{ik}}{T}}, \quad (\text{II-25})$$

где p — суммарное давление смеси, мм рт. ст.

Если составить k уравнений такого типа, то из них определяются значения x_k для всех газов.

Так как в большинстве случаев степень ионизации x_k и $x_{\text{рез}}$ значительно меньше единицы, то в знаменателях уравнений (II-20) и (II-25) можно этими величинами пренебречь. Тогда для расчетов получаются достаточно точные упрощенные формулы:

$$x^2 = \frac{4,9 \cdot 10^{-4}}{p} \cdot T^{2,5} \cdot \frac{g_p}{g_g} e^{-\frac{11600U_i}{T}}; \quad (\text{II-26})$$

$$x_k \cdot x_{\text{рез}} = \frac{4,9 \cdot 10^{-4}}{p} \cdot T^{2,5} \cdot \frac{g_p}{g_g} \cdot e^{-\frac{11600U_i}{T}}. \quad (\text{II-27})$$

Если смесь состоит из двух компонентов, то газ с меньшим потенциалом ионизации ионизируется сильнее, а газ с большим потенциалом — слабее, чем каждый из них в отдельности при том же суммарном давлении.

При выплавке, например, ферросилиция газовая среда дуги состоит из смеси паров железа и кремния; потенциал ионизации последних почти одинаков (для железа он составляет 7,83, для кремния 7,94 В). Несмотря на это, средняя степень ионизации паров при выплавке ферросилиция будет несколько выше, чем у железа.

При выплавке ферромарганца основными компонентами являются марганец и железо, причем сплав содержит $\sim 80\%$ марганца и 20% железа. Потенциал ионизации марганца примерно на 6% ниже потенциала ионизации железа, поэтому средняя степень ионизации при выплавке ферромарганца будет приближаться к степени ионизации марганца. Так как последняя ниже степени ионизации железа и кремния, то при одинаковой степени ионизации температура дуги при выплавке ферросилиция должна быть выше, чем при выплавке ферромарганца.

При выплавке карбида кальция газовая атмосфера дуги состоит почти исключительно из паров кальция, потенциал ионизации которого меньше, чем в обоих выше рассмотренных случаях. Поэтому при той же степени ионизации температура дуги карбидной печи будет ниже, чем в печах для выплавки ферросилиция и ферромарганца.

Следует отметить, что в предыдущих рассуждениях предполагалось, что весь процесс протекает как непосредственная однократная ионизация. В действительности характер процесса тепловой ионизации газов сложнее.

Во-первых, в газе будет происходить диссоциация молекул на атомы, а во-вторых, при соударении частиц энергия, отдаваемая нейтральной молекуле, может оказаться ниже потенциала иони-

зации, но выше потенциала возбуждения. В этом случае молекула газа придет в возбужденное состояние. Наконец, энергия соударения может оказаться значительно выше потенциала ионизации, и в газе может происходить многократная ионизация.

Ввиду ненадежности имеющихся химических констант приходится отказаться от количественной оценки этих факторов и в дальнейших расчетах базироваться на выводах в предположении однократной ионизации газов.

9. Деэлектризация газов

Деэлектризацией, или деионизацией, газа называется процесс уменьшения концентрации заряженных частиц в газе. Этот процесс осуществляется в газе в результате рекомбинации заряженных частиц и диффузии из разрядного промежутка. Рассмотрим оба эти процесса, влияние которых на режим горения дуги очень велико.

Рекомбинация заряженных частиц

Рекомбинацией называется процесс нейтрализации зарядов противоположно заряженных соударяющихся частиц, приводящий к исчезновению электрических зарядов в газовом промежутке.

Рекомбинация происходит в любом газе, в котором имеются свободные положительные и отрицательные заряды.

Рекомбинируют между собой либо электроны и положительные ионы, либо ионы разного знака. Вероятность первого вида рекомбинации крайне мала; она примерно в 10 000 раз меньше вероятности рекомбинации второго вида.

Обычно процесс протекает так: электроны при благоприятных условиях соударения присоединяются («прилипают») к нейтральным частицам, образуя отрицательный ион. Последние же рекомбинируют с положительным ионом.

Процесс рекомбинации всегда связан с выделением энергии. При рекомбинации электрона с ионом выделяется энергия, равная энергии ионизации. При рекомбинации ионов электрические соотношения подчиняются более сложным законам.

Если обозначить через dz число рекомбинаций в единице объема за время $d\tau$, а через n^- и n^+ — концентрацию отрицательно и положительно заряженных частиц, то закон рекомбинации можно выразить следующим уравнением:

$$dz = \alpha_p n^- \cdot n^+ d\tau, \quad (II-28)$$

где α_p — коэффициент рекомбинации.

Предлагая равенство концентрации ионов и одноступенчатость процесса рекомбинации, т. е. $dz = -dn^- = -dn^+ = -dn$, получим закон уменьшения концентрации ионов в следующем виде:

$$-\frac{dn}{d\tau} = \alpha_p n^2, \quad (II-29)$$

Интеграл этого уравнения за промежуток времени τ дает

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n_0} + \alpha_p \tau, \quad (\text{II-30})$$

где n_0 и n — начальная и конечная концентрации ионов того и другого знака.

Пренебрегая за малостью первым слагаемым, получим концентрацию ионов к концу периода:

$$n = 1/\alpha_p \tau. \quad (\text{II-31})$$

Коэффициент рекомбинации находится в весьма сложной зависимости от температуры и давления и для разных газов различен. Несмотря на то, что экспериментальное определение α_p представляет большие трудности, все же, на основании достаточного экспериментального материала, можно сделать некоторые выводы. В отношении давления установлено, что α_p получает максимальное значение при давлениях, близких к атмосферному. Зависимость от температуры изучалась многими исследователями; общий вывод их сводится к тому, что с увеличением температуры коэффициент рекомбинации убывает. Для расчета величины α_p Л. Леб [17] предлагает формулу

$$\alpha_p = 1,73 \cdot 10^{-5} \left(\frac{273}{T} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1}{M} \right)^2 \left\{ 2t \left[0,81 \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{p}{760} \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_g} \right] - f^2 \left[0,81 \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{p}{760} \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_g} \right] \right\}, \quad (\text{II-32})$$

где M — молекулярный вес газа, в котором происходит рекомбинация;

f — коэффициент, зависящий от вероятностей соударений отрицательных и положительных ионов;

p — давление, мм рт. ст.;

λ_i/λ_g — соотношение среднего свободного пути иона к такому же пути для молекулы в воздухе при нормальных условиях.

Из формулы видно, что с повышением температуры коэффициент рекомбинации падает. Это значит, что с понижением температуры рекомбинация увеличивается и объемные заряды быстро исчезают из разрядного пространства.

Коэффициент рекомбинации дугового разряда исследован мало, и трудно указать его значения. Некоторые авторы полагают, что они колеблются от 10^{-8} до 10^{-11} .

Зависимость же этого коэффициента от температуры в первом приближении можно выразить уравнением

$$\alpha_p = C/T^{3,5}. \quad (\text{II-33})$$

Диффузия заряженных частиц

Диффузией заряженных частиц называют удаление их из разрядного промежутка. Основными причинами диффузии являются тепловое движение частиц и появление неравномерностей объемных плотностей зарядов.

Когда заряженная частица в результате теплового движения достигает края зарядного промежутка, то она, располагая достаточной скоростью, вылетает оттуда и не возвращается обратно. Таким образом происходит рассеивание частиц.

Скорость электронов больше, чем положительных ионов. Поэтому электроны имеют большую тенденцию вылета из разрядного промежутка. Но в дуговом разряде газ разрядного промежутка представляет плазму. Она сильно ионизирована и характеризуется почти полным равенством концентрации положительно и отрицательно заряженных частиц. Поэтому, когда легкоподвижный электрон вылетает из объема газа, он тянет за собою положительный ион: из газа одновременно удаляются заряды обоих знаков. Если бы электроны вылетали из газа, не захватывая положительных ионов, то в разрядном промежутке образовались бы однозначные (положительные) объемные заряды, что представляет собой исключительно редкое явление в столбе дуги, приводящее к ее исчезновению (гашению). Скорость диффузии сквозь какую-либо цилиндрическую поверхность прямо пропорциональна концентрации частиц и обратно пропорциональна квадрату радиуса цилиндра:

$$\frac{dn}{d\tau} = -D \frac{n}{r^2}, \quad (II-34)$$

где n — концентрация частиц;
 D — коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии зависит от средней скорости частиц v и длины пути их свободного пробега λ . $D = \lambda v/3$.

Так как в дуговом разряде диффузия определяется движением ионов, то и коэффициент диффузии определяется скоростью и длиной свободного пробега положительных ионов. Зная эти величины, можно определить интенсивность диффузии заряженных частиц из разрядного промежутка дуги. Однако расчеты показывают, что для свободно горящей дуги влияние диффузии на состояние столба дуги невелико, причем оно еще меньше для печной дуги. Действительно, интенсивность диффузии обратно пропорциональна квадрату радиуса дуги, а печные дуги, как уже было отмечено, характеризуются значительными поперечными сечениями. Поэтому при заданном коэффициенте диффузии интенсивность деэлектризации газа в результате диффузии будет ничтожно мала.

Диффузия может играть существенную роль только в случае возникновения в тигле значительных вихревых движений газов.

На характер горения дуги существенно влияет баланс заряженных элементарных частиц в разрядном промежутке.

Процесс увеличения концентрации заряженных частиц в газе — ионизацию будем называть *электризацией* газа, а уменьшение их концентрации (рекомбинацию и диффузию) — *деэлектризацией*.

Отношение числа заряженных частиц к общему числу ионов n_i и нейтральных атомов n_g в единице объема назовем степенью электризации газа:

$$\gamma_3 = \frac{n_e + n_i}{n_i + n_g}. \quad (\text{II-35})$$

Из всех перечисленных выше видов ионизации для электризации разрядного промежутка дуги наибольшее значение имеет термическая ионизация соударением. Остальные виды ионизации играют подчиненную роль.

Для деэлектризации разрядного промежутка мощной дуги решающую роль играет рекомбинация и подчиненную — диффузия.

Если обозначить через $dn/d\tau$ полное изменение числа положительных ионов в единицу времени, то оно будет равно:

$$\frac{dn}{d\tau} = \left| \frac{dn}{d\tau} \right|_T + \left| \frac{dn}{d\tau} \right|_I - \left| \frac{dn}{d\tau} \right|_R - \left| \frac{dn}{d\tau} \right|_D, \quad (\text{II-36})$$

где первый член в правой части уравнения представляет собой скорость увеличения числа положительных ионов от термической ионизации, второй — от ударной ионизации, третий — убыль положительных ионов от рекомбинации, а четвертый — от диффузии.

Так как для разрядного промежутка дуги второй и четвертый члены малы, то ими можно пренебречь, и тогда

$$\frac{dn}{d\tau} = \left| \frac{dn}{d\tau} \right|_T - \left| \frac{dn}{d\tau} \right|_R. \quad (\text{II-37})$$

Это уравнение показывает, что, если процессы термической ионизации и рекомбинации будут протекать с одинаковой скоростью, то $dn/d\tau = 0$ и состояние разрядного промежутка будет стационарным.

Переход разрядного промежутка из одного стационарного состояния в другое совершается с различной скоростью в зависимости от скорости изменения внешних условий разряда. При $(dn/d\tau) > 0$ увеличивается степень электризации газа и вместе с тем увеличивается электропроводность разрядного промежутка, т. е. разряд становится устойчивым. При $(dn/d\tau) < 0$ степень электризации газа уменьшается, вместе с тем падает его электропроводность и при критических условиях разряд может исчезнуть (погаснуть).

Для характеристики скорости электризации и деэлектризации газа вводят понятие о постоянной времени. Если принять, что процессы электризации или деэлектризации протекают в соответствии с экспоненциальным законом, то процесс нарастания электризации можно записать так:

$$n = n_0 (1 - e^{-\tau_d \tau}), \quad (\text{II-38})$$

а процесс деэлектризации:

$$n = n_0 e^{-\tau_d \tau}, \quad (\text{II-39})$$

где n_0 — начальное число заряженных частиц в единице объема;

τ_d — постоянная времени деэлектризации, т. е. время, в течение которого плотность заряженных частиц совпадает до $1/e$ доли начального значения (e — основание натуральных логарифмов).

10. Столб дугового разряда

Столб дугового разряда является основной частью дуги электрической печи, и процессы, протекающие в нем, определяют почти всю энергетическую характеристику ванны печи. Поэтому рассмотрению столба дуги должно быть уделено особое внимание.

Длина столба дуги зависит от многих физических и геометрических факторов и может меняться в весьма широких пределах. Для маломощных контактных дуг она измеряется долями миллиметров, а для мощных высоковольтных дуг она достигает длины в несколько метров.

Длина столба печной дуги зависит в значительной степени от ее мощности, напряжения и температурных условий. В мощных сталеплавильных печах в период рафинирования дуга доступна для визуальных наблюдений, которые показывают, что длина дуги может достигать 20—30 см. На рис. 8 был приведен фотоснимок такой дуги. В руднотермических печах в подавляющем большинстве случаев наблюдается так называемая закрытая дуга — столб дуги со всех сторон окружен стенками тигля. Тепловые условия горения закрытой дуги лучше. Поэтому длина ее при заданном напряжении может быть еще больше. Можно предположить, что в мощных руднотермических печах длина столба дуги достигает 30—50 см.

Через столб дуги протекают токи, достигающие десятков и сотен тысяч ампер, что не наблюдается ни в каких низковольтных стабильных дугах других типов. Напряженность поля в столбе измеряется несколькими вольтами на 1 см, а температура как в самом столбе, так и в замкнутом объеме тигля измеряется тысячами градусов.

Столбом дугового разряда называется часть дуги, расположенная между катодной и анодной частями разрядного промежутка. По своему составу столб представляет газовую плазму, т. е. состоит из нейтральных газовых частиц, положительных ионов и электронов.

Заряды положительных ионов и электронов компенсируют друг друга, так что в электрическом отношении плазма столба квазинейтральна.

При высоких температурах, господствующих в столбе, в последнем все время протекают процессы ионизации и рекомбинации заряженных частиц и диффузии их из области столба.

Так как продольный градиент по всей длине столба постоянен и в нем не наблюдается накопления объемных зарядов, то для покрытия убыли электрических зарядов в столбе необходимы источники как положительных ионов, так и электронов. Предположение о поступлении в столб заряженных частиц (положительных ионов) со стороны анода исключено ввиду постоянства градиента потенциала вдоль оси столба.

Основным источником появления заряженных частиц в области столба является термическая ионизация, подчиняющаяся закону Саха.

Благодаря термической ионизации в области столба создается примерно столько же заряженных частиц, сколько их исчезает

в результате диффузии и рекомбинации. Таким образом, газовая сфера столба все время находится в состоянии динамического равновесия, соответствующего данным условиям температуры, давления, градиента потенциала и вида газа, в котором протекает разряд.

Однозначное определение состояния столба в зависимости от этих факторов представляет большие трудности. Сложно составить и теоретически обосновать математические формулы, которые дали бы возможность точной количественной оценки явлений, протекающих в столбе.

Но в настоящее время существует уже достаточно хорошо развитая теория горения как низковольтной, так и высоковольтной дуги.

Эта теория позволяет дать качественную оценку явлений, протекающих в дуге, и помогает установить тенденции их развития.

Такую же теоретическую базу можно использовать и при рассмотрении электропечной дуги и сделать соответствующие выводы.

Запишем соотношения, связывающие основные величины, характеризующие дугу.

Ток, протекающий через дугу, равен произведению объемной плотности заряда на скорость перемещения зарядов и на поперечное сечение дуги:

$$I = \rho v S_d. \quad (\text{II-40})$$

Объемная плотность заряда ρ равняется произведению элементарного заряда e_0 на число заряженных частиц в единице объема:

$$\rho = e_0 N. \quad (\text{II-41})$$

Скорость продвижения заряженных частиц определяется уравнением

$$v = \frac{e_0}{2m_q} \cdot \frac{\lambda}{w} \cdot E = kE, \quad (\text{II-42})$$

где λ — длина свободного пробега;

w — средняя скорость;

m_q — масса частицы;

E — напряженность поля.

Множитель k называется подвижностью заряженной частицы. Он равен отношению средней установившейся скорости заряженных частиц в направлении электрического поля к напряженности последнего.

Если обозначить через R радиус дуги и в уравнение (II-40) подставить значения ρ и v , то получим

$$I = \pi R^2 e_0 N k E. \quad (\text{II-43})$$

Подвижность заряженных частиц и число их в 1 см^3 находятся в сложной функциональной зависимости от температуры дуги.

Если обозначить эту зависимость через $f_1(T)$, то получим

$$I = R^2 \cdot E \cdot f_1(T). \quad (\text{II-44})$$

Таким образом, ток дуги является функцией ее радиуса, температуры и градиента потенциала.

Другое уравнение можно составить, исходя из закона сохранения энергии. Подводимая к дуге электрическая энергия должна равняться энергии, отводимой от нее. Мощность, подводимая к дуге, приходящаяся на единицу ее длины, будет

$$P_{\text{п}} = E \cdot I. \quad (\text{II-45})$$

Отвод энергии от дуги, в общем случае, происходит вследствие теплопроводности, излучения и конвекции, и во всех этих случаях мощность является функцией температуры и радиуса дуги:

$$P_{\text{от}} = f(R, T). \quad (\text{II-46})$$

При стационарном режиме горения дуги подводимая электрическая мощность должна равняться отводимой мощности:

$$P_{\text{п}} = P_{\text{от}} \quad (\text{II-47})$$

или

$$E \cdot I = f(R, T). \quad (\text{II-48})$$

Зависимость теплоотдачи от радиуса дуги весьма сложна и в первую очередь определяется видом теплоотдачи. Однако во всех случаях теплоотдачи эту зависимость мы должны выразить показательной функцией, где показатель степени будет меняться в соответствии с видом теплоотдачи. Тогда уравнение (II-48) можно переписать так:

$$E \cdot I = R^m f_2(T), \quad (\text{II-49})$$

где m — показатель степени радиуса дуги.

Следующее уравнение, связывающее между собой ток, градиент потенциала и температуру дуги, можно получить из закона, который гласит: *дуга устанавливается так, чтобы потребляемая ею энергия была минимальна.*

Этот закон вытекает из общих физических соображений и для определенных условий подтверждается экспериментально. Минимум энергии в дуге при заданном токе будет потребляться при минимуме градиента потенциала, поэтому вышеуказанный закон математически можно записать так:

$$dE/dT_{I=\text{const}} = 0. \quad (\text{II-50})$$

Исключая из уравнений (II-44) и (II-49) значения радиуса дуги, получим

$$E^{\frac{2}{m}+1} \cdot I^{\frac{2}{m}-1} = \frac{[f_2(T)]^{\frac{2}{m}}}{f_1(T)}. \quad (\text{II-51})$$

Продифференцировав это уравнение при постоянной величине тока по T и приравняв производную нулю, получим значение температуры дуги $T_{\text{д}}$, соответствующее минимальному градиенту потенциала, который устанавливается в дуге.

Если подставить теперь это значение температуры в выражение $f_1(T)$ и $f_2(T)$ правой части уравнения (II-51), то получим

$$E^{\frac{2}{m}+1} \cdot I^{\frac{2}{m}-1} = C. \quad (\text{II-52})$$

При выводе уравнения (II-52) был сделан ряд допущений, которые вносят значительные погрешности в результате расчетов и делают уравнение крайне приближенным. Несмотря на это, пользоваться этим уравнением очень удобно, так как оно охватывает все возможные виды отвода энергии от дуги.

Рассмотрим теперь поведение дуги при различных видах охлаждения. Предположим сначала, что отвод энергии от столба дуги происходит только излучением.

При тех высоких температурах, которые господствуют в области дуги, мы можем излучение дуги рассматривать как излучение абсолютно черного тела. В отношении печной дуги с ее громадными токами, высокими температурами и плотностями энергии такое допущение вполне приемлемо.

Согласно закону Стефана—Больцмана, при радиусе дуги с единицы ее длины излучается мощность

$$P_1 = 2\pi R \sigma T^4. \quad (\text{II-53})$$

Радиус дуги входит в это уравнение в первой степени, т. е. $m = 1$, и уравнение (II-52) приобретает вид:

$$E^3 \cdot I = C \quad (\text{II-54})$$

или

$$E = \sqrt[3]{C/I}, \quad (\text{II-55})$$

т. е. при отдаче энергии излучением *продольный градиент потенциала дуги обратно пропорционален корню кубическому из тока дуги.*

Если известны функции $f_1(T)$ и $f_2(T)$, то по ним может быть определена константа C и дана взаимозависимость между T , E и I .

По подсчету Энгеля и Штенбека, температура дуги, соответствующая минимальному продольному градиенту при условии черного излучения, может быть определена по формуле

$$T_d = 800U_i, \quad (\text{II-56})$$

где U_i — потенциал ионизации газа, в котором горит дуга.

Рассмотрим теперь вариант, когда отдача энергии дугой происходит только теплопроводностью.

Мощность, отдаваемая единицей длины дуги, в этом случае выразится уравнением

$$P_2 = \frac{2\pi}{\ln \frac{R_0}{R}} \int_0^T \lambda \cdot dT. \quad (\text{II-57})$$

Логарифмическую зависимость мощности от радиуса мы можем с достаточным приближением заменить зависимостью $R^{0.5}$, тогда уравнение (II-57) можно переписать так:

$$P_2 = R^{\frac{1}{2}} \cdot f_2(T). \quad (\text{II-58})$$

Таким образом, степень радиуса дуги в данном варианте равна половине, и уравнение (II-52) примет вид:

$$E^5 \cdot I^3 = C \quad (\text{II-59})$$

или

$$E = C \cdot I^{-0,6}, \quad (\text{II-60})$$

т. е. при отдаче энергии теплопроводностью *продольный градиент потенциала дуги обратно пропорционален току в степени минус 0,6.*

Возможен и третий вариант охлаждения дуги — объемное ее охлаждение. В масляных выключателях, например, в ствол дуги попадают капельки масла, они там испаряются и диссоциируют и этим охлаждают дугу. Объемное охлаждение возможно и в печной дуге.

При неравномерном ходе печи в обвалах шихты возможно проникновение в ствол дуги твердых частиц шихты, которые будут плавиться и диссоциировать в самом стволе. Помимо того, в ствол дуги в значительном количестве может проникать шихта в парообразном состоянии, еще не участвовавшая в химических реакциях. В этом случае в стволе дуги будут протекать эндотермические химические реакции с поглощением значительного количества энергии.

Объемное охлаждение, независимо от его вида, пропорционально квадрату радиуса столба, следовательно, $m = 2$, и уравнение (II-51) примет вид

$$E^2 = \frac{f_2(I)}{f_1(T)} = \text{const}, \quad (\text{II-61})$$

т. е. *при объемном охлаждении продольный градиент потенциала столба не зависит от силы тока.*

Возможно, наконец, и охлаждение дуги конвекцией. Охлаждение этого вида поддается математическому анализу еще труднее, так как зависит от целого ряда трудно учитываемых факторов. Однако и тут можно воспользоваться уравнением (II-51).

Тепловые потери дуги на конвекцию зависят от скорости и температуры воздуха или газов, омывающих дугу, температуры самой дуги и ее поперечного сечения. В общем виде эта зависимость выражается уравнением

$$P = AR^2 \left(T^{\frac{1}{2}} - T_0^{\frac{1}{2}} \right), \quad (\text{II-62})$$

т. е. и в этом случае тепловые потери дуги пропорциональны квадрату радиуса. Подставив в уравнение (II-51) значение $m = 2$, придем к тому же результату, что градиент столба дуги E не зависит от силы тока: $E = \text{const}$.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что основным уравнением, связывающим параметры столба дуги, является выраже-

ние (II-51). В зависимости от вида охлаждения дуги коэффициент m меняется от 0,5 до 2. В соответствии со значением коэффициента получаем зависимость продольного градиента потенциала столба от тока дуги. *При объемном охлаждении градиент столба дуги E_d не зависит от силы тока I , при охлаждении лучеиспусканием E обратно пропорционально корню кубическому из величины силы тока i , наконец, при охлаждении теплопроводностью E обратно пропорционально силе тока в степени минус 0,6.*

В вышеприведенных выводах был сделан ряд допущений, поэтому значительный интерес представляет экспериментальная проверка выведенных законов.

На рис. 23, а, б и 24 приведены экспериментальные кривые зависимости градиента столба от силы тока для ряда газов. Особый интерес представляют кривые для углекислоты и кислорода. К сожалению, все эти эксперименты проведены при малой силе тока (100—1000 А), но во всех случаях наблюдается явное падение продольного градиента поля с увеличением силы тока.

На рис. 24 приведено сравнение теоретической кривой, рассчитанной для второго варианта (охлаждение теплопроводностью), с экспериментальной кривой, снятой Энгелем. Кривая снята для дуги в воздухе при силе тока 100 А. Как видно, теоретическая и экспериментальная кривые почти полностью совпадают.

Надо полагать, что в воздухе при малых токах отдача энергии дугой в основном происходит вследствие теплопроводности, а не излучения.

Однако эксперименты не всегда дают результаты, так хорошо совпадающие с развитой выше теорией. Во многих случаях зависимость градиента потенциала от силы тока имеет не только нисходящую, но и восходящую ветви и, следовательно, точку минимума. На рис. 25 приведено семейство вольтамперных кривых, полученных Н. А. Карякиным для дуги высокой интенсивности. Как видно из кривых, при увеличении силы тока примерно до 100 А напряжение на дуге падает, а потом за точкой минимума снова начинает нарастать. Длина дуги в рассматриваемых опытах менялась от 25 до 33 мм. При увеличении длины дуги минимум напряжения смещается влево — в сторону меньшей силы тока. На расположение точки минимума влияет не только длина дуги, но и диаметр электродов. Для иллюстрации этого явления на рис. 26 приведены две вольтамперные характеристики: одна для дуги длиной 7 мм при диаметре углей 8 мм, а другая — для дуги длиной 8 мм при диаметре углей 11 мм. Как видим, у первой минимум напряжения наступает при меньшей силе тока, чем у второй. Наконец, на рис. 27 приведены вольтамперные характеристики дуги при силе тока порядка 1000 А и напряжениях до 100 В, снятые Тиходеевым [38]. Они также показывают, что с увеличением силы тока напряжение дуги растет.

Эти кривые, конечно, не могут быть выражены приведенной выше формулой (II-51), и для их объяснения приходится искать иные пути. Некоторые исследователи пытаются объяснить наличие восходящей ветви вольтамперной характеристики высокоинтенсивной

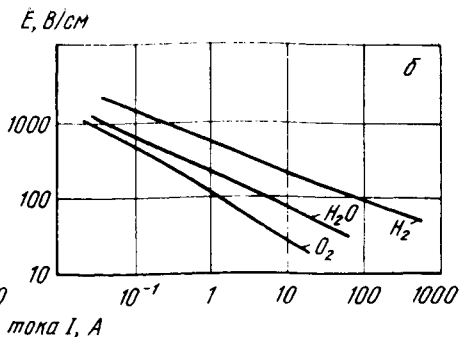
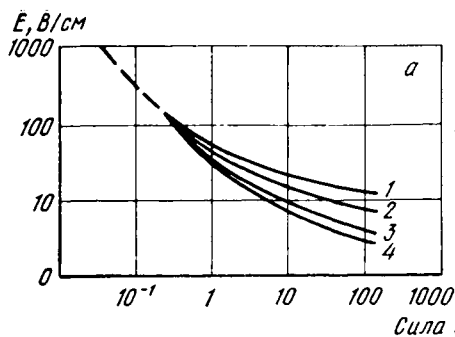


Рис. 23. Зависимость градиента дуги E от силы тока I : а — дуга в воздухе при давлении 760 мм рт. ст.: при диаметрах разрядной трубки: 1 — 2 см; 2 — 4 см; 3 — 7 см; 4 — 12 см; б — дуга в различных газах при диаметре разрядной трубки 4 см

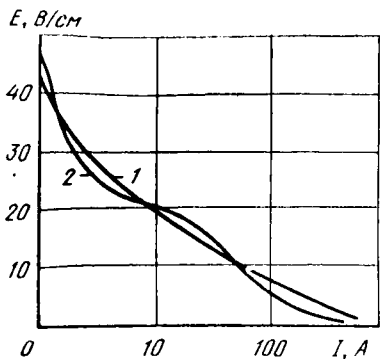


Рис. 24. Зависимость градиента дуги E от силы тока I : 1 — расчетная кривая (по формуле $K = CI^{-0,6}$); 2 — экспериментальная кривая

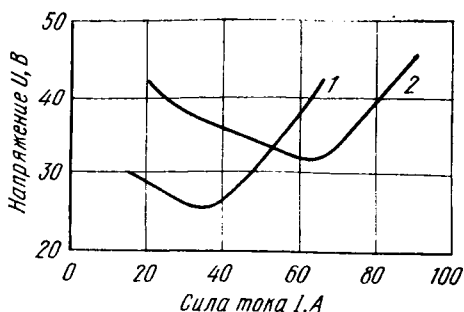


Рис. 26. Вольтамперные характеристики дуги высокой интенсивности: 1 — угли диаметром 8 мм при длине дуги 7 мм; 2 — угли диаметром 11 мм при длине дуги 8 мм

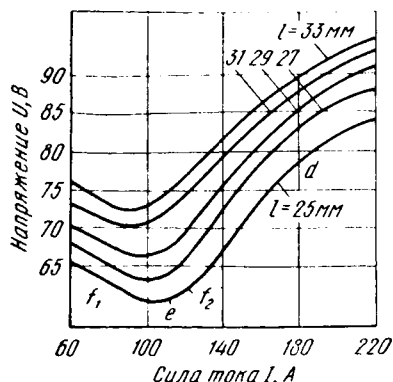


Рис. 25. Вольтамперные характеристики дуги высокой интенсивности при различных длинах дуг

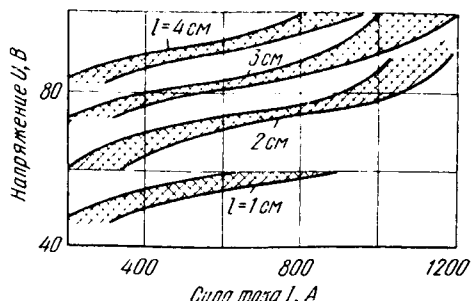


Рис. 27. Вольтамперные характеристики мощной дуги при различной ее длине

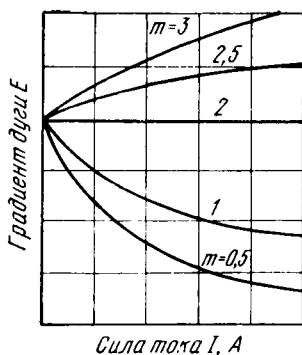


Рис. 28. Зависимость градиента дуги от силы тока при различных значениях степени радиуса дуги m

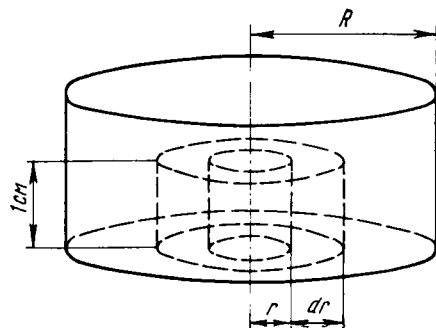


Рис. 29. Элемент столба дуги

дуги явлениями, протекающими на катоде, но опыты показывают, что восходящие ветви характерны и для дуг другого происхождения. В частности, как будет видно позже, такую же характеристику могут иметь и печные дуги.

В формуле (II-51) в качестве переменной величины, зависящей от вида охлаждения дуги, мы приняли показатель степени радиуса дуги m . В зависимости от вида охлаждения, как мы видели, m меняется в пределах от 0,5 до 2. На рис. 28 приведены кривые зависимости градиента столба дуги E от силы тока при разных значениях $m < 2$. При всех значениях $m < 2$ получаются падающие характеристики, только при $m = 2$ градиент потенциала дуги становится независимым от силы тока. Восходящую же форму кривая получает только при $m > 2$. Линейная зависимость между градиентом E и силой тока I получается только при m , равном бесконечности.

Таким образом, анализируемую формулу следует рассматривать как первое приближение к решению задачи.

Некоторыми исследователями была сделана попытка более полного решения задачи. В частности Эленбасом было составлено дифференциальное уравнение энергетического состояния столба дуги с учетом его излучения и теплопроводности. Покажем это уравнение.

Выделим внутри разрядной трубки радиусом R (рис. 29) цилиндрический слой длиной в 1 см и толщиной dr на расстоянии r от оси трубки. Примем, что вся энергия, выделяющаяся в объеме этого слоя, отводится в результате излучения и теплопроводности.

Введем следующие обозначения:

dP — мощность, выделяющаяся в рассматриваемом объеме;
 $dP_{\text{и}}$ — мощность излучения из этого объема;
 $dP_{\text{т}}$ — мощность, отдаваемая этим объемом в результате теплопроводности.

Тогда

$$dP = dP_{\text{и}} + dP_{\text{т}}. \quad (\text{II-63})$$

С другой стороны

$$dP = 2\pi r \delta_r E dr, \quad (\text{II-64})$$

где δ_r — плотность тока на расстоянии r от оси трубки;

E — градиент потенциала столба дуги.

Мощность излучения пропорциональна концентрации возбужденных атомов n_a , поэтому

$$dP_{\text{и}} = 2\pi r dr C n_a, \quad (\text{II-65})$$

где C — постоянный множитель.

Мощность, отдаваемая теплопроводностью,

$$dP_{\text{т}} = 2\pi \frac{d}{dr} \left(r \lambda_{\text{т}} \frac{dT}{dr} \right) dr, \quad (\text{II-66})$$

где $\lambda_{\text{т}}$ — теплопроводность газовой атмосферы дуги при температуре T .

После подстановки этих выражений в уравнение (II-63) и ряда преобразований, которые мы здесь опускаем, для энергетического баланса столба дуги получается уравнение

$$\frac{E^2 R}{\sqrt{g}} \cdot f_1(T) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \lambda_{\text{т}} \frac{dT}{dr} \right) + \frac{g}{R^2} f_2(T), \quad (\text{II-67})$$

где g — масса газа, заключенного в единице длины разрядной трубки.

Температурные функции, входящие в уравнение (II-67), имеют вид:

$$f_1(T) = C_1 T e^{-\frac{D_1}{T}}; \quad (\text{II-68})$$

$$f_2(T) = C_2 \cdot \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{D_2}{T}}. \quad (\text{II-69})$$

Величины C_1, C_2, D_2 постоянны для данных условий горения дуги.

Граничными для решения уравнения (II-67) являются условия, наблюдаемые на оси и стенках трубки. На оси трубки ($r = 0$) температура максимальна, поэтому ее производная должна равняться нулю:

$$(dT/dr) = 0. \quad (\text{II-70})$$

На стенках трубки при $r = R$ температура дуги должна совпадать с температурой стенки:

$$T = T_{\text{ст}}. \quad (\text{II-71})$$

Если рассматривается электрическая дуга в воздухе или печная дуга, когда отсутствуют ограничивающие дугу стенки трубки, то второе граничное условие нужно составлять для пограничного слоя столба дуги.

Ромпе и Шульц сделали попытку расчета дугового разряда сверх-высокого давления. Несмотря на то, что все величины, входящие в уравнение (II-67), являются известными функциями температуры, получение надежных данных для числового расчета крайне затруднительно.

Неполноценность формул Эленбаса доказывается и опытами Меккера [39]. Ему удалось получить дугу весьма высокой удельной мощности. Во время его опытов дуга горела в кварцевой трубке, которая изнутри омывалась тонким слоем воды, совершавшим спиральное движение. Благодаря этому дуга охлаждалась очень интенсивно. По его данным, при длине дуги 13 мм и диаметре 14 мм сила тока достигает 250 А при продольной напряженности 240 В/см и мощности на единицу длины дуги 60 кВт/см. Расчетная температура по оси такой дуги достигает 35 000 К, плотность тока 16 000—17 000 А/см². Объемная плотность мощности измеряется тысячами киловатт на 1 см³. Помимо излучения и радиальной теплопроводности, в такой дуге происходит и аксиальное перемещение энергии. Поэтому к такой дуге неприменима формула Эленбаса, учитывающая только первые два вида передачи энергии.

В отношении печной дуги вопрос осложняется тем, что трудно получить более или менее резкую границу столба дуги и отделить его от окружающих его раскаленных газов (ореола). Отсюда и затруднение с определением диаметра дуги.

Кроме того, доступ к печной дуге крайне затруднителен, так как в большинстве случаев она горит в замкнутом объеме тигля и недоступна для визуального наблюдения.

За последнее время принцип минимума напряжения дуги подвергся дискуссии в печати. Наряду с попытками строго математического и физического обоснования этого принципа высказывалось мнение, что этот принцип не соответствует природе вещей и от него следует отказаться. Принцип минимума напряжения не следует, конечно, рассматривать как всеобъемлющий закон, но, пользуясь этим принципом при определенных ограниченных условиях, можно получить приемлемые результаты и, как указывает Н. А. Капцов [12], значение уравнения (II-67) заключается в том, что оно позволяет установить законы подобия и моделировать дугу. Если на малой («модельной») дуге установить количественные соотношения между параметрами дуги (мощность, радиус дуги, температура и т. д.), то, зная законы подобия, можно определить параметры и для мощной подобной дуги. Ряд исследователей установил законы подобия для ртутной дуги высокого давления. По-видимому, надо будет установить такие же законы и для дуги, горящей в воздухе, и для подобной ей печной дуги.

Этот вопрос приобретает важное значение еще и потому, что, как будет видно из рассмотрения экспериментов, печная дуга во многих случаях не подчиняется вышеприведенным закономерностям.

11. Зависимость продольного градиента потенциала столба дуги от давления

Давление является одним из основных факторов, определяющих характер газовых разрядов. Однако для дуговых разрядов влияние его значительно меньше, чем для газовых разрядов других видов.

Базируясь на приведенных выше трех уравнениях (II-45), (II-46) и (II-49), можно, исключив значение силы тока, получить функцио-

нальную зависимость между напряженностью поля в положительном столбе и давлением.

Эта зависимость выражается формулой

$$E \approx \sqrt[6]{p}. \quad (\text{II-72})$$

Из формулы (II-72) видно, что напряженность поля зависит от давления значительно слабее, чем от силы тока.

Для электродной дуги эта зависимость не играет существенной роли, так как почти при всех режимах работы печи давление в тигле, т. е. в атмосфере, окружающей дугу, все время остается постоянным, близким к атмосферному¹. Если по какой-либо причине давление возрастет, то это увеличит интенсивность выделения газов из тигля, вследствие чего восстановится равновесное состояние, соответствующее параметрам печи. Это равновесное состояние давления зависит от грануляции шихты, высоты шахты печи и т. д. Но, как показали исследования, при всех условиях нормальной эксплуатации печи давление отклоняется от атмосферного незначительно, а так как продольный градиент потенциала столба пропорционален корню шестой степени из величины давления, то колебания напряженности поля при изменении давления будут незначительны.

В нормальных же условиях при образовании «корок» давление может повыситься значительно. В результате этого может произойти обрыв дуги.

12. Явление сжимающего эффекта в дуге

Гораздо большее значение для строения столба дуги имеет другой фактор, не учитываемый рассмотренной выше формулой, — явления сжимающего эффекта, который обусловлен собственным магнитным полем тока дуги.

Как известно из электротехники, энергия магнитного поля тока, протекающего по проводнику, вызывает электромагнитную силу.

Энергия магнитного поля контура с током выражается уравнением

$$W_k = \frac{1}{2} Li^2, \quad (\text{II-73})$$

где L — индуктивность контура;

i — сила тока.

Электромагнитная же сила равна производной энергии по выбранной координате. Так как в рассматриваемом случае контур тока стремится к увеличению своей индуктивности за счет уменьшения объема, то за независимую координату принимаем объем V , тогда электромагнитная сила будет равна:

$$F = \frac{dW}{dV} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{dV}. \quad (\text{II-74})$$

¹ За исключением, конечно, вакуумных электродов, которые в данной работе не рассматриваются. (Прим. авт.)

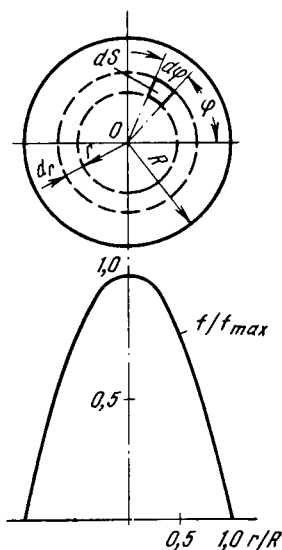


Рис. 30. К расчету сжимающего эффекта. Поперечное сечение столба дуги

Так как производная dL/dV отрицательна, то, следовательно, отрицательна и сила F . Итак, электромагнитная сила будет направлена снаружи внутрь проводника.

Таким образом, столб дуги испытывает давление, направленное радиально от внешней окружности столба к его оси.

В жидких проводниках, например в каналах индукционных печей, при равномерном сечении токопровода равномерное удельное давление не вызывает изменения геометрических размеров проводника, а создает дополнительное аксиальное давление на концы токопровода. Поэтому сжимающий эффект в жидких проводниках проявляется только при нарушении равномерного сечения проводника.

Столб дуги в механическом отношении малоустойчив, поэтому сжимающий эффект может вызвать значительные деформации поперечного сечения газового столба и, при известных условиях, создать высокие плотности газа вдоль оси столба.

Сжимающая сила, действующая на столб дуги, может быть определена с помощью закона взаимодействия между проводником с током и магнитным полем:

$$\overline{dF} = I [dl, \overline{B}], \quad (II-75)$$

где I — ток, протекающий по проводнику;

dl — элемент длины проводника;

B — магнитная индукция поля;

dF — сила, действующая на элемент проводника dl при силе тока I .

Абсолютная величина этой силы определяется из уравнения

$$dF = I dl \cdot B \sin(\overline{dl}, \overline{B}). \quad (II-76)$$

Предположим, что поперечное сечение дуги является круговым, а распределение тока по сечению равномерное. Если R — радиус сечения столба дуги (рис. 30), то плотность тока дуги будет

$$\delta = I/\pi R^2. \quad (II-77)$$

Выберем на произвольном расстоянии от центра дуги площадку $dS = dr \cdot r \cdot d\varphi$. Ток, проходящий через эту площадку,

$$dI = \delta \cdot dS = \frac{I r dr d\varphi}{\pi R^2}. \quad (II-78)$$

Напряженность магнитного поля в рассматриваемой точке определится по закону полного тока; ток внутри контура, радиус которого равен r , будет

$$I_r = \delta S = \frac{l}{\pi R^2} \pi r^2 = \frac{l r^2}{R^2}. \quad (\text{II-79})$$

Длина контура $l_r = 2\pi r$.

Следовательно, напряженность магнитного поля в рассматриваемой точке будет

$$H_r = I_r / l_r = I_r / 2\pi R^2, \quad (\text{II-80})$$

а магнитная индукция

$$B_r = H_r \mu_0 = \frac{I_r}{2\pi R^2} \cdot \mu_0. \quad (\text{II-81})$$

Тогда сила, действующая на ток dI , протекающий по элементу длиной dl , будет

$$dF = dI \, dl B_r. \quad (\text{II-82})$$

Подставив в уравнение (II-82) значения dl и B_r из уравнений (II-78) и (II-81), получим

$$dF = \frac{I^2 r^2 dr \, d\varphi}{2\pi^2 R^4} \mu_0 \, dl. \quad (\text{II-83})$$

Это давление передается на площадку (рис. 31):

$$dS_1 = r \, d\varphi \, dl.$$

Удельное давление, т. е. давление на единицу наружной поверхности объема, по которому протекает ток, будет равно:

$$df = \frac{dF}{dS_1} = \frac{I^2 r \, dr}{2\pi^2 R^4} \mu_0. \quad (\text{II-84})$$

На эту же поверхность передается давление и остальных элементов тока между r и R , поэтому, проинтегрировав dF в пределах от r до R , получим полную силу давления в рассматриваемой точке:

$$f = \mu_0 \cdot \frac{I^2}{4\pi^2 R^4} (R^2 - r^2) = \mu_0 \frac{I^2}{4\pi^2 R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right). \quad (\text{II-85})$$

Формула (II-85) показывает, что на поверхности столба дуги сжимающее давление равно нулю, но с приближением к оси дуги f растет по параболическому закону и на оси дуги достигает максимального значения.

Если силу тока измерять в амперах, а поперечное сечение дуги в квадратных сантиметрах и учесть, что магнитная проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ г/м, то максимальное сжимающее давление будет

$$f_{\max} = 1,02 \cdot 10^{-8} \frac{I^2}{\pi R^2} \text{ кгс/см}^2, \quad (\text{II-86})$$

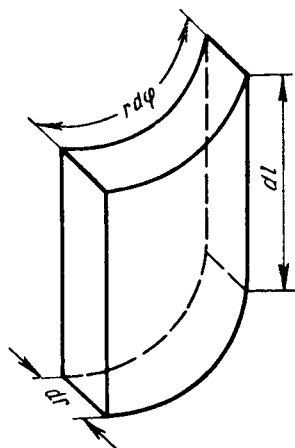


Рис. 31. К расчету сжимающего эффекта. Элемент вдоль радиуса дуги

т. е. сжимающее давление прямо пропорционально квадрату силы тока и обратно пропорционально квадрату радиуса дуги. На рис. 30 был приведен график распределения сжимающего давления в функции расстояния от оси дуги.

В жидких проводниках давление, обусловленное сжимающим эффектом, аналогично гидростатическому. Так как в любой точке давление одинаково передается по всем направлениям, то можно, подсчитав величину давления, направление его выбрать произвольно. Столб дуги по своей структуре неоднороден, поэтому аналогия между сжимающим эффектом в дуге и гидростатическим давлением меньше. Однако с некоторой неточностью и тут можно использовать эту аналогию. При таком допущении очевидно, что сила сжимающего эффекта будет действовать не только радиально, но и аксиально. В поперечном сечении дуги, как было принято на рис. 30, действующая сила определяется уравнением (II-85).

Выделим в сечении (рис. 30) на расстоянии от оси дуги кольцевую площадку высотой dr ; поверхность ее будет

$$dS = 2\pi r dr. \quad (\text{II-87})$$

Сила, действующая на эту площадку, везде будет одинакова и равна:

$$dF_n = f \cdot 2\pi r dr. \quad (\text{II-88})$$

Подставив значение f из уравнения (II-85) и проинтегрировав dF_n по всему сечению дуги, получим общую силу, действующую вдоль оси дуги:

$$F_n = \int_S dF_n = \int_0^R f 2\pi r dr, \quad (\text{II-89})$$

или

$$F_n = \int_0^R \mu_0 \frac{I^2}{4\pi^2 R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) 2\pi r dr = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi}, \quad (\text{II-90})$$

Если силу тока выразить в амперах и учесть $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ г/м, то

$$F_n = 5,1 \cdot 10^{-9} \cdot I^2 \text{ кгс}. \quad (\text{II-91})$$

Это давление вдоль оси дуги передается на основания дуги, т. е. на торец электрода и расплав. Для торца электрода это давление, конечно, не имеет значения, но его воздействие на жидкий расплав значительно.

Максимальное удельное давление в непосредственной близости к оси электрода получим, если зададимся диаметром дуги.

Согласно расчетам, радиус дуги при силе тока 30 кА может достигать 15 см; тогда удельное давление около оси дуги составит

$$f_{\max} = 13 \text{ гс/см}^2.$$

Таким образом, в центральной части столба дуги одновременно будут действовать два противоположных фактора. С одной стороны,

высокая температура центральной части столба дуги обуславливает уменьшение плотности газов вдоль оси дуги, а с другой — вследствие эффекта сжатия наблюдается тенденция к увеличению плотности газов. Как видно, при высоких температурах и большой силе тока эффект сжатия является благоприятным фактором, выравнивающим плотность газовой атмосферы столба дуги в радиальном направлении.

Эффект сжатия имеет и другую положительную сторону. Сжимающее усилие действует на заряженные частицы — электроны и ионы. Так как последние обладают большой массой и относительно большой инерцией, то воздействие сжимающего усилия на них невелико; быстроподвижные же электроны, являющиеся главными носителями тока, легко поддаются воздействию сжимающих усилий и оттесняются к оси столба. Благодаря этому плотность тока около оси столба увеличивается и дуга приобретает большую устойчивость горения.

Однако эффект сжатия дает и весьма отрицательное последствие.

Если по каким-либо причинам на каком-нибудь участке уменьшится поперечное сечение токопровода, то, как видно из формулы (II-84), в этом сечении резко возрастет сжимающее усилие и произойдет обрыв цепи.

Это явление хорошо изучено при работе индукционных печей, где токопроводом служит жидкий металл. В газовой же сфере дуги оно должно проявляться гораздо резче, чем в жидком металле, так как в газе отсутствуют силы сцепления и большие гравитационные силы, которые могли бы уравновесить усилие эффекта сжатия.

Так как в газах единственным фактором, определяющим ориентированное движение заряженных частиц, являются силы электрического поля, то только они могут компенсировать это усилие. Вследствие этого поперечное сечение положительного столба дуги изменяется гораздо легче и чаще, чем поперечное сечение ванны жидкого металла. Поэтому в газовом столбе обрывы тока вследствие эффекта сжатия должны наблюдаться чаще, чем в жидком токопроводе.

Из формулы (II-85) видно, что усилие эффекта сжатия пропорционально квадрату тока, поэтому надо думать, что с этой точки зрения многоамперная дуга должна гореть менее устойчиво, чем малоамперная.

В руднотермических печах неблагоприятное действие сжимающего эффекта смягчается тем, что дуга горит в замкнутом, хорошо изолированном тигле ванны и газовые потоки, возникающие вокруг дуги, не могут в значительной мере повлиять на структуру столба дуги.

13. Температура дуги

Как было отмечено, в разрядном промежутке содержатся молекулы, атомы, электроны и ионы. При различных стадиях развития газового разряда эти частицы находятся в различных температурных условиях.

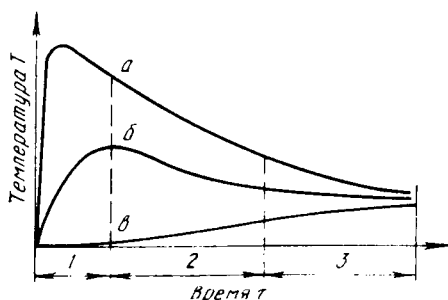


Рис. 32. Выравнивание температуры при установлении дуги:

а — электронов; *б* — возбужденных атомов; *в* — газа; 1 — возникновение разряда; 2 — тлеющий разряд; 3 — дуговой разряд

Так как масса электронов мала, а подвижность велика, то в начальных стадиях газового разряда температура электронов бывает значительно выше температуры нейтральных частиц.

Процесс повышения температуры здесь протекает следующим образом: электроны, получив под действием поля ускорение, сталкиваются с нейтральными молекулами; в результате этого усиливается колебательное движение последних, учащаются их взаимные столкновения и повышается температура газа.

Ускоренные электроны сталкиваются также с отдельными атомами и возбуждают их, т. е. увеличивают их внутреннюю энергию без изменения их заряда. В результате увеличения числа столкновений возбужденных атомов повышается их температура.

Ионы, конечно, также получают ускорение в электрическом поле, но роль их в установлении температурного режима газового промежутка незначительна.

В период возникновения электрического разряда температура частиц отдельных видов, составляющих разрядный промежуток, весьма различна. Наибольшую кинетическую энергию, а следовательно, и температуру имеют электроны. Температура возбуждения газа выше температуры газа и ниже температуры электронов. Однако, уже в этот период и температура электронов, и температура излучения, достигнув максимума, начинают уменьшаться, в то время как температура газа постоянно растет. Поэтому температура отдельных компонентов разрядной среды начинает выравниваться и в дуговом разряде температура всех компонентов положительного столба почти одинакова.

Процесс выравнивания температуры разрядной среды показан на рис. 32. Как видно из рисунка, при устойчиво горящей дуге температура всех частиц среды почти одинакова. Отсюда непосредственно вытекает, что при устойчиво горящей дуге вполне применимо уравнение Саха.

Выше уже было отмечено, что температура дуги, соответствующая минимальному продольному градиенту, пропорциональна

Основным источником электрической энергии при газовом разряде является электрическое поле. Под действием последнего заряженные частицы (электроны и ионы) получают ускорение и их кинетическая энергия, а следовательно, и температура растут.

В свою очередь заряженные частицы часть своей энергии передают нейтральным частицам, в результате чего начинает повышаться и температура последних.

потенциалу ионизации газа, в котором горит дуга, и может быть выражена уравнением (II-56), т. е. $T_d = 800U_i$.

Как сказано выше, эта формула не может претендовать на большую точность, но все же ее можно использовать для ориентировочных расчетов и на основе ее можно определить примерные границы температуры дуги.

Так как наименьший потенциал ионизации элементов меняется от 3,87 до 24,5 В, то из формулы (II-56) следует, что температура дуги при атмосферном давлении и охлаждении лучеиспусканием должна колебаться от 3200 до 20 000 К. Для основных материалов, используемых в руднотермических печах, наименьший потенциал ионизации колеблется от 6 до 10 В и, следовательно, температура дуги для этих материалов при вышеуказанных условиях давления и охлаждения должна составлять 5000—8000 К. В частности, в карбидных печах основным элементом, составляющим газовую среду дуги, является кальций, потенциал ионизации которого равен 6,1 В, и, следовательно, температура дуги в карбидной печи должна составлять ~5000 К. В печах для ферросилиция и ферромарганца потенциал ионизации ведущих элементов колеблется в пределах 7—8 В и температура дуги в них должна быть порядка 6000—7000 К.

Формула (II-56) определяет температуру устойчивой и стабильной дуги. Она не отражает зависимости температуры дуги от таких важных факторов, как сила тока, давление, диаметр дуги, способ охлаждения и т. д.

Теоретическое обоснование зависимости температуры от этих факторов можно найти, исходя из тех же уравнений (II-45), (II-46), (II-49), (II-52), (II-60), которыми мы пользовались при выводе зависимости градиента потенциала от тока.

Исключая из уравнений (II-45) и (II-49) градиент потенциала, получим

$$R^{2+m} = \frac{I^2}{f_1(T) \cdot f_2(T)} \quad (\text{II-92})$$

Из этого уравнения следует, что с увеличением температуры при заданной силе тока радиус дуги уменьшается.

Сила тока и температура при заданном радиусе дуги, наоборот, связаны прямой зависимостью: с увеличением силы тока температура повышается.

Так как количественная оценка по этой формуле не дает надежных результатов, обратимся к экспериментальным данным.

В отношении открытой дуги, горящей в воздухе, существует обширный опытный материал. Большинство исследователей сходится на том, что температура столба угольной дуги, горящей в воздухе, колеблется около 6000 К. Ниже приведены температуры столба некоторых дуг (К) для электродов, выполненных из разных материалов, полученные Сюитсом:

Фитильный уголь	5500
То же: Fe	
с NaCl	4740
с Al	6160
с W	6220

Вольфрамовые электроды	
диаметром 6 мм	5950
Сталь (сварочная дуга)	6020
Медные электроды	4100 ± 300

Л. Леб [17] называет эти данные показательными и отмечает, что они согласуются с результатами, полученными методами измерения, отличными от методов Сюитса.

Как видно, температура столба колеблется в довольно узких пределах. Но наряду с этим не следует пренебрегать тем, что в дуге интенсивной мощности температура достигает 35 000 К.

Температурное поле дуги

Измерение температуры газовых разрядов представляет большие трудности. Тем более трудно определить температуру в отдельных областях разрядного промежутка. Поэтому приводимые в литературе данные о температуре дуги иногда очень сильно отличаются друг от друга. За последнее время были проведены исследования для определения плотности электронов и температурного поля дуги методом спектрального анализа.

В 1953 г. Меккер [39] исследовал низковольтную дугу постоянного тока (100—500 А) с угольными электродами, горящую в воздухе. Это исследование показало, что областью высоких плотностей электронов и высоких температур является катодное пятно. Отсюда обе эти величины уменьшаются как в радиальном, так и в аксиальном направлениях. Наивысшая температура в центре пятна по измерениям Меккера достигла 10 900 К, что совпадает с результатами измерений Гоккера и Финкельнбурга, получившими для той же точки температуру 11 000 К. Диаметр дуги при измерениях Меккера достигал 7—8 мм.

Следует отметить, что Гоккер и Финкельнбург при дуге диаметром 0,84 мм получили температуру катодного пятна, равную 7500 К.

На рис. 33, согласно данным Меккера, приведена кривая распределения температуры в радиальном направлении для дуги при силе

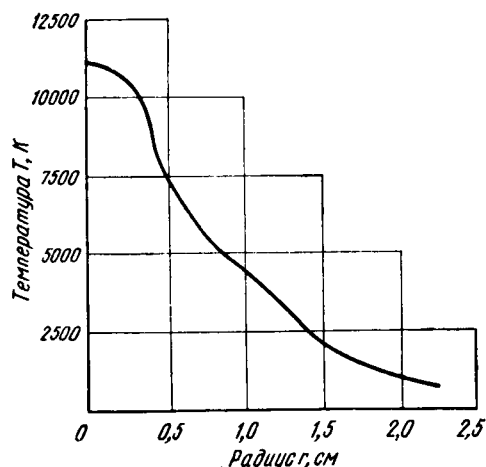


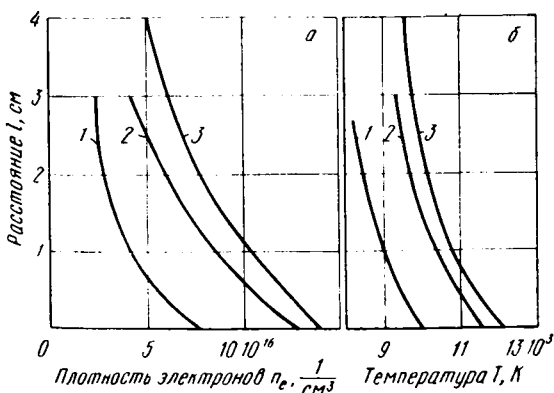
Рис. 33. Распределение температуры дуги при силе тока 200 А в радиальном направлении

тока 200 А на высоте 1,42 см от поверхности катода. Падение температуры от оси дуги к ее граничным слоям, включая и ореол, идет почти по экспоненциальному закону.

На рис. 34 приведены два семейства кривых, показывающих изменение плотности электронов n_e и температуры T дуги в аксиальном направлении при различных токах.

Они показывают, что с удалением от поверхности катода вдоль оси дуги обе эти величины понижаются довольно резко. Эти же кривые показывают, что при увеличении силы тока уров-

Рис. 34. Изменение плотности электронов (а) и температуры дуги (б) в аксиальном направлении при силе тока, А:
1 — 100; 2 — 200; 3 — 500



ни n_e и T растут, но не пропорционально току. В центре катодного пятна плотность электронов при силе тока 100 А составляет $7,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, при возрастании силы тока вдвое она повышается до $13 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а при силе тока 500 А достигает только $14 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

При силе тока 100, 200 и 500 А температура пятна составляет соответственно 10 000, 11 500 и до 12 000 К.

На рис. 35 приведено полное температурное поле дуги при силе тока 200 А и угольных электродах. На рис. 35, а даны изотермы, снятые экспериментально. На рис. 35, б они пополнены кривыми, построенными методом экстраполяции.

На основании кривых рис. 35 можно сделать весьма важные выводы. Так как центры высоких температур находятся в области, прилегающей к катоду, то в этой же области будут находиться центры наиболее интенсивного преобразования электрической энергии в тепловую.

Это позволяет ставить вопрос о локализации преобразования энергии в тигле. Действительно, меняя полярность электрода, можно переместить зону наибольшей концентрации преобразования энергии из одной области тигля в другую.

При переменном токе такая возможность исключается, что как в этом случае при каждом полупериоде изменяет полярность электродов. Поэтому в ряде случаев возникает необходимость перехода к печам постоянного тока.

Рассмотрим теперь изменение температуры столба дуги переменного тока.

На рис. 36 приведены кривые зависимости температуры от силы тока, полученные Энгелем и Штенбеком. Из этих кривых видно, что при максимуме силы тока температура поднимается до 5000 К, а затем снова падает. При прохождении силы тока через нулевое значение температура снижается до 3700 К. Таким образом колебание температуры составляет $\sim 25\text{—}30\%$; в рассматриваемом опыте сила тока менялась синусоидально, без пауз, ее максимум составлял 2А, частота 50 Гц.

На рис. 37 приведено семейство кривых, полученных Буткевичем. При паузах тока температура продолжает держаться на до-

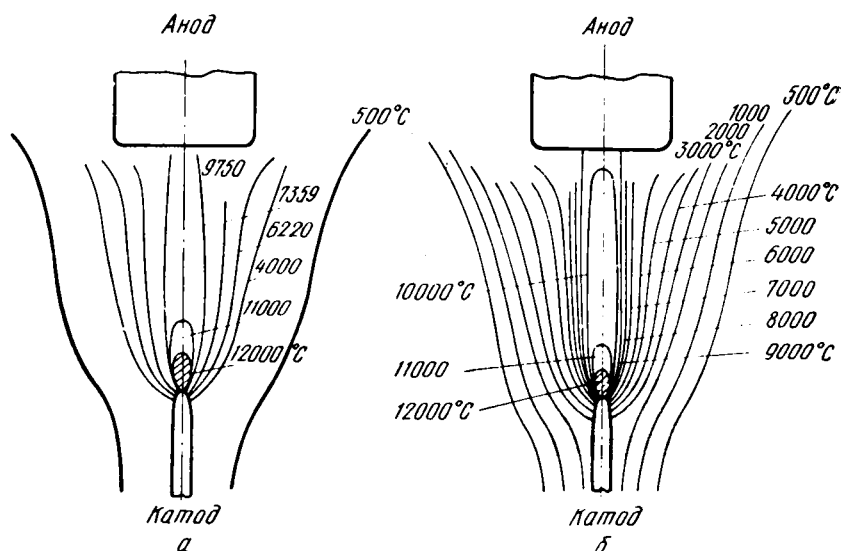


Рис. 35. Изотермы дуги при $I = 200$ А:

а — экспериментальные кривые; б — кривые, дополненные экстраполяцией

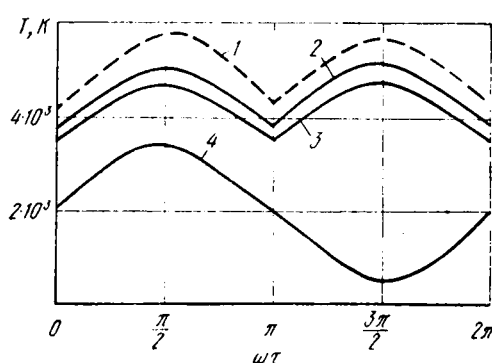


Рис. 36. Изменение температуры дуги переменного тока:

1 — температура по закону идеальных газов; 2 — вероятная действительная температура; 3 — температура диссоциации равновесия; 4 — сила тока

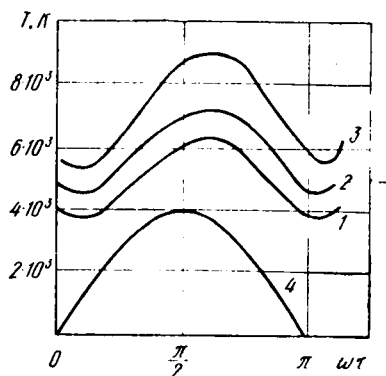


Рис. 37. Температура дуги переменного тока при частоте 50 Гц и различной силе тока, А:

1 — 17; 2 — 26; 3 — 36; 4 — изменение собственно силы тока

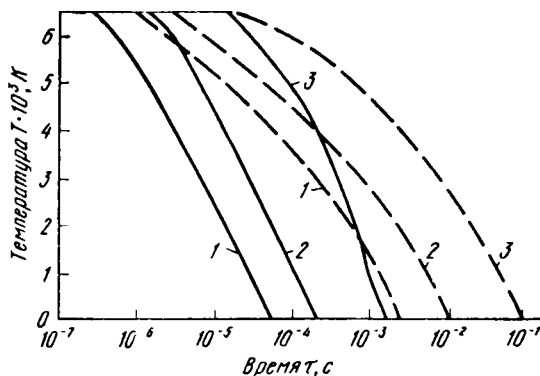


Рис. 38. Охлаждение дуги вследствие теплопроводности в водороде (сплошные кривые) и азоте (пунктирные кривые) при различных диаметрах дуги d , мм:

1 — 1; 2 — 2; 3 — 6.

статочно высоком уровне. Кроме того, в кривых температуры наблюдается явление запаздывания; минимумы температуры наступают позднее перехода кривых тока через нулевые значения.

В электрической печи дуга горит в замкнутом объеме тигля, во всех частях которого устанавливается довольно высокая температура; сила тока дуги достигает нескольких десятков тысяч ампер, в то время как в опытах Энгеля и Штенбека она составляла всего 2 А. Наконец, диаметр дуги в печи достигает десятков сантиметров. Благодаря всем этим обстоятельствам, дуга электрической печи должна обладать значительной тепловой инерцией и, следовательно, диапазон колебаний температуры в течение периода в руднотермической печи должен быть меньше, чем в рассмотренных опытах Энгеля и Штенбека или Буткевича.

Это положение подтверждается также поведением разрядного промежутка после прекращения (погасания) дуги. Как только исчезает ток, дуговой промежуток начинает деионизироваться и охлаждаться. На рис. 38 приведены кривые охлаждения дуги в азоте и водороде по данным Кессельринга.

При построении кривых принято во внимание охлаждение дуги только вследствие теплопроводности. Из кривых видно, что с увеличением диаметра дуги скорость охлаждения резко уменьшается. Для спада температуры с 7000 до 2000 К дуге в азоте различных диаметрах требуется разное время:

Диаметр дуги, мм	1	2	6
Время спада температуры, с	$2 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	0,1

Из этого же рисунка видно, что в водороде дуга охлаждается значительно быстрее, чем в азоте. Водород и азот по теплопроводности занимают почти крайние положения среди газов; кривые, характеризующие остальные газы, располагаются между кривыми этих газов.

Как выяснено выше, диаметр дуги мощной руднотермической печи достигает нескольких десятков сантиметров. Правда, дуга бывает обычно расщеплена на отдельные шнуры, но эти шнуры расположены близко один к другому и весь промежуток между электродами и зеркалом металла, диаметром в 30—40 см (для печи мощностью 7500 кВА), заполнен почти однородной массой одинаковой температуры. Этот столб отделен от поверхности тигля широким поясом, заполненным раскаленными газами.

При таких условиях охлаждение дугового промежутка резко затруднено. Имея в виду логарифмический масштаб оси времени на рис. 38, можно сказать, что для падения температуры дугового промежутка печи от 7000 до 2000 К необходима пауза тока, измеряемая не долями секунд, а целыми секундами. Это будет учтено автором при рассмотрении вопроса о длительности паузы тока в дуговой печи.

Электрические характеристики дуги

1. Характеристики дуги постоянного тока

Взаимосвязь основных отличительных свойств электрического разряда называется его характеристикой. Для дугового разряда в качестве переменных величин принимают ток и напряжение дуги. Характеристики, связывающие эти величины, обычно называют вольтамперными.

Для определения характеристики дуги необходимо обратиться к контуру, содержащему газовый промежуток и переменную электродвижущую силу. Пусть E — э. д. с. источника, r_k и L_k — активное сопротивление и индуктивность, включенные последовательно с дуговым промежутком (рис. 39).

Если постепенно увеличивать э. д. с., то при некоторой ее величине газовая прослойка будет пробита и в цепи установится дуговой разряд.

Напряжение, при котором в контуре возникает электрическая дуга, называется напряжением возникновения $u_{\text{воз}}$ (зажигания) дуги.

С момента возникновения разряда в газовом промежутке существуют все характерные части дугового разряда: катод, катодная область разрядного промежутка, столб, анодная область и анод.

Функциональная зависимость между силой тока и напряжением дуги определяется прежде всего физическим состоянием межэлектродного промежутка и главным образом столба дуги.

Как было отмечено выше, в столбе дуги содержатся заряженные положительные и отрицательные частицы. Однако физическое состояние столба не является статическим. В нем постоянно протекают процессы ионизации, рекомбинации и диффузии.

Если условия горения дуги таковы, что число возникающих в единицу времени зарядов в результате ионизации равно числу зарядов, исчезающих вследствие рекомбинации и диффузии, то плазма столба находится в состоянии динамического равновесия и состояние плазмы не будет являться функцией времени.

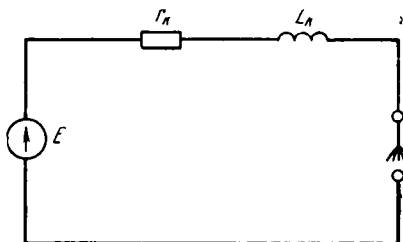


Рис. 39. Электрический контур с дугой

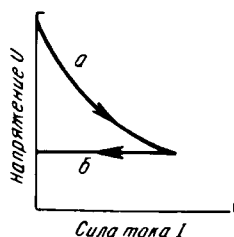


Рис. 40. Характеристика дуги постоянного тока

Режимы работы дуги, при котором плазма столба находится в динамическом равновесии, называется статическим, установившимся режимом.

Если для ряда статических режимов определить значение токов и напряжений дуги, то получим так называемую статическую характеристику дуги (рис. 40, кривая *а*).

Подчеркнем, что для всех точек статической характеристики плазма столба находится в динамическом равновесии, но на разных уровнях электризации. При изменении режима работы дуги динамическое равновесие плазмы нарушается и в дуговом разряде возникают переходные режимы.

Если электрический режим дуги меняется настолько медленно, что тепловые и ионизационные процессы успевают за ним, то функциональная зависимость между силой тока и напряжением остается такой же, как и при статических режимах. В этом случае статическая характеристика отображает состояние дугового промежутка. Очевидно, что в этом случае постоянная времени электризации и деэлектризации газа в разрядном промежутке должна быть значительно меньше постоянной времени параметров, приводящих к изменению электризации газа. Вообще постоянные времени электризации и деэлектризации газа очень малы и измеряются милли- и микросекундами.

Если, например, напряжение или силу тока дугового промежутка изменяют перемещением ручки реостата вручную, то постоянная времени их изменения будет значительно больше. Поэтому характеристики, снятые в этих условиях, будут статическими.

Но электрический режим дуги может изменяться настолько быстро, что продолжительность тепловых и ионизационных процессов окажется больше, и электрическое сопротивление дугового промежутка в данный момент времени будет соответствовать электрическому режиму предшествующего момента. Это явление называется гистерезисом дугового разряда.

Характеристика дугового разряда при наличии явления гистерезиса называется динамической. Очевидно, динамическая характеристика дуги определяется отсутствием динамического равновесия в плазме дугового столба. Отсюда следует, что динамическая характеристика дуги является функцией скорости ионизации и деионизации столба дуги.

Если сила тока дуги изменяется настолько медленно, что деионизация столба во времени совпадает с этим изменением, то динамическая характеристика совпадает со статической и дуга исчезает (гаснет) при том же напряжении, при котором она возникла (зажглась). В другом предельном случае ток в цепи может оборваться настолько быстро, что деионизация вообще отсутствует (рис. 40, кривая *б*), и дуга погаснет при том же напряжении, при котором она горела в начале коммутации. Во всех остальных случаях динамическая характеристика будет лежать между кривыми *а* и *б* (см. рис. 40).

В предыдущих рассуждениях в качестве аргумента была принята сила тока, а в качестве функции — напряжение дуги. Характери-

стики дуги также представляют обычно в виде зависимости напряжения от силы тока. Но это не означает, что изменение силы тока является причиной, а изменение напряжения — следствием.

Причиной нарушения режима и перехода от одного статического состояния к другому при заданных внешних условиях является отклонение градиента потенциала от первоначального состояния, а изменение тока является следствием этого возмущения.

В дуге переменного тока при достаточно высокой частоте градиент потенциала, напряжение, концентрация заряженных частиц и сила тока меняются периодически. Изменение этих величин происходит не одновременно. Изменение градиента потенциала опережает изменение силы тока; отсюда и получается петлеобразное изменение характеристики дуги переменного тока.

Остановимся теперь кратко на видах статических характеристик электрических приемников, чтобы определить среди них место дуговых разрядов.

Статические характеристики, как было сказано, представляют собой зависимость напряжения дуги от силы тока. Вид этой характеристики зависит от индивидуальных свойств приемника и условий протекания тока. При большом разнообразии этих характеристик их можно разбить примерно на четыре группы.

Приемники с равномерно возрастающей характеристикой (линейные элементы цепи). Сопротивление таких приемников не зависит от электрического режима и остается постоянным при всех значениях силы тока. Очевидно, что при постоянном сопротивлении напряжение приемника прямо пропорционально току:

$$U = IR, \quad (\text{III-1})$$

и статическая характеристика представляет собой прямую линию. Примером такого рода приемников являются некоторые металлические проводники с малым температурным коэффициентом. На рис. 41 статическая характеристика такого рода проводника представлена прямой aa .

Приемники с неравномерно возрастающей характеристикой. Таковую характеристику имеют некоторые твердые проводники. Сопротивление таких приемников уже не является постоянным и с изменением силы тока меняется, причем зависимость между сопротивлением и силой тока может быть самой разнообразной. У одних приемников с увеличением силы тока сопротивление растет, а у других уменьшается.

В первом случае выпуклость вольтамперной характеристики будет обращена вниз, а во втором — вверх.

Характеристики таких приемников приведены на рис. 41. Кривая $b_1 b_1$ является статической характеристикой приемника, характеризующегося отрицательным температурным коэффициентом, а $b_2 b_2$ — положительным.

Для иллюстрации этой группы приемников на рис. 42 приведены кривые зависимости сопротивления некоторых металлов от температуры (следовательно, и от силы тока).

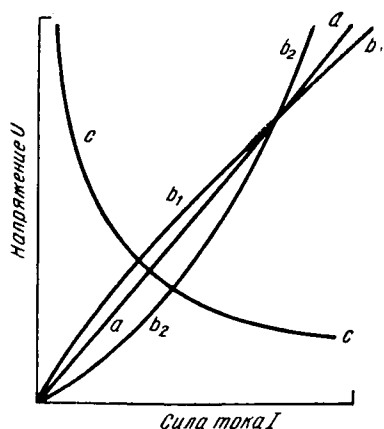


Рис. 41. Статические характеристики приемников различных видов

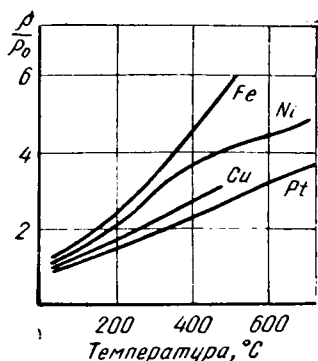


Рис. 42. Зависимость удельного сопротивления некоторых металлов от температуры

Приемники с падающей характеристикой. Типичным приемником такого рода является дуга. В нормальных температурных условиях сопротивление газового слоя велико и тока в цепи нет. После пробоя сопротивление дугового промежутка падает. Поэтому с увеличением силы тока напряжение дуги все время уменьшается. Однако темп изменения сопротивления и напряжения дуги не на всех участках одинаков. В начальной стадии с изменением силы тока напряжение меняется довольно быстро, но, начиная с некоторого значения силы тока, темп этот уменьшается и кривая *сс* напряжения дуги идет почти параллельно оси абсцисс (см. рис. 41).

Приемники со сложной характеристикой. При некоторых условиях горения электрической дуги статическая характеристика, кроме падающей, имеет и восходящую ветвь. С увеличением силы тока напряжение на дуге сначала падает, а потом повышается и дуговой промежуток по своему характеру приближается к металлическому проводнику с положительным температурным коэффициентом. Такими приемниками являются дуговой разряд в парах ртути при слабом охлаждении трубки лампы высокого давления и угольная дуга высокой интенсивности. На рис. 25 кривая *d* изображает вольт-амперную характеристику такой дуги. Как видно, кривая в точке *e* достигает минимума: в точках f_1 и f_2 напряжение дуги одинаково, несмотря на то что ток в точке f_2 значительно больше, чем в точке f_1 .

Наряду со статическими характеристиками электрические приемники, в частности электрические дуги, хорошо характеризуются зависимостями сопротивления приемника от силы тока. Поэтому на рис. 43 приведены эти зависимости для четырех приемников разобранных выше типов.

Исторически возникновение вольтамперных характеристик дуги относится к тому периоду развития техники, когда электронная теория не была еще разработана в такой степени, чтобы можно было ее положить в основу теории дуги.

Остановимся вкратце на эмпирических формулах, выражающих вольтамперную характеристику. Наиболее известными из всех эмпирических формул являются следующие:

$$U = a + bl + \frac{c}{I} + \frac{dl}{I}; \quad (\text{III-2})$$

$$U = a + \frac{c + dl}{I}; \quad (\text{III-3})$$

$$U = a + bl + \frac{c + dl}{I^n}. \quad (\text{III-4})$$

В этих формулах a , b , c и d — постоянные коэффициенты, зависящие от материалов электродов, например, для дуги с медными электродами, горящей в воздухе, $a = 30$ В; $b = 10$ В/см; $c = 10$ ВА и $d = 30$ ВА/см.

В формуле (III-4) $n = 2,62 \cdot 10^{-4} T_{\text{кип}}$, где $T_{\text{кип}}$ — температура кипения материала анода, К. Выражение (III-2) получено Г. Айртон в результате проведенных ею многочисленных опытов над малоамперными дугами между угольными электродами. Формула представляет частный случай более общей формулы (III-4) при $n = 1$.

На рис. 44 приведены две характеристики дуги, построенные по формуле Г. Айртон. Как видим, с увеличением тока все они асимптотически приближаются к постоянному значению.

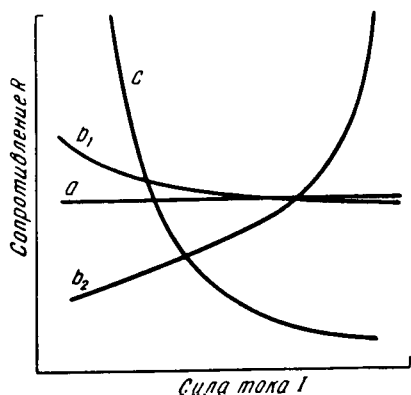


Рис. 43. Зависимость сопротивления от силы тока для различных приемников: a — линейный элемент; b_1 — приемник с неравномерно возрастающей характеристикой и отрицательным температурным коэффициентом; b_2 — то же, с положительным температурным коэффициентом; c — приемник с более резко падающей характеристикой

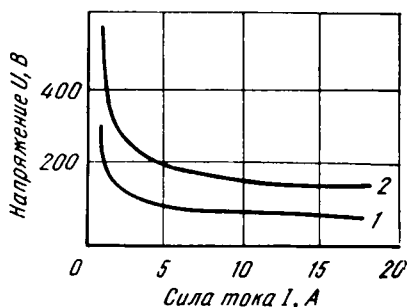


Рис. 44. Вольтамперная характеристика дуги постоянного тока согласно данным А. М. Залесского. Электроды медные; длина дуги: 1 — 2 см; 2 — 6 см

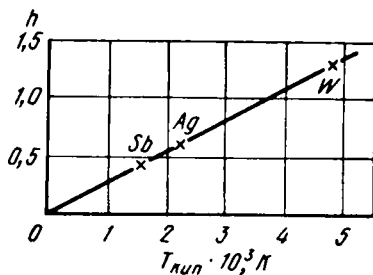


Рис. 45. Зависимость показателя степени n от температуры кипения металлов $T_{\text{кип}}$

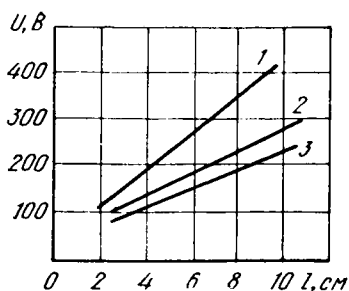


Рис. 46. Линейная зависимость напряжения U дуги от ее длины l для силы тока в диапазоне:
1 — 930—1150 А; 2 — 680—880 А;
3 — 410—590 А

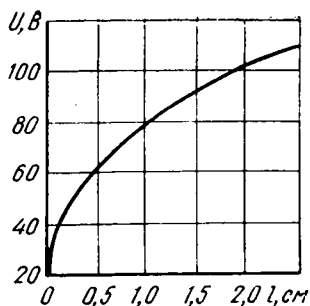


Рис. 47. Нелинейная зависимость напряжения U дуги от ее длины l

На рис. 45 приведена прямая, характеризующая зависимость показателя степени n от температуры. На графике отмечены точки кипения ряда материалов, из которых выполняется анод.

Этот график показывает, что с увеличением температуры показатель степени силы тока растет и, следовательно, влияние температуры на напряжение дуги уменьшается. Кроме того, температура испарения материала анода лимитирует повышение температуры прианодной части разрядного промежутка.

Следует обратить внимание также на зависимость напряжения дуги от длины разрядного промежутка. Согласно формулам (III-2) и (III-3), эта зависимость линейна. Иногда эта зависимость действительно бывает линейной (рис. 46), но в большинстве случаев она отступает от линейности (рис. 47).

Все эти формулы получены в результате обработки материалов наблюдений над маломощными и короткими дугами, поэтому встречающиеся в литературе значения постоянных мало пригодны для трактруемых нами мощных и длинных дуг.

В настоящее время можно дать определенную физическую интерпретацию слагаемых формул. Первый постоянный член во всех формулах представляет собой сумму падений напряжений в катодном и анодном пространствах, а также в переходных областях разряда. Второй член характеризует ту часть падения напряжения в столбе, которая не зависит от силы тока. Последние два члена представляют те же падения напряжения, но зависящие от силы тока.

В общем виде вольтамперное уравнение дугового разряда может быть написано:

$$U = U_{\text{кат}} + U_{\text{ан}} + U_{\text{п}} + E_{\text{д}}(i, p, r)l, \quad (\text{III-5})$$

где $U_{\text{кат}}$ — катодное падение потенциала;

$U_{\text{ан}}$ — анодное падение потенциала;

$U_{\text{п}}$ — падение потенциала в переходных областях.

Последний член уравнения представляет собой величину падения потенциала в столбе, причем продольный градиент потенциала

дуги E_d в формуле изображен как функция силы тока, давления и радиуса дуги.

В свете современной электронной теории понятно, почему на основании экспериментов не удавалось создать одну формулу, характеризующую все дуговые разряды и связывающую друг с другом значения силы тока и напряжения дуги через постоянные коэффициенты. Теперь ясно, что основными факторами, определяющими характер дуги, являются ионизация, деионизация и диффузия газовых частиц и температурный режим дуги. Без учета этих факторов нельзя дать ни физического объяснения процесса горения дуги, ни математической интерпретации его.

Однако упомянутые эмпирические формулы не потеряли своего практического значения и по настоящее время. С определенными оговорками ими можно пользоваться для практических расчетов и сейчас.

В отношении руднотермических печей приближенную формулу такого характера можно составить, исходя из следующих соображений.

Падение потенциала на катоде, аноде и в переходных областях для руднотермических печей всех типов представляет собой более или менее постоянную величину и приблизительно равно потенциалу ионизации среды, в которой горит дуга. Его можно оценить в 15—25 В. Напряженность поля обратно пропорциональна силе тока в степени n . Как мы видели, значение n может изменяться в довольно широких пределах и даже становиться отрицательным. Зависимость напряженности поля от давления вообще очень слаба. Кроме того, надо учесть, что почти во всех печах дуга горит при давлении, близком к атмосферному. Поэтому можно пренебречь этой зависимостью, и тогда приближенная формула для напряжения дуги печи постоянного тока получит вид

$$U = a + \frac{E_d}{I^n} \cdot I. \quad (\text{III-6})$$

Формула в таком виде довольно близко подходит ко второй из вышеприведенных формул. Она тоже, конечно, является приближенной. Мы видели выше, что вольтамперная характеристика может иметь и нисходящую и восходящую ветви; формула (III-6) не отражает этого явления и, следовательно, применение ее ограничено.

Но печи постоянного тока имеют ограниченное практическое значение, поэтому в отношении их мы ограничимся вышеприведенными данными и рассмотрим подробнее характеристики дуги переменного тока.

2. Методы графического изображения характеристик цепи переменного тока

Взаимозависимость между током и напряжением в цепях переменного тока можно выразить различными методами.

Первый метод состоит в том, что ток и напряжение изображают в функции времени:

$$u = f(\tau) \text{ и } i = f_1(\tau). \quad (\text{III-7})$$

Этот метод, как известно, широко используют в электротехнике при исследовании цепей переменного тока. Обычно на одной оси времени строят кривые силы тока и напряжения и сравнивают их.

Но между силой тока и напряжением можно установить и непосредственную функциональную зависимость, если из уравнений (III-7) исключить время τ . Таким образом, и для цепей переменного тока мы получаем вольтамперные характеристики. Так как в этом случае взаимозависимость напряжения и силы тока является функцией времени и последующее состояние цепи зависит от предыдущего, то характеристики цепи в этом случае называются динамическими.

Первый метод исследования цепей переменного тока имеет, между прочим, то преимущество, что на осциллограммах непосредственно получаем значения силы тока и напряжения для любого момента времени. Для получения же из осциллограммы вольтамперной характеристики необходимо построить новую кривую, беря по осциллограмме значения силы тока и напряжения для отдельных моментов времени. Непосредственно вольтамперные характеристики можно получить с помощью катодного осциллографа. Присоединив одну цепь осциллографа параллельно, а другую — последовательно дуге, получим кривые, которые характеризуют функциональную зависимость между силой тока и напряжением.

Наконец, можно (как это сделано на рис. 48) сочетать друг с другом оба эти вида изображения кривых и получить как зависимость силы тока и напряжения от времени, так и вольтамперную характеристику.

Форма кривых силы тока, напряжения и динамической характеристики приемника может меняться в весьма широких пределах в зависимости от свойств приемника и режима его работы.

На рис. 49, а и б приведены статические и динамические характеристики и кривые силы тока и напряжения для перечисленных выше характерных видов приемников.

На рис. 49, а приведены графики приемника, сопротивление которого остается постоянным при любом режиме работы. В этом случае динамическая характеристика совпадает со статической и кривые напряжения и силы тока подобны. При

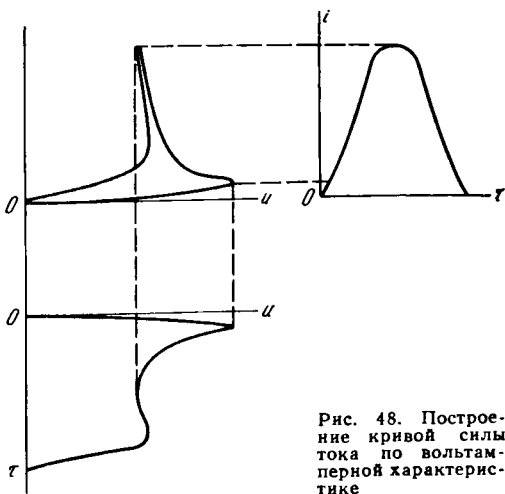


Рис. 48. Построение кривой силы тока по вольтамперной характеристике

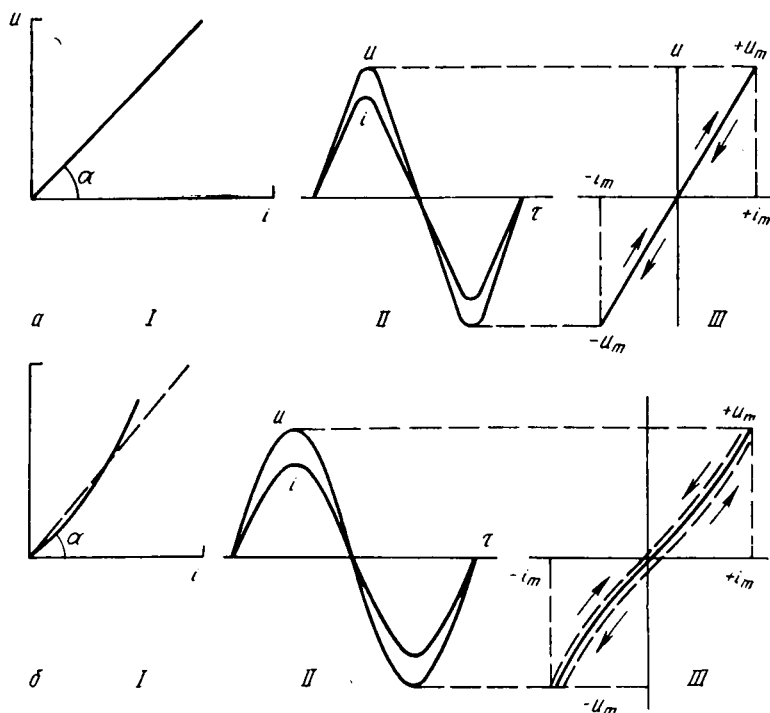


Рис. 49. Графики приемника переменного тока:

I — статическая вольтамперная характеристика; *II* — осциллограмма тока и напряжения; *III* — динамическая вольтамперная характеристика

синусоидальной форме напряжения кривая силы тока также синусоидальна.

На рис. 49, б изображен случай с возрастающей статической характеристикой. Здесь динамическая характеристика может отличаться от статической, так как сопротивление приемника зависит не только от величины силы тока, протекающего через приемник в данный момент, но и от его предшествующего состояния. Когда частота тока достаточно мала, то при спаде тока рассеяние тепла, выделяющегося в приемнике, поспевает за спадом тока. Сопротивление этого приемника также падает и соответствует величине, определяемой статической характеристикой. Аналогично, при увеличении силы тока изменение сопротивления следует за изменением силы тока. В этом случае динамическая характеристика совпадает со статической. Если же частота тока велика, то явление протекает иначе. Скорость рассеяния тепла, выделяющегося в приемнике, меньше скорости изменения силы тока и температуры, а следовательно, и величина сопротивления приемника соответствует предшествующему, а не данному значению времени. В этом случае кривая динамической характеристики (см. рис. 49, б) отличается от статической. Так как с повышением частоты диапазон колебаний температуры и, вместе с тем

сопротивления, уменьшается, то динамическая характеристика отступает от прямой меньше, чем статическая.

Аналогичная картина наблюдается и у приемника с падающей статической характеристикой.

Если процесс изменения силы тока происходит медленно и скорость изменения температуры соответствует скорости изменения силы тока, то статическая и динамическая характеристики будут совпадать; в противном случае динамическая характеристика будет ближе к линейной зависимости между током и напряжением, чем статическая.

3. Характеристики дуги переменного тока

В литературе опубликовано большое число осциллограмм дуги переменного тока. При большом разнообразии материалов электродов и среды почти все осциллограммы относятся к маломощным дугам.

На рис. 50, *а*, *б* приведены две типичные осциллограммы дуг переменного тока. Характерная их особенность — искажение кривых силы тока и напряжения. Как известно, в электрической цепи, не содержащей дуги, при синусоидальной форме кривой напряжения кривая силы тока также имеет синусоидальную форму и проходит через нулевые точки без паузы; на приведенных выше осциллограммах кривые силы тока имеют более или менее длительные паузы. После паузы сила тока нарастает, достигает максимума и опять начинает падать. До конца полупериода ток снова обрывается и начинается новая пауза. Кривая напряжения имеет иной характер. В период паузы напряжение на электродах разрядного промежутка нарастает. Когда это напряжение достигает определенной для данной дуги величины (напряжение возникновения $u_{\text{воз}}$ или напряжение зажигания), разрядный промежуток пробивается, и в цепи начинает протекать ток. С момента пробоя дугового промежутка напряжение на зажимах дуги снова падает до определенной для данной дуги

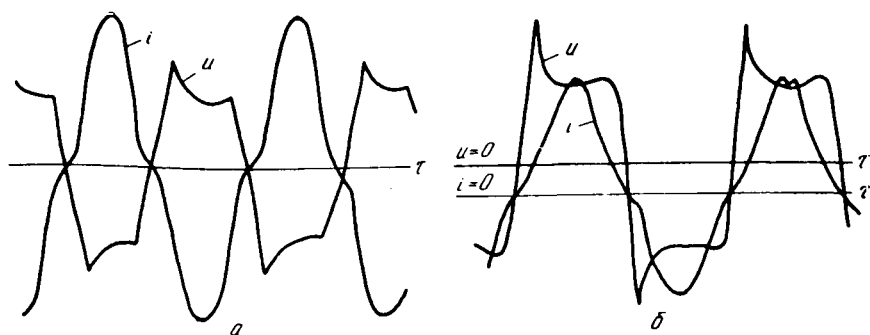


Рис. 50. Осциллограммы маломощной дуги:

а — с незначительными искажениями силы тока I и напряжения U ; *б* — с искажениями I и U , большими, чем на рис. *а*

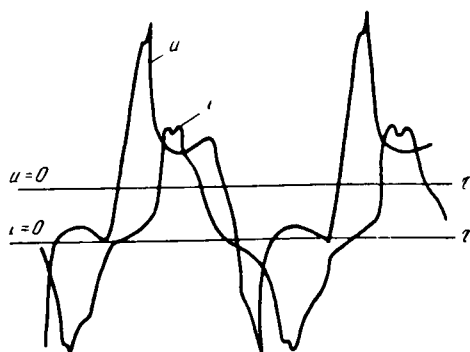


Рис. 51. Осциллограмма маломощной дуги с повторными пиками

величины («напряжения горения»). Это напряжение остается почти постоянным за время прохождения тока через цепь. К концу полупериода, когда ток приближается к нулю, напряжение на дуге снова начинает возрастать и, достигнув некоторого максимума (напряжения исчезновения или напряжения потухания), падает до нуля. Таким образом, кривая тока характеризуется более или менее длительными паузами, а кривая напряжения дуги —

тремя величинами: напряжением возникновения, горения и исчезновения разряда.

Приведенные выше типы осциллограмм, конечно, не являются единственно возможными. Часто и в кривых тока, и в кривых напряжения появляются повторные, более или менее ясно выраженные пики (рис. 51).

Пользуясь понятием сопротивления разрядного промежутка, все явления в цепи дуги можно охарактеризовать следующим образом. В течение паузы тока сопротивление цепи равно или близко к бесконечности, дуговой промежуток представляет собой диэлектрик и ток через него не проходит (или проходит исчезающе малый ток). При напряжении возникновения разряда сопротивление дуги резко падает и начинает протекать ток. В дальнейшем сопротивление дуги продолжает снижаться, но с меньшим темпом. После прохождения тока через максимум сопротивление дуги начинает нарастать в том же медленном темпе, и ток уменьшается. При приближении тока к нулю (напряжение исчезания разряда) сопротивление снова резко возрастает до бесконечности и дуга гаснет.

По осциллограммам силы тока и напряжения можно построить и вольтамперные характеристики дуги. Из кривых, приведенных на рис. 50, а, б и 51 видно, что для поддержания дуги в период нарастания тока требуется большее напряжение, чем в период убывания.

По одним только осциллограммам нельзя создать общую теорию дуги. Однако на основании осциллограмм можно сделать два весьма важных вывода:

- 1) с увеличением длины дуги растут все три напряжения (возникновения, горения и исчезновения);
- 2) с увеличением максимального значения силы тока все три напряжения уменьшаются.

Рассмотрим теперь процесс горения дуги переменного тока в свете современной электронной теории.

Разница между металлическим проводником и дугой с точки зрения электропроводности заключается в следующем.

В металлическом проводнике всегда имеется громадное число свободных электронов (электронный газ). С появлением внутри металла электрического поля эти электроны приходят в ориентированное движение и создают электрический ток в проводнике. В определенных, довольно узких пределах температуры, сила тока в точности соответствует разности потенциалов и сопротивление металла, представляющее собой коэффициент пропорциональности между силой тока и напряжением, остается постоянным.

В нормальных температурных условиях в разрядном промежутке нет свободных заряженных частиц, они создаются ионизацией. На катоде происходит термоэлектронная или электростатическая эмиссия, а в столбе дуги — ионизация газов. Параллельно с этими явлениями происходят рекомбинация и диффузия заряженных частиц из разрядного промежутка. Этими факторами и обуславливается сила разрядного тока.

Если градиент потенциала, приложенного к столбу дуги, достаточно высок и обеспечивает настолько высокую ионизацию разрядного промежутка, что компенсируются потери заряженных частиц в столбе, то проводимость дуги остается неизменной и дуга будет гореть при постоянной величине тока.

Если по какой-либо причине уменьшится градиент потенциала, то уменьшится и ионизация столба дуги; число новых заряженных частиц, появляющихся в единицу времени, будет меньше числа частиц, исчезающих вследствие деионизации; проводимость дуги будет уменьшаться и она будет гаснуть. Если же, наоборот, градиент потенциала столба дуги возрастет, то вместе с ним увеличится и ионизация. Благодаря этому возрастает проводимость, а следовательно, и сила тока дуги. Процесс этот будет длиться до тех пор, пока в столбе дуги не установится новое равновесное состояние. Таким образом, в дуге постоянного тока существует динамическое равновесие заряженных частиц. Сколько частиц исчезает из столба дуги благодаря току и деионизации, столько же примерно появляется благодаря ионизации. Число заряженных частиц остается постоянным и соответствует данным условиям горения дуги, так как процесс ионизации столба дуги зависит не только от градиента потенциала, но и от физического состояния и степени ионизации самого столба и свойств газовой среды, в которой горит дуга.

Для дуги переменного тока в момент перехода градиента потенциала через нуль ионизация в столбе дуги прекращается, но факторы, обуславливающие деионизацию дугового промежутка, продолжают действовать, и число заряженных частиц начинает уменьшаться. При этом очень быстро возрастает сопротивление столба и ток падает. В зависимости от скорости обратного нарастания градиента потенциала в дальнейшем ток в дуге либо будет поддерживаться, либо она погаснет. Если градиент потенциала после прохождения через нуль нарастает достаточно быстро и газовый промежуток снова ионизируется с такой интенсивностью, что убыль заряженных частиц покрывается, то ток в цепи будет поддерживаться и дальше

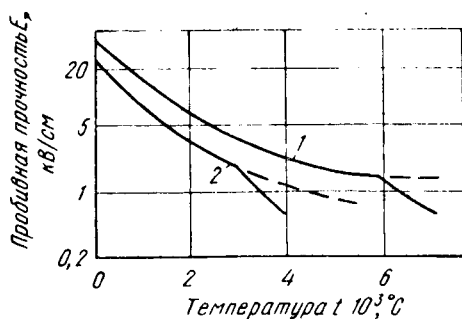


Рис. 52. Зависимость пробивной прочности от температуры:
1 — азот; 2 — водород

и возникнет устойчиво горящая дуга. В противном случае дуга погаснет.

Таким образом, в плазме столба дуги периодического переменного тока происходит квазистационарный процесс. Вместе с изменением градиента потенциала и силы тока периодически меняется число заряженных частиц и проводимость дугового промежутка.

Как было отмечено, процессы ионизации и деионизации зависят от физических свойств

среды, в которой горит дуга, а также от температуры и давления. Так как в печных дугах давление почти всегда равно атмосферному, то можно с достаточным приближением принять этот фактор постоянным и рассматривать изменение ионизации и деионизации в зависимости от свойств газовой среды и температуры.

На рис. 52 приведены кривые зависимости пробивной прочности водорода и азота от температуры. Как видно, при нормальной температуре их прочность измеряется десятками киловольт на сантиметр, а при 6000—7000 К она составляет < 1 кВ/см.

По теплопроводности эти два газа занимают крайние положения. У водорода наибольшая теплопроводность и теплоемкость, а у азота — наименьшая. Значения теплопроводности остальных газов располагаются между ними. Поэтому можно сказать, что и для печных газов, составляющих атмосферу дуги, электропроводность с повышением температур повышается.

В период существования тока температура всех частиц разрядной среды почти одинакова, и уровень температуры также довольно высок. Степень же ионизации, как показывает уравнение Саха, сильно зависит от температуры. Поэтому в период прохождения тока газовый столб дуги имеет высокую температуру и сильно ионизирован. В печи для выплавки ферросилиция, например при 7000 К, ионизация железа достигает 5,4, а кремния — 4,4%. Но при снижении температуры до 5000 К ионизация для обоих этих элементов падает почти в 10 раз. Следовательно, для дуги ферросилициевой печи температурные пределы 5000—7000 К являются оптимальными.

Совершенно иначе ведет себя карбидная печь. Основным элементом газовой сферы печи является кальций. Известно, что при 5000 К ионизировано 2% газа, а при 4000 К — 0,25%. При 7000 К кальций ионизируется уже на 21,8%. Следовательно, для карбидной печи критическими пределами являются 4000—5000 К.

Рассмотрим вопрос о скорости исчезновения объемной ионизации и снижения температуры в период паузы тока в печной дуге.

Заряженные частицы исчезают из разрядного промежутка, как указано выше, вследствие рекомбинации и диффузии.

Анализ этих процессов показал, что с понижением температуры рекомбинация растет, объемные заряды быстро исчезают из разрядного промежутка и газ быстро деэлектризуется. И, наоборот, при повышении температуры газ электризуется. Таким образом, для процессов электризации и деэлектризации температура играет решающую роль.

Выше было показано, что температура в печной дуге находится на весьма высоком уровне. Можно предположить, что в периоды паузы тока она не опускается ниже 5000 К. На рис. 35 было приведено температурное поле дуги. Из этого рисунка видно, что даже при силе тока 200 А и температуре ореола дуги 500—1000 К в дуговом промежутке поддерживаются температуры 9000—11 000 К, а, как будет видно далее, в ванне печи даже в значительном отдалении от столба дуги длительно поддерживаются температуры 1500—2000 К.

Отсюда можно сделать вывод, что *рекомбинация в печной дуге протекает значительно медленнее, чем в малоамперных открытых дугах.*

Вернемся еще раз к экспериментальным данным. На рис. 38 были приведены кривые зависимости падения температуры от паузы тока при условии, что дуга охлаждается только вследствие теплопроводности. Из этих кривых видно, что для дуги, диаметр которой равен 1 мм, спад температуры начинается только через 1 мкс от начала паузы тока. Для дуги в азоте при диаметре 6 мм на падение температуры от 6500 до 5000 К требуется ~ 1 мс, а при диаметре в 1 мм $\sim 0,1$ мс.

Для кремния при 6500 К степень ионизации равна 0,22%, а при 5000 К она составляет 0,024%. Значит в дуге, атмосферу которой составляют пары кремния, ионизация уменьшается с 0,22 до 0,024% в течение 0,1 мс, если диаметр дуги равен 1 мм.

При диаметре дуги в 6 мм для такой же степени деионизации потребуется 1 мс, т. е. в 10 раз больше времени.

Еще более благоприятные результаты получаются для кальция. При 6500 К ионизация кальция составляет 14, а при 5000 К — 2%.

Так как диаметр столба дуги руднотермической печи значительно больше, чем в приведенных выше примерах, то деионизация рекомбинацией в этом случае должна протекать значительно медленнее.

В руднотермических печах при стандартной частоте 50 Гц длительность промежутка времени от перехода напряжения через нуль до его максимума составляет 5 мс. Половины же амплитудного значения напряжение достигает через 1,66 мс. В нормальных условиях работы печи наличие тока в печи при напряжении, равном половине максимума, не подлежит никакому сомнению. Это хорошо подтверждается осциллограммами печей. Следовательно, если существуют более или менее длительные паузы тока около точки перехода через нуль, то они должны заканчиваться в течение, примерно, первой десятой доли периода, т. е. в течение 1 мс. А между тем приведенные выше расчеты показывают, что даже через 10 мс концентрация заряженных частиц не может упасть ниже той критической величины,

при которой существование тока дуги было бы невозможно. Поэтому при нормальной работе печи объемная рекомбинация ионов не может служить причиной задержки повторного возникновения дуги.

Справедливо будет, конечно, и обратное заключение: в период спада тока от его максимума рекомбинация не может настолько изменить концентрацию заряженных частиц, чтобы ток оборвался раньше окончания полупериода. Убывание заряженных частиц из разрядного промежутка определяется также диффузией.

Процессы диффузии были рассмотрены нами раньше.

Скорость диффузии прямо пропорциональна концентрации заряженных частиц и обратно пропорциональна квадрату диаметра дуги.

Отсюда следует, что эффект диффузии как дугогасящего фактора с увеличением диаметра дуги резко падает. Это хорошо известно конструкторам масляных выключателей. В руднотермических печах такое явление весьма важно и благоприятно для стабилизации дуги. На рис. 53 приведены три кривые, характеризующие деионизацию диффузией разрядного промежутка в воздухе или в азоте при различных диаметрах дуги. Из этих кривых видно, что для уменьшения концентрации ионов с 10^{16} до 10^7 при диаметре в 1 мм требуется пауза тока в 0,2 мс, а при диаметре в 3 мм почти в 10 раз больше.

В электропечах горит электрическая дуга диаметром в несколько сантиметров. При таких диаметрах для деионизации дугового промежутка диффузией нужны паузы тока, измеряемые целыми секундами. Конечно, когда говорят о дуге диаметром 30—40 см, то не представляют ее, как нечто цельное. Несомненно, она состоит из отдельных нитей, шнуров, но эти нити расположены в непосредственной близости друг к другу, а ионы, диффундирующие из одной нити, должны попасть в другую.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что в печных дугах диффузия ионов существенной роли играть не может и не может служить причиной деионизации дугового промежутка, как в малоамперных дугах или же в многоамперных, но искусственно расщепляе-

мых дугах, примерами которых служат дуги в деионных масляных выключателях.

Таким образом, единственным деионизирующим фактором в мощной печной дуге при нормальных условиях можно считать процесс рекомбинации. Но выше мы видели, что в промежутке времени спада и нарастания напряжения около нулевой точки рекомбинация не может уменьшить концентрацию заряженных частиц ниже той

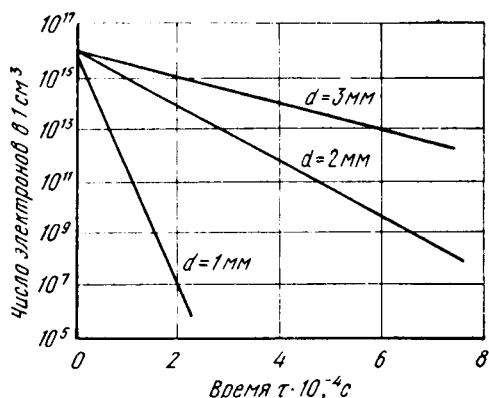


Рис. 53. Интенсивность деионизации диффузией заряженных частиц из столба дуги

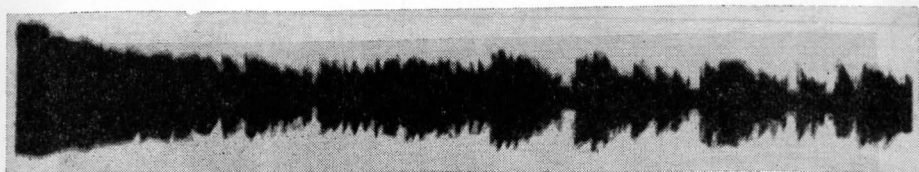


Рис. 54. Осциллограмма дуги сталеплавильной печи; кривая силы тока имеет длительные паузы

критической величины, за которой обычно следует обрыв тока.

Поэтому кривая тока печной дуги при нормальных условиях эксплуатации печи не имеет разрывов и при перемене знака плавно проходит через нулевое значение.

Частые обрывы тока дуги с резкими искажениями формы напряжения наблюдаются в сталеплавильных печах, в особенности в период расплавления. В подтверждение этого на рис. 54 приведена кривая тока с обрывами. Однако основной причиной этих искажений и обрывов тока в большинстве случаев являются короткие замыкания электрода с хорошо проводящей шихтой или расплавом. В результате короткого замыкания дуга исчезает и эффективное значение силы тока достигает максимальной величины $I_{к.з.}$, определяемой внешними параметрами печного контура. Для уменьшения тока до номинального значения регуляторы поднимают электроды, нарушается контакт между электродом и шихтой, и снова возникает дуга. Таким образом, в этом случае исчезновение и возникновение дуги является следствием появления и нарушения контакта между электродом и шихтой. Горение дуги в этом случае носит переходящий характер и само становление или исчезновение дуги длится долго — несколько десятков периодов. Внутри же каждого полупериода ток имеет более или менее длительные паузы со значительными искажениями формы тока и напряжения дуги. К дугам этого вида мы вернемся позднее при рассмотрении сталеплавильных печей, здесь же еще раз подчеркнем, что приведенный выше вывод относится к нормальному режиму горения дуги. Если по каким-либо причинам этот режим нарушается, то деионизация может привести не только к прерывистому горению дуги, но и к полному ее исчезновению.

Наши соображения о процессе горения и повторного зажигания дуги хорошо подтверждаются данными О. Б. Брона [1], который проводил опыты с гашением многоамперных дуг при перегорании плавких вставок.

На рис. 55 приведены кадры скоростной киносъемки гашения дуги при силе тока 10 000 А и напряжении 500 В. Промежуток времени между двумя последовательными снимками равен 0,17 мс. Из рисунка видно, что при включении контура возникает и развивается мощная дуга. Длительность всего процесса возникновения и гашения дуги составляет всего 1,7 мс (десять кадров).

После исчезновения первой дуги между электродами возникает повторная дуга. Однако объем, занятый первой дугой, как показы-

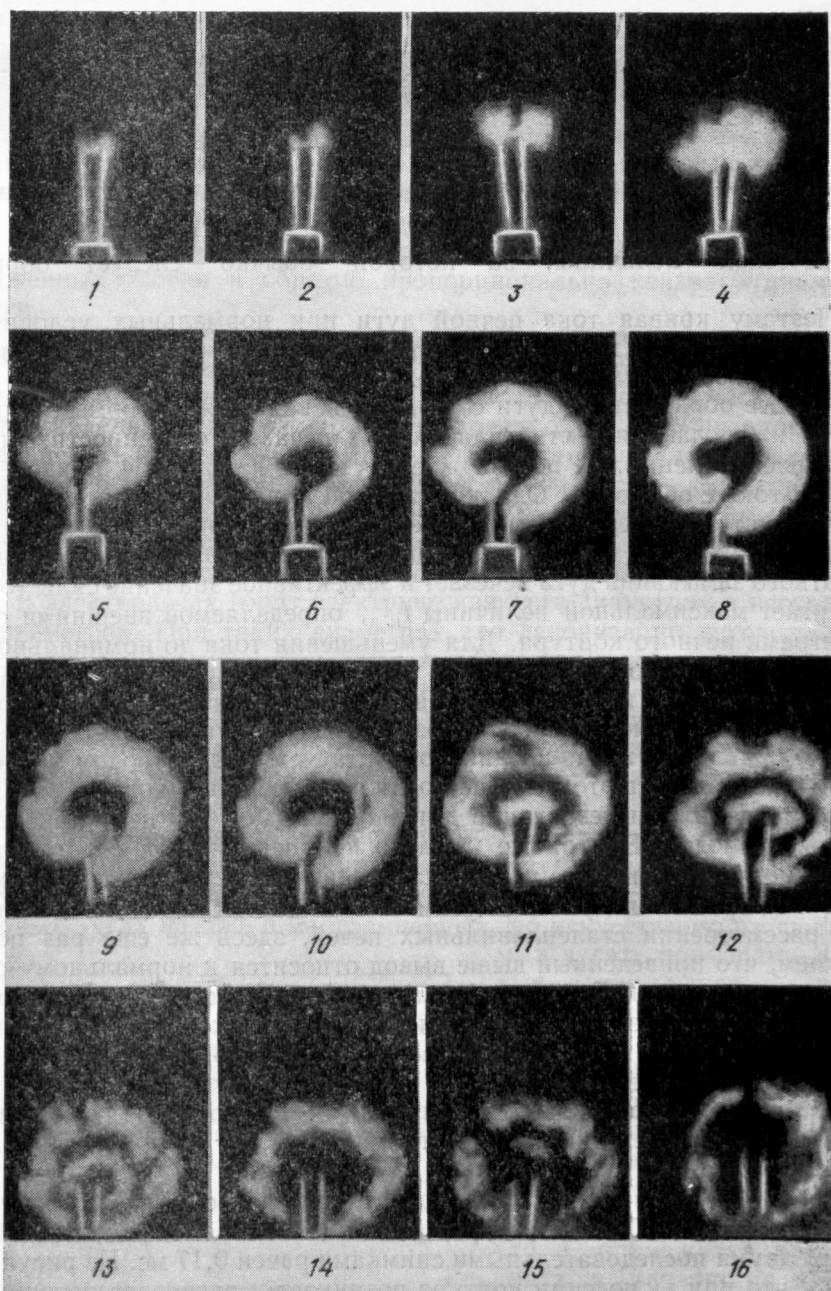


Рис. 55. Последовательные этапы (1—16) перегорания плавкой вставки при коротком замыкании; $I = 10\,000$ А, $U = 500$ В; промежутки между кинокадрами равны $1/6000$ с.

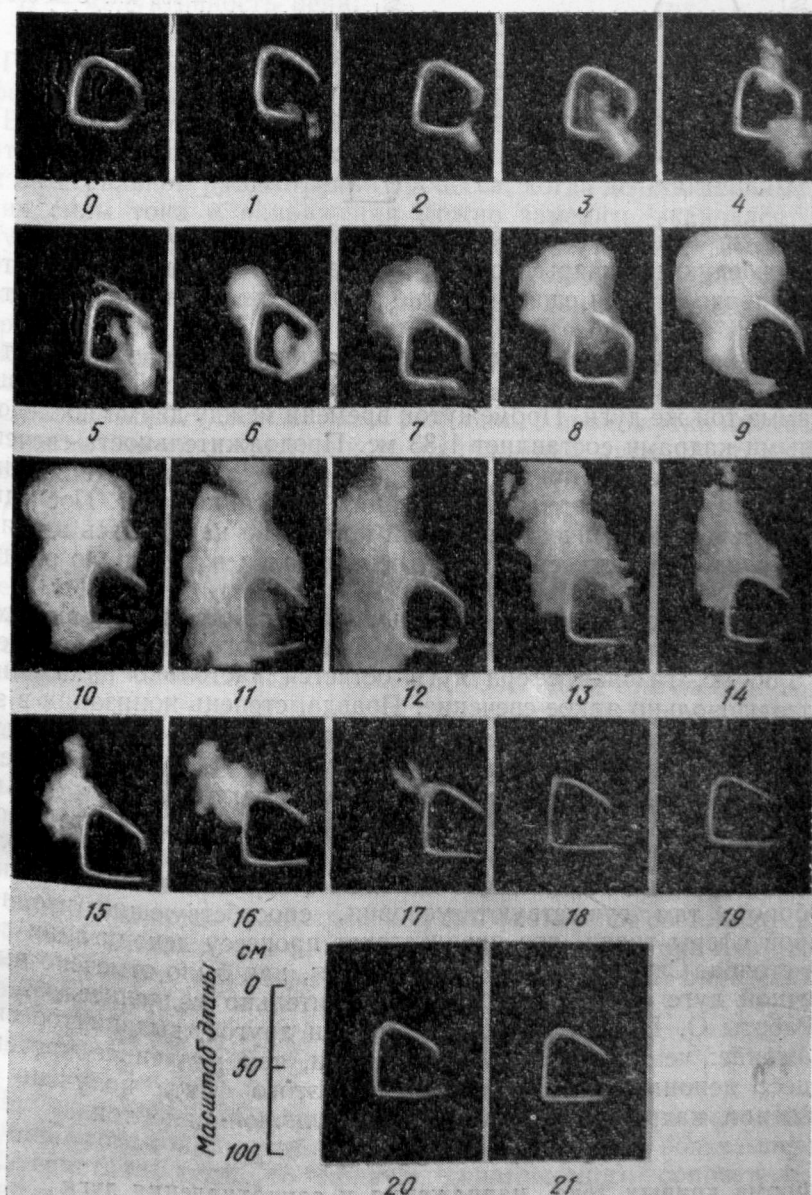
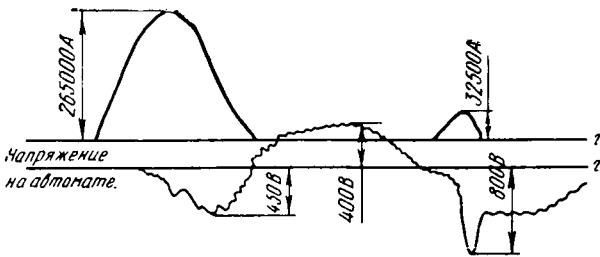


Рис. 56. Последовательные стадии горения дуги при отключении автоматом силы тока 265 кА при 16,6 Гц и $U = 500$ В. Промежутки между съемками равны 1,33 мс: 0—5 — дуга появляется на главных и предварительных контактах; 5—16 — дуга исчезает на главных контактах и появляется на разрывных; 17—21 — погасание дуги

Рис. 57. Осциллограмма отключения тока ($I = 265$ кА; $U = 500$ В)



вают последующие кадры, остается ионизированным и свечение этого объема продолжается еще в течение последующих пяти кадров, т. е. 0,85 мс.

На рис. 56 приведены кадры киносъемки гашения дуги при токе 265 кА, напряжении 500 В и частоте 16,6 Гц, а на рис. 57 дана осциллограмма той же дуги. Промежуток времени между двумя последовательными кадрами составляет 1,33 мс. Продолжительность свечения газов после исчезновения дуги здесь равна 6,65 мс. Надо иметь в виду, что О. Б. Брон проводил исследования погасания дуги. Последняя под действием динамических усилий постоянно находилась в движении и, следовательно, ствол дуги перемещался в холодную воздушную среду.

Таким образом, несмотря на весьма благоприятные условия охлаждения, даже по истечении такого длительного периода времени, как 6,65 мс, газовая сфера дуги остается настолько накаливаемой, что дает довольно яркое свечение. Правда, степень ионизации в этот период настолько снижена, что напряжение не в состоянии поддерживать ток в цепи и дуга гаснет, но самый факт длительного свечения газовой сферы показывает, что при дугах, характеризующихся большой силой тока, для деионизации среды и погасания дуги требуются специальные меры охлаждения дугового промежутка. Однако в электропечи, как мы видели, отнюдь нет этих условий охлаждения. Наоборот, там существуют условия, способствующие изоляции газовой сферы тигля, что препятствует процессу деионизации газового столба. Следовательно, деионизация, как было отмечено выше, в печной дуге будет происходить значительно медленнее.

Работы О. Б. Брона подтверждают и другое, выдвинутое выше положение: чем больше сила тока дуги, тем медленнее протекает процесс деионизации. Подтверждение этого факта получено при сравнении кадров киносъемок при различной силе тока.

4. Форма кривых тока, напряжения и сопротивления дуги переменного тока

Для линейных цепей синусоидального переменного тока воспользуемся понятием о полном сопротивлении

$$\bar{Z} = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right), \quad (\text{III-8})$$

где r — активное сопротивление цепи;

L — индуктивность цепи;

C — емкость цепи.

Полное сопротивление $\bar{Z}$ характеризует отношение комплексных эффективных значений силы тока и напряжения.

В отношении электрической дуги, являющейся нелинейным элементом цепи, понятие о полном сопротивлении может быть применено при интегральном рассмотрении процесса, когда действительные значения силы тока и напряжения можно заменить эквивалентными синусоидами. При подробном же рассмотрении процесса необходимо пользоваться понятием о мгновенных значениях силы тока и напряжения. В связи с этим необходимо ввести понятие и о мгновенном сопротивлении.

Будем различать три вида такого сопротивления — статическое, динамическое и дифференциальное.

Статическим сопротивлением разрядного промежутка называется отношение значения постоянного напряжения дуги к соответствующему значению силы тока:

$$r = u/i. \quad (\text{III-9})$$

Если при данных условиях в дуговом промежутке установился определенный постоянный ток, то это значит что электризация газового промежутка держится на определенном неизменном уровне и, следовательно, сопротивление разрядного промежутка будет постоянным, независимым от времени. Очевидно, статическое сопротивление разрядного промежутка измеряется при постоянных значениях напряжения и силы тока дуги. При переходе от одного значения напряжения или силы тока к другому значению статическое сопротивление меняется и в целом характеристика дуги нелинейна.

Динамическим сопротивлением называется отношение напряжения к силе тока при достаточно быстрых изменениях напряжения или силы тока, когда вследствие инерции физическое состояние среды не успевает изменяться в соответствии с изменением тока или напряжения. Очевидно, динамическое сопротивление должно определяться уравнением

$$r_d = \lim_{\Delta i \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta i} = \frac{du}{di}. \quad (\text{III-10})$$

При изменении мгновенных значений силы тока и напряжения величина этого сопротивления меняется. Если задана вольтамперная характеристика дуги, то кривую динамического сопротивления можно построить по точкам, как это сделано дальше для ряда кривых. Вообще с изменением силы тока и напряжения дуги меняется степень электризации газа и в связи с этим изменяется и динамическое сопротивление дуги. Но для разрядного промежутка можно создать такие условия, чтобы с изменением силы тока и напряжения степень электризации разрядного газа оставалась неизменной. В этом случае величина r также останется постоянной и дуговой промежуток

из нелинейного элемента превратится в линейный. Такой дуговой разряд иллюстрируется приведенной ниже осциллограммой рис. 61. В дальнейшем будут приведены и другие примеры такого режима работы электропечи.

Дифференциальным сопротивлением называется сопротивление, определяемое как производная напряжения по силе тока из статической характеристики. При весьма медленных изменениях силы тока и напряжения дифференциальное и динамическое сопротивления совпадают.

Статическое сопротивление пропорционально тангенсу угла наклона прямой, проведенной из начала координат в данную точку, а дифференциальное и динамическое сопротивления пропорциональны тангенсу угла наклона касательной, проведенной к вольтамперной характеристике в исследуемой точке.

На рис. 58 приведена схема определения статического и дифференциального сопротивления по вольтамперной характеристике.

Рассмотрим теперь вольтамперные характеристики и сопротивления нескольких типичных дуг. В основном будем рассматривать динамические сопротивления, так как они лучше всего характеризуют разрядный промежуток для каждого момента времени.

На рис. 59 приведены осциллограммы силы тока и напряжения дуги, горящей в воздухе. Это типичная осциллограмма маломощной дуги.

Кривая силы тока искажена и имеет небольшие паузы. Максимум тока составляет всего 2,25 А. Кривая напряжения также искажена, на ней резко выражены пики возникновения и исчезновения разряда. На том же рисунке приведена кривая динамического сопротивления. Как видно, сопротивление в период паузы тока бесконечно велико. С возникновением дуги оно резко падает, достигает минимума в 240 Ом, а затем опять растет до бесконечности в период новой паузы.

У вольтамперной характеристики такой дуги восходящая ветвь почти целиком совпадает с осью ординат и к моменту зажигания силы тока почти равна нулю. Падающая ветвь состоит из двух частей. В период нарастания тока она похожа на статическую падающую характеристику. В период спада тока характеристика идет плавнее и пик гашения выражен слабо.

На рис. 60 приведены осциллограммы дуги другого характера. Здесь паузы тока нет. Кривая тока почти синусоидальна с небольшими искажениями около точки перехода через нуль. Максимум силы тока достигает 90 А. Напряжение генератора, благодаря индуктивности внешней цепи,

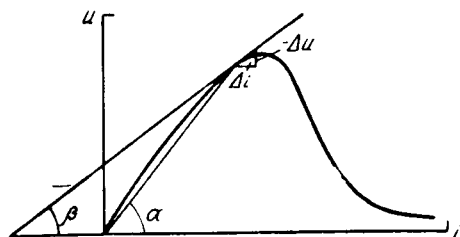


Рис. 58. Определение дифференциального сопротивления по вольтамперной характеристике

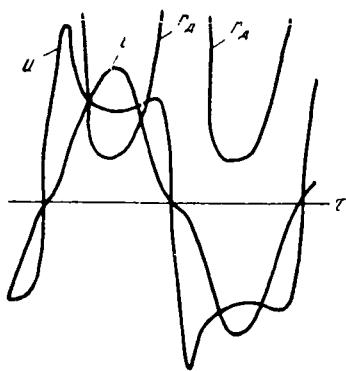


Рис. 59. Осциллограмма и характеристика сопротивления маломощной дуги

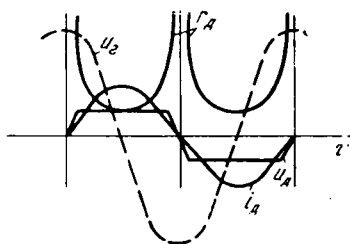


Рис. 60. Осциллограмма дуги без пауз тока:

$i_д$ — сила тока дуги; $u_д$ — напряжение дуги; $u_Г$ — напряжение генератора; $r_д$ — динамическое сопротивление дуги; $I = 90$ А; $U = 210$ В

сдвинуто относительно тока почти на 90° и максимум составляет 900 В. Напряжение на дуге в течение $1/12$ доли полупериода возрастает от нуля до 210 В и сохраняет это значение почти постоянным за весь полупериод; в конце оно снова падает до нуля. Динамическое сопротивление дуги и тут не остается постоянным: в начале и конце полупериода оно велико, а в середине его достигает минимума. Однако сравнение рис. 59 и 60 показывает, что кривая сопротивления в пределах полупериода во втором случае меняется не так резко, как в первом. Это означает, что в период гашения дуги и во втором случае происходит деионизация дугового промежутка, но степень деионизации в этом случае значительно меньше, чем в первом.

Это отразилось и на вольтамперной характеристике. Восходящая часть кривой имеет не такой резкий подъем, как в предыдущем случае. Пик зажигания также выражен не так резко. Нисходящая ветвь опять состоит из двух частей, но переход тока через максимум тут выражен слабее. Еще слабее проявляется пик исчезновения.

Наконец, на рис. 61 приведены осциллограммы силы тока и напряжения, снятые нами на мощной ферросплавной печи при выплавке 75%-ного ферросилиция.

Напряжение снято между контактными плитами и нулевой точкой печи и максимальное его значение составляет 108 В, максимум тока равен 45 кА.

Из рисунка видно, что кривые силы тока и напряжения дуги почти синусоидальны и искажающий эффект дугового разряда тут

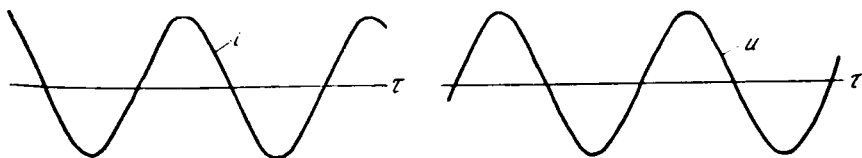


Рис. 61. Осциллограмма силы тока i и напряжения u при выплавке 75%-ного ферросилиция $I = 45$ кА

уже не наблюдается. Это означает, что в период исчезновения дуги температура дугового промежутка остается весьма высокой; благодаря этому степень деионизации в положительном столбе настолько мала, что ток при переходе через нуль не имеет паузы. После прохождения через нуль ток плавно возрастает по синусоидальной кривой, как в обычных линейных цепях. Кривая напряжения на дуге растет так же плавно по синусоиде, как и кривая силы тока, так как не требуется добавочного напряжения для пробоя. Среда за все время существования дуги ионизирована настолько сильно, что в ней имеется достаточное число свободных заряженных частиц для обеспечения силы тока, соответствующей данному напряжению. Поэтому динамическое сопротивление дуги в данном случае остается величиной постоянной и неизменяемой в течение всего полупериода тока. Очевидно, в данном случае динамическое сопротивление совпадает со статическим.

Вышеизложенное приводит нас к выводу, что с точки зрения сопротивления дуги и характера ее горения нельзя все виды дуг трактовать однозначно.

Если ток дуги мал и она подвергается сильному охлаждению, то в период спада тока степень деионизации столба настолько велика, что разряд прекращается. Для повторного возникновения дуги требуются добавочные факторы, что связано с искажением кривых тока и напряжения.

С повышением тока и ослаблением охлаждения дуги степень деионизации столба уменьшается, паузы тоже сокращаются, а длительность существования разряда увеличивается. Благодаря этому уменьшается и искажение кривых силы тока и напряжения.

В предельном случае дуга может гореть без перерыва. Но и здесь деионизация дугового промежутка во время прохождения тока через нуль настолько велика, что сопротивление дуги растет, а в середине полупериода тока падает. Вследствие этого кривая напряжения дуги претерпевает искажение, но оно меньше, чем в предыдущем случае. Наконец, сила тока дуги может быть настолько велика, а степень ее охлаждения настолько мала, что дуговой промежуток все время сильно ионизирован и сопротивление дуги остается в течение всего полупериода постоянным. Кривые силы тока и напряжения в этом случае получают синусоидальную форму¹, и дуга ведет себя как металлический проводник.

На рис. 62 дана еще одна серия осциллограмм и кривых, показывающих изменение сопротивления и динамическую характеристику дуг. Эта серия охватывает очень большой диапазон изменения напряжения и силы тока дуги.

На рис. 62, *а* приведена характеристика маломощной дуги, горящей в воздухе. Пик возникновения $u_{\text{воз}}$ составляет 290 В, а пик исчезновения $u_{\text{ис}} = 90$ В, амплитудное значение тока 2,5 А. Вольт-амперная характеристика за точкой возникновения имеет резко

¹ Здесь предполагается, что приложенное к дуговому контуру напряжение синусоидально и в контуре отсутствует насыщенное железо. (Прим. авт.)

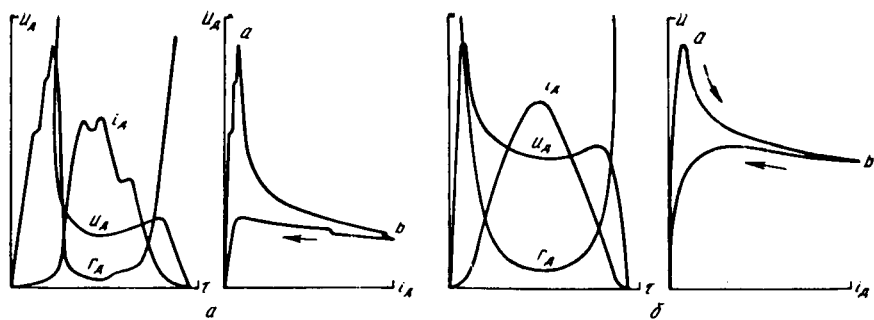


Рис. 62. Характеристика мало-
мощной дуги в воздухе:

$a - u_{\text{вод}} = 290 \text{ В}, u_{\text{ис}} = 90 \text{ В},$
 $I_m = 2,5 \text{ А}; б - u_{\text{вос}} = 150 \text{ В},$
 $u_{\text{ис}} = 90 \text{ В}, I_m = 5,5 \text{ А}; в -$
 $u_{\text{вод}} = 175 \text{ В}, I_m = 4 \text{ А}$

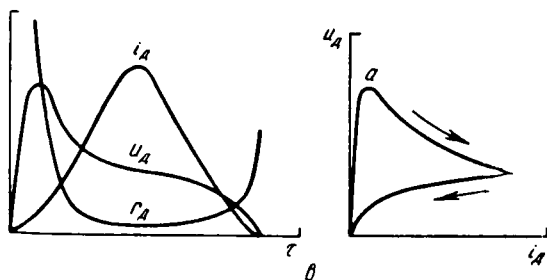


Рис. 63. Характеристика ртутной
дуги высокого давления

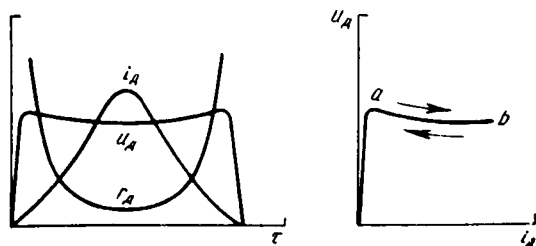
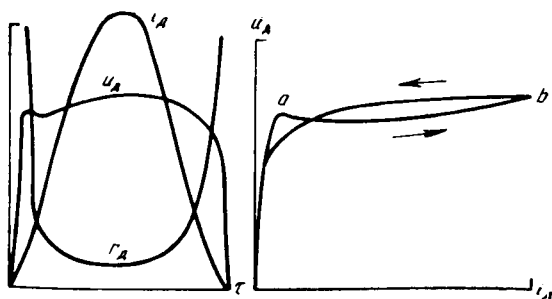


Рис. 64. Характеристика мощ-
ной сварочной дуги под флю-
сом ($U_m = 36 \text{ В}, I_m = 800 \text{ А}$)



падающую ветвь ab ; в областях, близких к переходу напряжения, через нуль, сопротивление дуги становится бесконечно большим и ток протекает со значительными паузами.

На рис. 62, *б* показана другая маломощная дуга, горящая в воздухе. Пик возникновения составляет 150 В, а исчезновения 90 В при амплитудном значении тока 5,5 А. Дуга горела в более благоприятных тепловых условиях, поэтому и падающая ветвь ab динамической характеристики выражена менее резко. Паузы тока существуют и здесь, но выражены они слабее. Сопротивление дуги и здесь в периоды паузы тока бесконечно велико, но при максимуме тока оно имеет небольшую величину. На рис. 62, *в* изображена дуга, аналогичная предыдущей с той только разницей, что падающая ветвь ab еще слабее, но гистерезисная петля шире. При амплитудном значении тока $I_m = 4$ А пик возникновения составляет 175 В; пика же исчезновения кривая не имеет, с горизонтальной части она плавно спускается к нулю.

На рис. 63 показана дуга, горящая в парах ртути при высоком давлении. Кривая напряжения дуги симметрична; напряжения возникновения и исчезновения дуги равны, и кривая напряжения почти трапецеидальной формы. Динамическая характеристика уже не имеет падающей ветви — она превратилась почти в прямую, параллельную оси абсцисс (ab). В разряде отсутствует явление гистерезиса и ветви спада тока совпадают с ветвями его подъема.

На рис. 64 представлена характеристика более мощной низковольтной сварочной дуги, горящей под флюсом. Амплитуда значений тока составляет 800 А, а напряжения 36 В. Ток несколько искажен в точках перехода через нуль и течет с очень маленькими паузами. У кривой напряжения не только нет падающего участка, но, наоборот, во время горения дуги она обращена выпуклостью вверх. Поэтому и на динамической характеристике участок ab , соответствующий подъему тока, уже не является падающим. Характеристика в этом участке почти прямолинейная и наклонена к оси ординат. Сопротивление дуги в период горения мало изменяется, но все же в моменты времени, близкие прохождению тока через нуль, оно сильно возрастает.

На рис. 65 представлены характеристики мощной дуги в воздухе [13]. Амплитуда тока дуги составляет 1400 А, а напряжения 720 В. Динамическая характеристика и здесь не имеет падающей ветви, и участок ab почти параллелен оси абсцисс.

Наконец, на рис. 66 показаны характеристики дуги мощной ферросплавной печи; максимум силы тока в печи составляет 40 кА. Как видно, на динамической характеристике нет и следов падающей ветви; она плавно поднимается вверх и также плавно опускается к нулевому значению, создавая незначительную петлю гистерезиса. Кривая сопротивления почти в течение всего полупериода параллельна оси абсцисс и, следовательно, сопротивление остается постоянным.

На форму кривых силы тока и напряжения влияет также частота тока. Все приведенные выше примеры дуг относились к дугам нор-

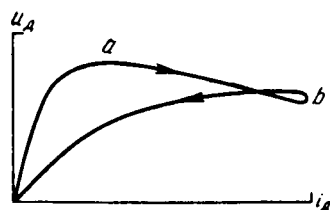
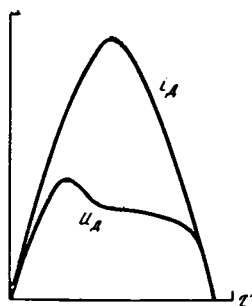


Рис. 65. Характеристика мощной дуги в воздухе ($u_{\text{воз}} = 720 \text{ В}$, $I_m = 1400 \text{ А}$)

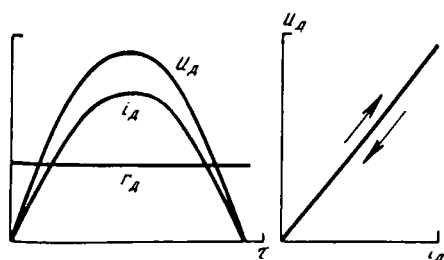


Рис. 66. Характеристика мощной печной дуги ($I_m = 40 \text{ кА}$)

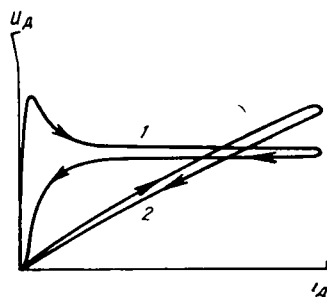


Рис. 67. Характеристики двух дуг: 1 — с пиком возникновения (малая частота); 2 — линейная ($f \gg 1000 \text{ Гц}$)

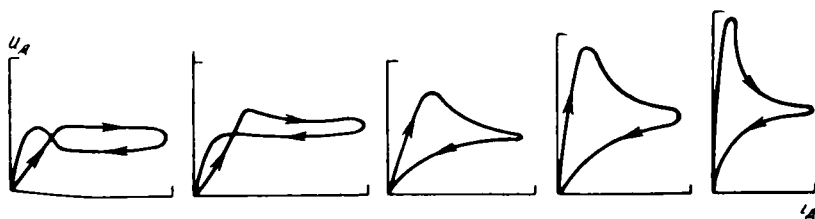


Рис. 68. Изменение характеристики дуги по мере ее удлинения

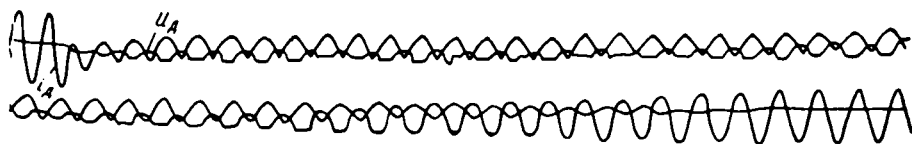


Рис. 69. Осциллограммы тока и напряжения дуги при отключении короткого замыкания

мальной промышленной частоты (50—60 Гц). С повышением частоты влияние тепловой инерции разрядного промежутка становится еще больше. С уменьшением длительности времени спада силы тока колебания температуры плазмы уменьшаются и ее температура приближается к постоянной величине. При этом уменьшается и колебание степени электризации разрядного промежутка. Поэтому при прочих равных условиях пики возникновения и исчезновения дуги уменьшаются. Наконец, при частотах выше 500—1000 Гц пики исчезают; кривые силы тока и напряжения приобретают синусоидальную форму, а вольтамперная характеристика превращается в прямую, т. е. дуга становится линейным элементом. На рис. 67 приведены две характеристики [30], показывающие переход от дуги с пиком возникновения к дуге с линейной характеристикой.

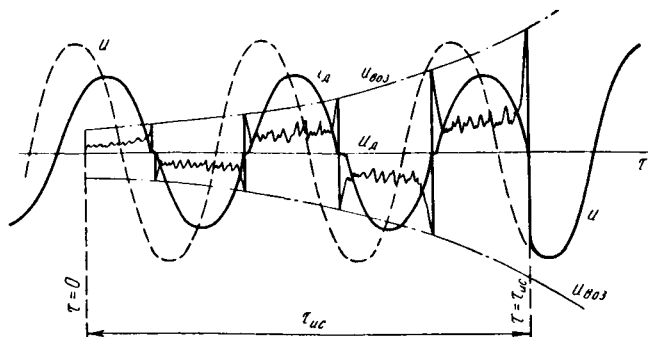
Значительное влияние на форму кривых силы тока и напряжения дуги переменного тока оказывает длина дуги.

При рассмотрении дуги постоянного тока мы видели, что напряжение дуги зависит почти линейно от ее длины. Там же были отмечены определенные отступления от этого закона, причем для дуги переменного тока эти отступления еще больше. При прочих условиях с увеличением длины дуги устойчивость разрядного газа уменьшается, удельная поверхностная теплоотдача возрастает и пики возникновения и исчезновения дуги растут. На рис. 68 приведен ряд осциллограмм, снятых при отключении мощной дуги. Они показывают, как меняется форма вольтамперной характеристики с изменением длины дуги. В начале процесса отключения, когда длина дуги еще невелика, на характеристике почти нет пиков возникновения и исчезновения. С увеличением длины эти пики появляются, и чем длиннее дуга, тем они резче.

Для иллюстрации разнообразия форм тока и напряжения дуги на рис. 69 приведена осциллограмма выключения мощности короткого замыкания в 100 МВА при напряжении 8 кВ, заимствованная из работы И. Бирманса. Как видно из осциллограммы, процесс гашения дуги в воздухе занял около 50 периодов, т. е. длился ~ 1 с. В начальный момент расхождения контактов выключателя напряжение дуги резко искажено, и его форма близка к трапеции или прямоугольнику. В это время форма кривой, характеризующей силу тока, близка к синусоиде, однако эта форма определяется не условиями в дуге, а условиями во внешней части контура, так как сопротивление последней больше сопротивления дугового промежутка. По мере увеличения расстояния между контактами растет и напряжение дуги и выпуклость на его кривой обращена вверх. Амплитуды тока уменьшаются, а искажение кривой силы тока увеличивается вследствие того, что величина сопротивления дуги в общем сопротивлении контура растет. Процесс заканчивается обрывом тока и исчезновением дуги. При этом на контактах воздушного выключателя устанавливается синусоидальное напряжение источника.

Эта кривая еще раз показывает, что форма кривых силы тока и напряжения зависит от тепловых условий горения дуги. На рассма-

Рис. 70. Осциллограмма процесса отключения при индуктивной нагрузке
 u_d — напряжение дуги;
 $u_{\text{воз}}$ — напряжение возникновения дуги; $\tau_{\text{ис}}$ — время исчезновения тока



триваемой осциллограмме видна целая гамма форм напряжения дуги, начиная от формы с пиками и кончая чистой синусоидной.

На рис. 70 приведена осциллограмма другого типа, показывающая процесс отключения цепи при индуктивной нагрузке. Длительность гашения дуги составляет всего два-три периода. На осциллограмме явно выражены пики возникновения и исчезновения. Но и внутри полупериода кривая напряжения дуги не остается постоянной и претерпевает колебания: с увеличением длины дуги пики возникновения $u_{\text{воз}}$ и исчезновения $u_{\text{ис}}$ растут и дуга гаснет при наступлении условия $u_{\text{воз}} > U_m$; на кривых силы тока явно видны паузы. Но между паузами ток изменяется плавно, так как величина и характер его в этот промежуток времени опять-таки, в основном, определяются не сопротивлением дуги, а сопротивлением внешней части дугового контура.

Проследивая по рис. 67—73 характеристики дуги, можно заметить их постепенное изменение в зависимости от силы тока и интенсивности охлаждения. При маломощных сильно охлаждаемых дугах кривая напряжения обращена выпуклостью вниз к оси абсцисс, затем она постепенно выпрямляется, становится параллельной оси абсцисс, потом выгибается выпуклостью вверх и в пределе приближается к синусоиде.

Наиболее резко искажена форма кривой напряжения с несколькими пиками у подавляемых дуг в коммутационной аппаратуре. Если отвлечься от них, то с геометрической точки зрения все дуги переменного тока по форме кривой напряжения можно свести к следующим типам (рис. 71): кривые с двумя пиками и глубоким провалом (1); кривые с двумя пиками и незначительным провалом (2); кри-

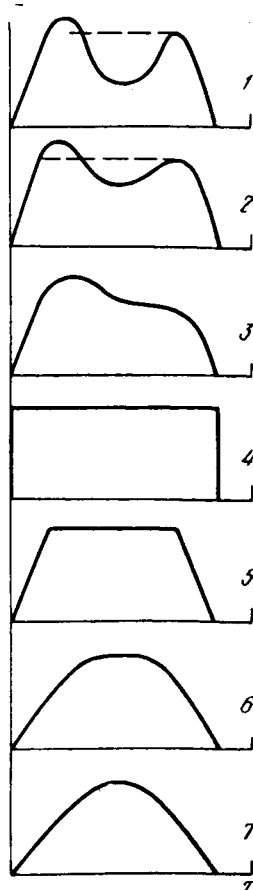


Рис. 71. Типы кривых напряжения дуги

вые с одним пиком (3); прямоугольные кривые (4); трапецеидальные кривые (5); трапецеидальные кривые с синусоидальной вершиной (6); синусоидальные кривые (7).

В дальнейшем воспользуемся этим делением при классификации дуг и математическом анализе кривых напряжения дуги.

Дуга руднотермической печи относится к разряду наиболее мощных устойчивых электрических дуг, она горит в замкнутом объеме тигля, температура стенок которого довольно высока, вследствие чего охлаждение дугового промежутка крайне затруднено.

Все это приводит к выводу, что в руднотермической печи в нормальных условиях дуга горит без перерывов, кривые силы тока и напряжения дуги при нормальной работе печи имеют почти синусоидальную форму и, следовательно, в течение всего полупериода горения дуги сопротивление последней остается постоянным. Искажения формы кривых силы тока и напряжения дуги появляются только при нарушениях теплового режима дуги.

5. Характеристики эффективных величин дуги переменного тока

Приведенные выше вольтамперные характеристики дуги переменного тока построены для мгновенных значений силы тока и напряжения. Мы видели, насколько разнообразны формы этих характеристик. Естественно, возникает вопрос, можно ли построить такие же характеристики для эффективных значений этих величин. Это тем более важно, что измерительные приборы, установленные на печах, измеряют эффективные, а не мгновенные величины. Но оказывается, что наши возможности в этом направлении ограничены.

Действительно, в общем случае кривые силы тока и напряжения дуги переменного тока искажены и содержат высшие гармоники. В этом случае эффективные значения напряжения U_d и силы тока I_d дуги определяются уравнениями:

$$U_d = \sqrt{\sum_1^{\infty} U_n^2}; \quad I_d = \sqrt{\sum_1^{\infty} I_n^2} \quad (\text{III-11})$$

где U_n и I_n — соответственные эффективные значения n -й гармоники напряжения и силы тока дуги.

Из этих формул видно, что одни и те же значения U_d и I_d могут быть получены при самых разнообразных значениях составляющих гармоник. Поэтому эффективные значения напряжения и силы тока дуги, измеренные обычными вольтметрами и амперметрами, не отражают формы их кривых. Одно и то же эффективное значение могут иметь сила тока дуги с синусоидальной формой кривой и дуги, горящей прерывисто с большими паузами, но устойчиво.

Как известно из электротехники, для анализа периодических процессов с несинусоидальной формой кривых силы тока и напряжения несинусоидальные кривые заменяют эквивалентными синусоидальными кривыми, т. е. такими кривыми, которые характеризуются такими же эффективными значениями, как и заданные несинусо-

идальные. В этом случае обычно вводят коэффициент искажения формы кривой, под которым понимают отношение эффективного значения всей несинусоидальной кривой к эффективному значению основной гармоники. Угол сдвига фазы в этом случае становится фиктивным.

Рассмотрим в свете этих положений построение характеристик дуги.

Если дуга горит при благоприятных условиях, то, как было показано выше, форма кривых силы тока и напряжения дуги приближается к синусоиде. В этом случае в пределах, пока сопротивление дуги остается независимым от силы тока и напряжения, цепь, содержащая дугу, будет линейной. Вольтамперная характеристика дуги будет прямой линией как для мгновенных, так и для эффективных и максимальных значений, и одну и ту же прямую, проходящую через начало координат, можно рассматривать как вольтамперную характеристику для всех трех характерных значений силы тока и напряжения дуги. Пока сопротивление r_d постоянно, характеристики цепи будут подчиняться одному и тому же закону как для мгновенных, так и для эффективных и максимальных значений.

Но r_d — величина неустойчивая и, как мы видели, может изменяться в очень широких пределах как внутри периода, так и от периода к периоду. В моменты прохождения тока через нуль она обычно возрастает и даже может достигать бесконечно большой величины. В зависимости от диапазона изменения сопротивления r_d кривые силы тока и напряжения дуги получают искажения большей или меньшей степени. Вольтамперные характеристики дуги для мгновенных значений уже отступают от прямой и принимают то многообразие форм, которое было показано выше.

Можно ли в этом случае строить вольтамперные характеристики для эффективных и максимальных значений?

Если дуга горит непрерывно и устойчиво или прерывисто и устойчиво, но так, что в каждый следующий период повторяется форма кривых предыдущего периода, то, очевидно, закон изменения сопротивления будет оставаться постоянным. Можно, конечно, для этих форм кривых силы тока и напряжения подсчитать эффективные значения и нанести на диаграмму одну точку вольтамперной характеристики. Правда, такая точка отличалась бы некоторой неопределенностью, так как такую же точку могли бы дать и другие кривые силы тока и напряжения, но с теми же эффективными значениями. Нанесение следующих точек характеристики было бы затруднительно, так как при изменении эффективных значений силы тока и напряжения изменились бы их форма и сопротивление дуги. Таким образом, неопределенность второй точки больше первой.

Особенно сильное искажение форм кривых наступает при переходе разряда из непрерывного в прерывистый.

Большей частью амплитуды тока и напряжения уменьшаются скачкообразно, иногда дуга гаснет на несколько периодов и возникает снова. Одним словом, не происходит плавного приближения вольтамперной характеристики к нулю.

Несмотря на это, по показаниям приборов, указывающих эффективные значения, можно построить кривые зависимости эффективного значения напряжения от такого же значения силы тока. Но такие кривые не имеют отношения к вольтамперным характеристикам для мгновенных значений напряжения и силы тока. Отношение последних дает динамическое сопротивление дуги, в то время как отношение эффективных значений напряжения и силы тока дает среднее или эффективное сопротивление дуги.

Следует иметь в виду, что в электротехнике известна группа так называемых условно нелинейных элементов (приемников). Они характеризуются тем, что их нелинейность зависит от времени и имеет значительную инерцию.

Если в безынерционных элементах ток устанавливается практически мгновенно, в условно нелинейных элементах на установление тока требуется значительное время, измеряемое иногда секундами. Характерными примерами условно нелинейных элементов являются термосопротивления. Если, например, лампу накаливания включить в цепь переменного тока частотой 50 Гц, то на изменение сопротивления лампы от начального значения до установившегося требуется несколько секунд. Следовательно, в течение полупериода (0,01 с) сопротивление изменится настолько незначительно, что этим изменением можно пренебречь и в течение периода считать сопротивление элемента постоянным. В этом случае при синусоидальной форме напряжения и кривая силы тока будет также синусоидальной формы. Но по мере нагрева элемента сопротивление изменяется и вольтамперная характеристика эффективных значений силы тока и напряжения не будет подчиняться линейному закону. Таким образом, условно нелинейные элементы по отношению к мгновенным значениям переменного тока будут вести себя как линейные элементы, а по отношению к максимальным и эффективным значениям — как нелиней-

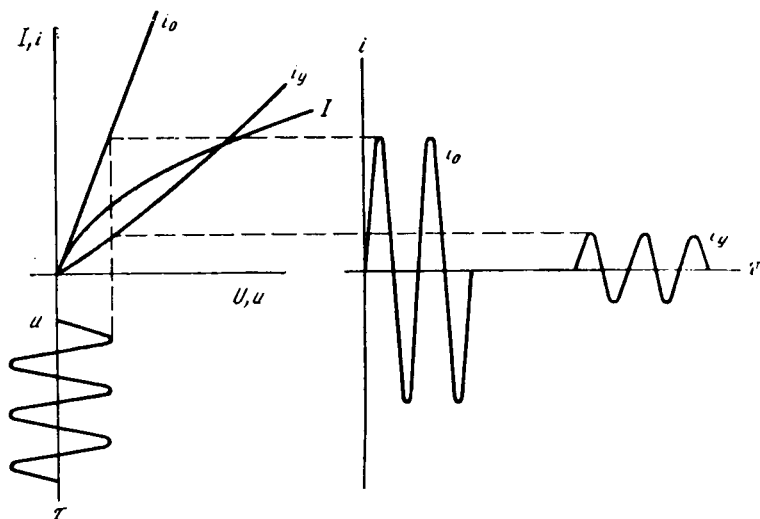


Рис. 72. Графики условно нелинейного элемента

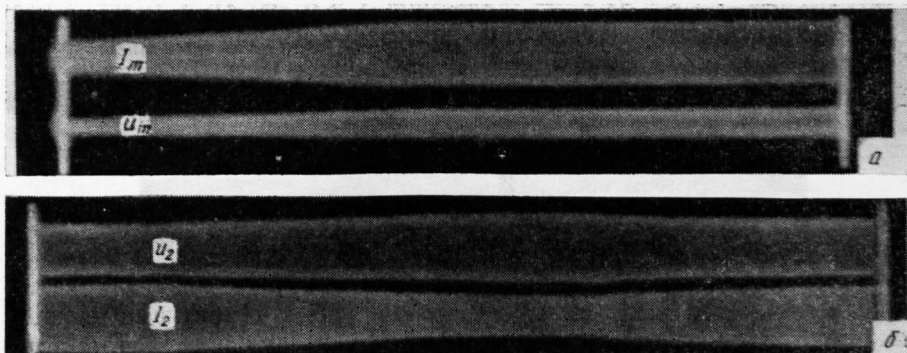


Рис. 73. Осциллограммы регулирования нагрузки карбидной печи

ные. На рис. 72 в качестве примера приведены характеристики лампы накаливания с вольфрамовой нитью. Вольтамперные характеристики для постоянного тока и эффективных значений переменного тока одинаковы, и выпуклость их обращена вверх, так как нить характеризуется положительным температурным коэффициентом. Огибающая амплитудных (или эффективных) значений силы тока при заданном синусоидальном напряжении будет совпадать с этой характеристикой.

Вольтамперные же характеристики мгновенных значений для разных уровней напряжения будут представлять семейство прямых, проходящих через начало координат. При холодном состоянии лампы это будет касательная в начале координат. Для остальных температур прямые мгновенных характеристик будут пересекать кривую статической характеристики. На рис. 79 построены синусоиды для холодной лампы и некоторого среднего нагрева.

Такие характеристики получаем при бездуговом режиме печи. Так как тепловая инерция расплава и шлака очень велика, то при отсутствии дуги удельное сопротивление проводящей среды будет долгое время оставаться постоянным и, следовательно, при синусоидально приложенном напряжении сила тока будет синусоидальной.

С возникновением дугового или смешанного режима вольтамперная характеристика для мгновенных значений не будет прямой, так как динамическое сопротивление дуги становится переменной величиной внутри периода.

При дуговом режиме на определенном участке огибающая амплитудных значений тока может совпадать со статической характеристикой условно нелинейного типа. Но с приближением к критическому значению напряжения дуги обязательно возникает расхождение между этими характеристиками, так как в области, близкой к нулевому значению тока, всякая линейность в характеристике дуги исчезает. Поэтому при наличии дуги по статической вольтамперной характеристике нельзя определить напряжение возникновения дуги.

Проиллюстрируем сказанное несколькими примерами. На рис. 73 приведены осциллограммы снижения (а) и повышения (б) силы тока

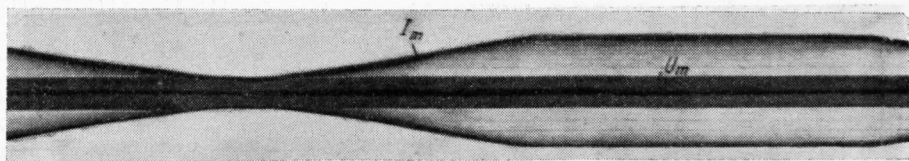


Рис. 74. Осциллограмма регулирования нагрузки печи при выплавке среднеуглеродистого ферромарганца (спокойный режим)

на карбидной печи. Подробнее опыты снятия этих характеристик описаны ниже. На осциллограммах записаны огибающие кривых максимумов силы тока и напряжения. Для изменения силы тока смещали электроды, т. е. изменяли длину дуги. Как видим, все время дуга горела устойчиво и зависимость между амплитудным значением тока и длиной дуги получилась почти линейной. В соответствии с нагрузочными характеристиками напряжение на дуге несколько возросло (примерно на 10%). Эти осциллограммы показывают, что между максимальным (или эффективным) значением силы тока и длиной дуги существует почти линейная зависимость.

На рис. 74 приведены кривые силы тока и напряжения дуги на печи, выплавляющей среднеуглеродистый ферромарганец. И тут режим изменили вследствие смещения электрода, т. е. изменением длины дуги. Анализ осциллограмм показывает, что между амплитудой тока и длиной дуги существует зависимость, близкая к линейной. Имея кривые силы тока и напряжения, можно построить и вольтамперную характеристику. Однако это случаи частные и при приближении к режиму холостого хода печи пропорциональность между эффективными значениями тока и напряжения исчезает. Поэтому, пользуясь осциллограммами или показаниями измерительных приборов, нельзя определить эффективное значение напряжения возникновения дуги. Для иллюстрации на рис. 75, а—в приведены участки трех осциллограмм токов всех трех фаз печи при выплавке среднеуглеродистого ферромарганца.

На первой осциллограмме (рис. 75, а) записаны огибающие токов в начале плавки; интервал времени между снятием осциллограмм составляет 10—15 мин, режим работы печи нормальный. На второй (рис. 75, б) записаны те же токи в конце периода расплавления при наличии достаточно высокого слоя шлака в ванне. Наконец, на третьей (рис. 75, в) приведены данные перед сливом сплава. Они показывают, что даже при более или менее спокойных режимах работы печи огибающие тока отдельных фаз меняются в весьма широких пределах и по ним нельзя судить о процессах возникновения и исчезновения дуг.

Еще больший разброс дают сталеплавильные печи (см. рис. 54). Даже при нормальном режиме расплавления толчки напряжения и силы тока по отдельным периодам настолько велики, что трудно установить какую-либо закономерную связь между эффективными значениями силы тока и напряжения.

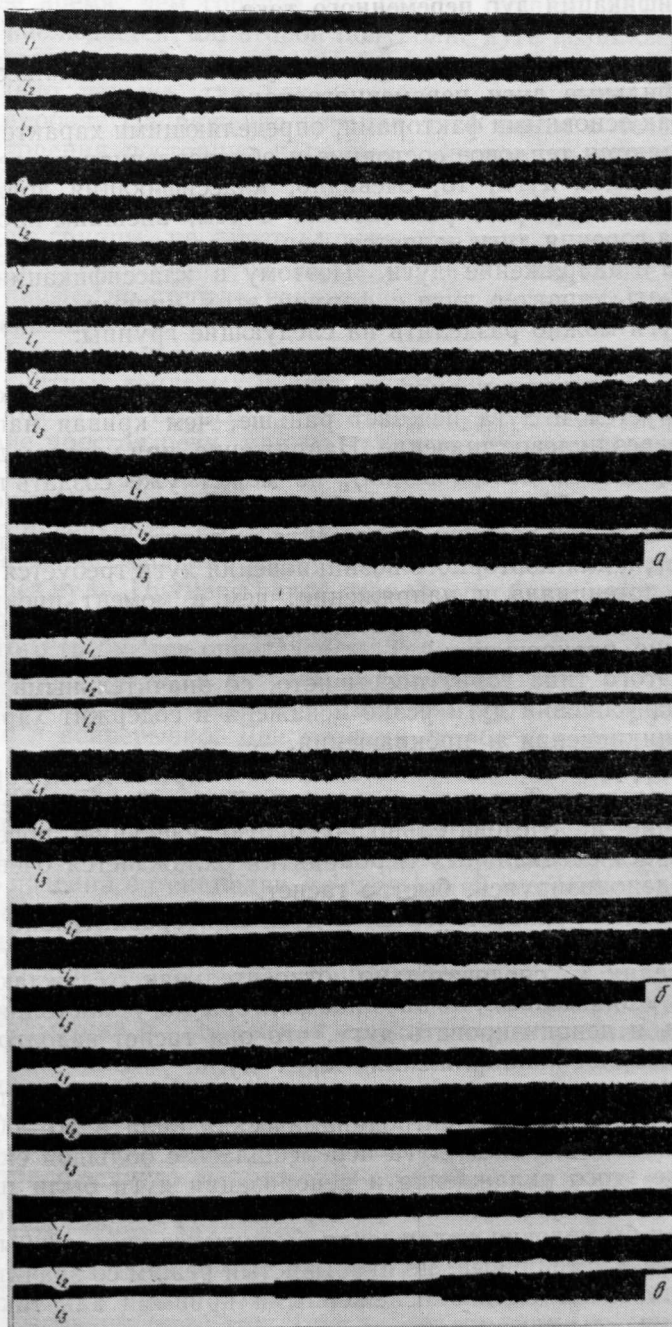


Рис. 75. Осциллограммы токов при выплавке среднеуглеродистого ферромарганца

6. Классификация дуг переменного тока

Развитая выше теория горения дуги позволяет классифицировать стабильные дуги переменного тока.

Так как основными факторами, определяющими характер горения дуги, являются тепловое состояние и обусловленная последним степень ионизации дуги, то, очевидно, классификация должна быть основана на этих факторах. Вместе с тем, внешним проявлением характера горения дуги является форма прямых, характеризующих силу тока и напряжение дуги. Поэтому в классификации дуг следует увязать характер дуги с формой этих кривых.

Все дуги можно разделить на следующие группы:

1. Дуги с интенсивно охлаждаемым столбом. Вследствие интенсивного охлаждения в период спада тока дуговой промежуток быстро деионизируется и дуга исчезает раньше, чем кривая напряжения пройдет через нулевое значение. Напряжение, при котором дуга исчезает (напряжение исчезновения), не может уже создать градиента потенциала, необходимого для поддержания тока.

За промежуток времени, когда дуга не горит, деионизация среды возрастает, и для повторного возникновения дуги требуется больший градиент потенциала и напряжения, чем в момент прекращения. Поэтому напряжение возникновения дуги, как правило, больше, чем напряжение прекращения.

Дуга этого типа горит прерывисто, со значительными паузами. Кривая напряжения дуги резко искажена и содержит характерные пики возникновения и прекращения.

К этой группе дуг относятся все малоамперные дуги, горящие на открытом воздухе. Так как при малом токе столб дуги имеет небольшое сечение и, следовательно, большую удельную поверхность, то дуга и без специальных мероприятий охлаждается очень интенсивно и, деионизируясь, быстро гаснет.

К этой же группе относятся и дуги при сравнительно большой силе тока, но с интенсивным охлаждением. У этих дуг диаметр столба, правда, велик и, следовательно, относительная охлаждающая поверхность у них меньше, но внешние факторы могут настолько сильно охлаждать и деионизировать дугу, что она гаснет задолго до прохождения кривой напряжения через нуль.

Например, в упомянутых выше опытах О. Б. Брона на столб дуги в 265 кА действовала электродинамическая сила в 50—60 кгс/см. Под действием этой силы дуга перемещалась с большой скоростью. Вследствие этого охлаждение и деионизация дуги были настолько интенсивны, что дуга погасла при первом же прохождении тока через нуль. Если бы условия охлаждения были менее интенсивны, то дуга перешла бы в устойчивый, но прерывистый режим со значительными паузами тока и с сильно искаженными кривыми как тока, так и напряжения.

2. Дуги со средней степенью охлаждения. Ввиду более благоприятных тепловых условий деионизация столба в период спада тока происходит менее интенсивно и горение дуги длится более продол-

жительное время, чем горение дуг первой группы, но пауза тока все-таки наблюдается. Во второй полуволне дуга возникает раньше, чем в дугах первой группы. Напряжение возникновения также относительно меньше, так как остаточная деионизация облегчает процесс пробоя. Напряжение горения дуги почти в течение всего периода горения постоянно и пики возникновения и прекращения отсутствуют.

Таким образом, кривая напряжения этих дуг, в отличие от дуг первой группы, не имеет выпуклости вниз и довольно близко подходит к трапецеидальной форме. Кривая тока также искажена и имеет паузы, но степень искажения и длительность пауз значительно меньше.

К этой группе можно отнести мощные печные дуги, горящие при неблагоприятных тепловых условиях. Обычно эти дуги горят в замкнутых объемах — тиглях. Если температура стенок тигля низкая (вследствие простоя печи, или по характеру сплава) или если в результате неблагоприятных технологических условий создаются сильные потоки газов, то, несмотря на значительный диаметр и малую удельную поверхность столба, дуга к концу полупериода деионизируется настолько, что она гаснет раньше прохождения кривой напряжения через нуль. Примеры такой печной дуги будут показаны ниже.

Конечно, дугу такого типа можно создать и при малых токах, но для этого требуются определенные условия герметизации и тепловой изоляции объема, в котором будет гореть дуга.

3. Дуги с малой степенью охлаждения. Дуги этой группы горят стабильно и непрерывно. Деионизация столба в период спада тока происходит настолько медленно, что к концу полупериода тока в столбе остается достаточное число заряженных частиц, могущих поддержать дальнейшее протекание тока в цепи. Если в этот момент приложенное напряжение достаточно для преодоления катодного и анодного падений потенциалов, то следующий полупериод тока начинается без паузы и дуга горит непрерывно.

При высокой степени ионизации создается настолько большое число свободных зарядов, что сопротивление дугового промежутка за весь период остается почти постоянным. Благодаря этому и ход кривых силы тока и напряжения с достаточным приближением подчиняется тем же законам, которым он подчинен в металлических проводниках с постоянным сопротивлением.

4. Мощные печные дуги, горящие при весьма благоприятных тепловых условиях. Дуги этой группы при синусоидальной форме кривой приложенного напряжения кривая силы тока также приобретает синусоидальную форму.

Примером таких дуг служат дуги мощных руднотермических печей с хорошей тепловой изоляцией тигля и устойчивыми стенками последнего. Такая дуга наблюдается при выплавке ферросилиция, особенно высокопроцентного. Дугу такого же типа можно получить, конечно, и при малом токе, но для ее поддержания требуется весьма высокая герметичность и тепловая изоляция объема, в котором поддерживается дуга.

7. Обзор литературы о печной дуге переменного тока

Основы изучения мощной дуги в электрической печи были заложены в СССР школой проф. С. И. Тельного, труды которого, а также работы его учеников сыграли исключительно большую роль в уяснении процессов горения печной дуги.

Первая работа С. И. Тельного о печной дуге появилась в 1928 г. В этой работе, вводя ряд упрощений, С. И. Тельный пришел к выводу, что мгновенное значение напряжения маломощной дуги в условиях дуговой электрической печи остается постоянным за все время ее горения. Основываясь на этом положении, С. И. Тельный вывел математические уравнения и построил теоретические кривые силы тока и напряжения печной дуги.

В 1936 г. С. И. Тельный и И. Т. Жердев опубликовали снятые ими осциллограммы силы тока и напряжения дуги однофазной (рис. 76, а) и трехфазной (рис. 76, б) печей. На рис. 76 приведены два образца этих осциллограмм, которые иллюстрируют теоретические выводы С. И. Тельного о постоянстве напряжения дуги в период ее горения.

Мы видим, что действительно, кривая напряжения в период горения дуги идет почти параллельно оси времени, в моменты же возникновения и прекращения дуги имеет даже некоторые пики. В целом кривые характеризуются слабой выпуклостью, обращенной вниз. По нашей классификации эти осциллограммы относятся ко второй группе дуг (средняя сила тока, средняя степень охлаждения дугового промежутка и, следовательно, средняя степень деионизации). Кривые силы тока на этих осциллограммах имеют паузы; значит, дуга проходит весь нормальный цикл, присущий дугам этой группы, — возникновение, горение и исчезновение.

На рис. 77 показаны осциллограммы силы тока и напряжения мощной однофазной дуги; на кривой напряжения здесь уже почти не видны пики возникновения и исчезновения и кривая обращена выпуклостью вверх. Правда и здесь она искажена, но она значительно ближе к синусоиде, чем на рис. 76.

Кривая тока по форме довольно близко подходит к синусоиде, паузы едва заметны.

С точки зрения развитой нами выше теории, этим осциллограммам следует дать такую интерпретацию.

Осциллограммы, приведенные на рис. 76, а, б, сняты на маломощной лабораторной опытной печи. По данным авторов, мощность трансформатора печи составляла всего 25 кВА, и ток дуги ограничивался внешним сопротивлением до 25 А. Габариты ванны и тигля печи были малы, что способствовало быстрому охлаждению и деионизации дуги. Словом, это малоамперная дуга с быстро деионирующимся разрядным промежутком. Дуга, как и следовало ожидать, горела с паузами.

Весьма ценны замечания С. И. Тельного и И. Т. Жердева по этому поводу. Они пишут, что наблюдаемые иногда пики на кривой напряжения при зажигании и погасании дуги обусловлены низкой температурой печи: с повышением температуры пики сглаживаются и кривая мгновенных значений напряжения дуги превращается в прямую, параллельную оси абсцисс.

Значительный интерес, с точки зрения формы кривой напряжения, представляет осциллограмма, приведенная на рис. 45. Эта кривая, по указанию С. И. Тельного и И. Т. Жердева, относится к печам большой мощности. Очевидно, дуга была многоамперной и горела в печи с большой ванной. Тепловая изоляция тиглей та-

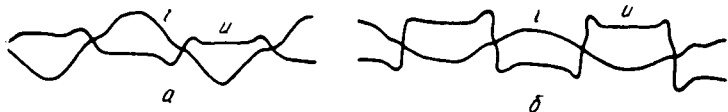


Рис. 76. Осциллограмма силы тока i и напряжения u печи



Рис. 77. Осциллограмма силы тока i и напряжения u однофазной печи

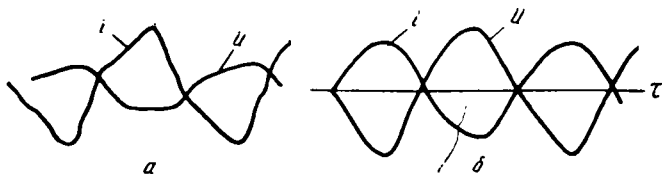


Рис. 78. Осциллограмма силы тока i и напряжения u ферросплавной печи

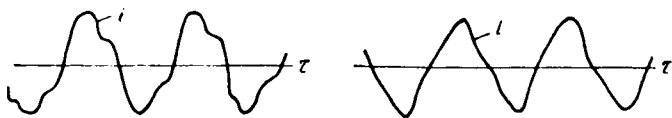


Рис. 79. Осциллограмма силы тока i для шунтированной дуги

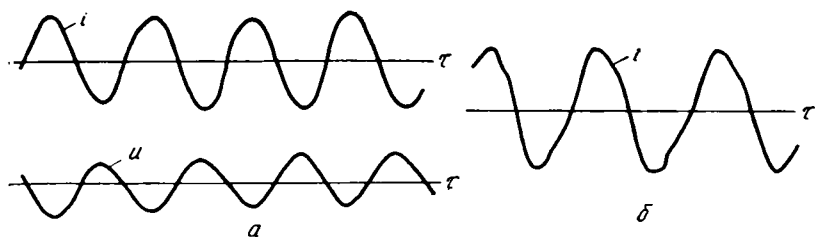


Рис. 80. Осциллограммы однофазной печи мощностью 10 мВА:
а — силы тока i и напряжения u ; б — силы тока i

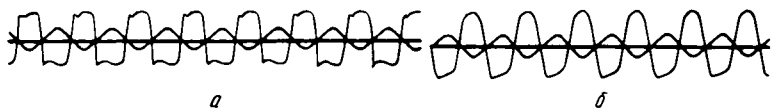


Рис. 81. Осциллограммы напряжения дуги [32]

ких печей обычно весьма высока, и, следовательно, дуга горела в температурных условиях, обеспечивающих достаточно высокую ионизацию разрядного промежутка и в период прохождения тока через нуль. По условиям горения эта дуга приближается к третьей группе предлагаемой классификации. Кривая напряжения характеризуется выпуклостью, обращенной вверх и приближается к синусоиде. В 1937 г. этими же авторами была опубликована другая работа. В ней освещены условия горения дуги с учетом шунтирующего действия шихты. Вопрос о токе шунта будет рассмотрен ниже. Здесь же остановимся на осциллограммах (рис. 78, а, б). Они сняты на той же опытной печи, на которой авторы экспериментировали в предыдущие годы. На обеих осциллограммах снята сумма мгновенных токов, протекающих по дуге и по шихте. Как видим, кривые начала плавки (а) искажены значительно больше, чем кривые конца плавки (б). Заслуживает внимания то обстоятельство, что ни на одной из кривых силы тока не зафиксирована пауза и в обеих осциллограммах они имеют форму, близкую к синусоидальной. Искажение формы кривой напряжения на рис. 78, а авторы объясняют тем, что осциллограф зафиксировал, кроме напряжения дуги, еще и падение напряжения в электродах. Но падение напряжения в отрезке электрода, входящего в измерительный контур, по сравнению с напряжением дуги настолько мало, что оно не могло в значительной степени исказить кривую напряжения. Поэтому надо полагать, что напряжение, зафиксированное на осциллограмме рис. 78, а, является напряжением дуги. На рис. 78, б форма

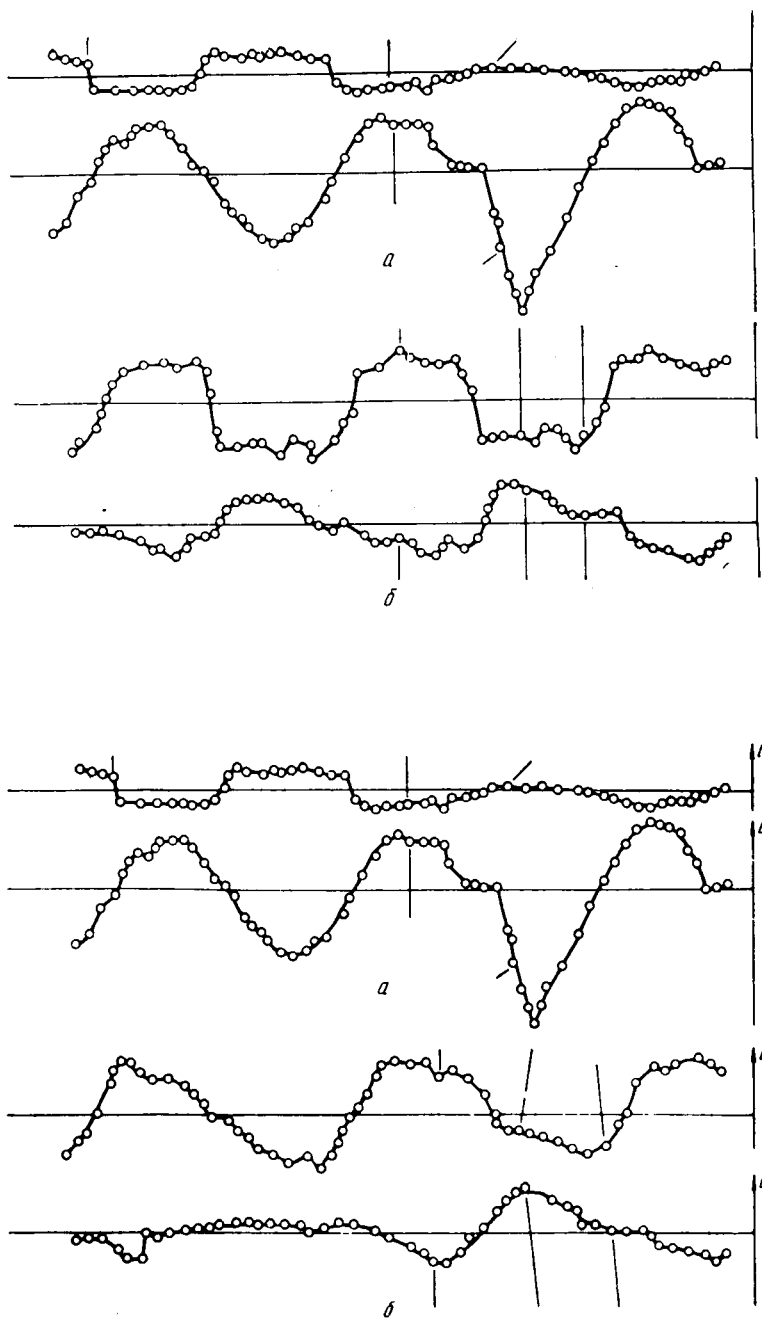


Рис. 82. Осциллограммы силы тока i и нап

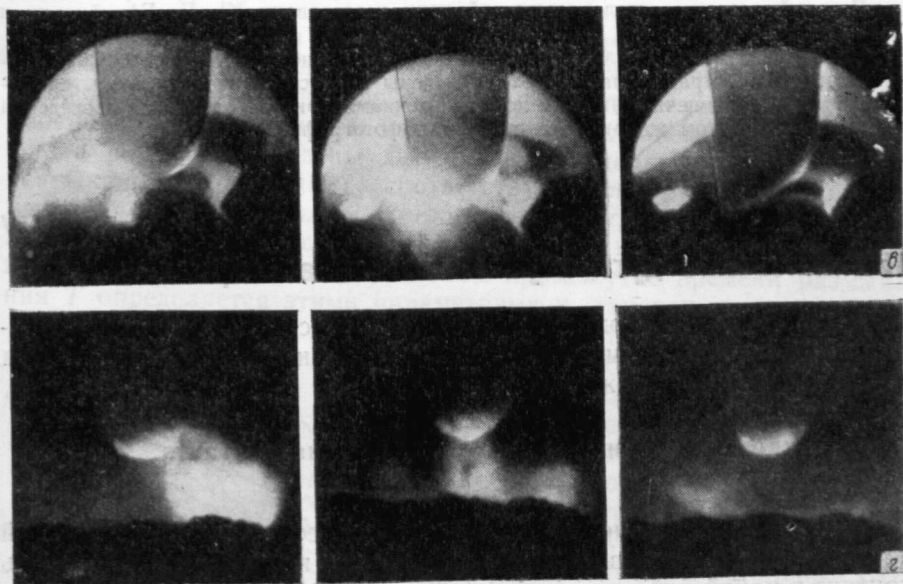
кривых силы тока и напряжения достаточно близка к синусоиде, и таким образом, кривая напряжения не соответствует предположению о постоянстве напряжения дуги.

Этим осциллограммам можно дать объяснение. Напряжение горения дуги, как было видно выше, не является постоянной величиной. В течение полупериода оно меняется в зависимости от степени ионизации разрядного промежутка. Если температура замкнутого пространства, в котором горит дуга, в данном случае тигля печи, такова, что обеспечивает достаточно высокую ионизацию среды, то сопротивление дугового промежутка остается постоянным и дуга ведет себя как металлический проводник с постоянным сопротивлением.

В начале плавки (см. рис. 78, а) ванна печи холодная и температура разрядного промежутка не может обеспечить ионизацию, достаточную для устойчивого и непрерывного горения дуги. Вследствие этого искажены кривые и силы тока, и напряжения. Если бы осциллограммы были сняты в самом начале зажигания дуги, то, несомненно, искажение кривых было бы еще больше. С повышением температуры тигля степень ионизации газовой среды увеличивается и дуга начинает гореть без пауз, как это зафиксировано на рис. 78, а. В дальнейшем тепловой режим дуги улучшается еще больше, степень ионизации среды увеличивается и кривые силы тока и напряжения дуги приближаются к нормальной синусоиде. Кривая силы тока этой осциллограммы содержит обе составляющие — соответствующие и дуговой, и шихтовой проводимости. Так как обе эти составляющие по форме синусоидальны (или близки к синусоиде), то и суммарная кривая силы тока довольно близко подходит к синусоиде.

В 1940 г. И. Т. Жердев опубликовал еще одну работу. На основе той же предпосылки (постоянстве напряжения в период горения дуги) в этой работе развивается теория шунтирования дуги.

В подтверждение своих выводов автор приводит ряд осциллограмм. На рис. 79 даны типичные осциллограммы, снятые И. Т. Жердевым на опытной печи, в контур которой последовательно с дугой включены активное и индуктивное сопротивления, а параллельно — только активное. Как видно, осциллограммы действительно искажены. Но искажение это должно быть объяснено тепловым состоянием разрядного



ряжения и дуги в сталеплавильной печи

промежутка, а не наличием дуги вообще. Если бы дуга в опытной печи, на которой она снята, была достаточно хорошо изолирована в тепловом отношении, то условия горения дуги изменялись бы и искажения, фиксированные на данной осциллограмме, исчезли. Подтверждением этого служат заимствованные из той же работы осциллограммы (рис. 80, *а*, *б*). Эти осциллограммы очень интересны. Схема шунтирования печи и тут принята примерно такой же, как и при снятии осциллограммы рис. 78, *б*, но между этими осциллограммами, как видим, существует резкая разница. Осциллограммы силы тока и напряжения мощной печи не содержат высших гармоник и очень близко подходит к синусоиде. Это вполне понятно. В мощной однофазной печи, благодаря значительным размерам ванны, обеспечивается хорошая герметичность тигля. Температура внутри тигля, особенно вблизи разрядного промежутка, будет, конечно, значительно выше, чем в тигле маленькой опытной печи. Поэтому и степень ионизации в мощной печи будет выше, и, следовательно, кривые силы тока и напряжения будут ближе к синусоиде. По своей форме они весьма близки к осциллограммам силы тока, снятым нами на мощной трехфазной печи при выплавке ферросплавов.

Работы школы проф. С. И. Тельного сыграли важную роль в углублении наших знаний об электрических процессах, происходящих в ванне печи. Поэтому мы так подробно остановились на них. Одинаково ценными для нас оказались как теоретическая, так и экспериментальная части этих работ, которые хорошо иллюстрируют приведенные выше выводы о влиянии теплового режима на форму кривых силы тока и напряжения дуги.

В последующем исследовании мощной печной дуги были проведены нами на ферросплавных и карбидных печах; позднее В. Г. Егизарян исследовал дугу муллитовой печи.

Исследования условий горения печной электрической дуги, которые проведены П. В. Сергеевым [32], также показали, что условия охлаждения дуги во многом определяют характер ее горения и форму кривой напряжения. На рис. 81 приведены осциллограммы дуги в опытной печи (данные П. В. Сергеева). Осциллограммы, показанные на рис. 81, *а* относятся к холодной печи. Кривая напряжения приближается к трапецеидальной форме и имеет пики зажигания. Осциллограммы рис. 81, *б* относятся к разогретой печи (при тех же параметрах электроцепи), и здесь кривая напряжения близка к синусоиде (меньшие ординаты — кривая силы тока).

Дуговой разряд в сталеплавильной печи исследовали Ю. Е. Ефроймович и Г. Ф. Платонов [27].

Следует указать на исследования, проведенные Дунски и Крабиеллом [44, 45]. В качестве иллюстрации на рис. 82 приведены две осциллограммы дуги, снятые в сталеплавильной печи (*а*, *б*), на которых точками показаны моменты проведения фотосъемки. На этом же рисунке приведены фотографии дуги (*в*, *г*).

Глава IV

Возникновение дуги и устойчивость ее горения

Дуговой разряд может возникнуть вследствие нарушения электрического контакта между электродами или в результате пробоя газоразрядного промежутка.

1. Возникновение дуги вследствие нарушения контакта между электродами

Выше было отмечено, что если в электрической цепи, содержащей источник достаточно высокого напряжения и мощности, нарушить контакт в какой-либо точке, то в зависимости от условий в этой точке либо возникает разряд, либо прекращается ток в цепи. Явление это хорошо изучено в теории коммутационной аппаратуры.

Если в цепи (рис. 83) постепенно раздвигать электроды, то сопротивление контакта между электродами будет возрастать. Пусть S_0 — начальная площадь контакта между электродами, r_0 — начальное контактное сопротивление, а T — полное время размыкания контактов; тогда при равномерном смещении контактов поверхность соприкосновения будет изменяться по закону

$$S = S_0 \left(1 - \frac{\tau}{T}\right), \quad (\text{IV-1})$$

а контактное сопротивление будет возрастать обратно пропорционально величине площади S :

$$r = \frac{r_0}{1 - \frac{\tau}{T}} = \frac{r_0 T}{T - \tau}. \quad (\text{IV-2})$$

Так как цепь содержит постоянные параметры контура r_k и L_k , то при постоянной э. д. с. источника дифференциальное уравнение цепи будет

$$L_k \frac{di}{d\tau} + r_k i + r i = U, \quad (\text{IV-3})$$

где напряжение на контакте

$$r i = \frac{r_0 T}{T - \tau} \cdot i. \quad (\text{IV-4})$$

В начале процесса размыкания r — величина незначительная и ток в основном определяется постоянным сопротивлением r_k . К концу процесса, когда контактная площадь S сильно уменьшается, ток в основном, определяется именно сопротивлением r .

На рис. 84 приведены две кривые предельных значений тока размыкания. Величина i_1 соответствует контуру с очень малой индуктивностью и малым сопротивлением r_k ; в этом случае ток затухает линейно i_2 и соответствует контуру, в котором L_k и r_k велики; в этом случае ток на значительном промежутке времени размыкания T определяется этими параметрами и, так как они постоянны, то и ток остается почти постоянным.

Только к концу процесса, когда контактное сопротивление r достигает значительной величины, ток резко уменьшается и идет к обрыву. В это время, очевидно, и произведение $r i$ достигнет большого значения и в пределе будет стремиться к бесконечности. Во всех остальных случаях кривая тока размыкания i будет лежать между этими предельными значениями.

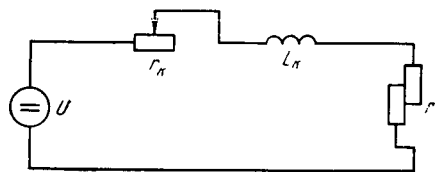


Рис. 83. Схема возникновения дуги

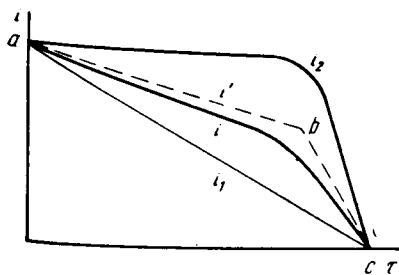


Рис. 84. Ток размыкания дуги

В первом приближении кривую силы тока i можно аппроксимировать ломаной линией abc . Для подавляющего большинства случаев участок ab составляет значительную долю времени размыкания T и имеет небольшой уклон. Поэтому на этом участке производную тока по времени можно принять равной нулю. На участке же bc , т. е. к концу процесса, без большой погрешности можно положить

$$\frac{di}{d\tau} = -\frac{i}{T-\tau}. \quad (\text{IV-5})$$

Подставив это значение производной тока, упростим уравнение (IV-3):

$$-L_k \frac{i}{T-\tau} + ir_k + ri = U. \quad (\text{IV-6})$$

К концу процесса ток сильно уменьшается, и падение напряжения в сопротивлении r_k становится незначительным, поэтому можно им пренебречь и уравнение (IV-6) переписать следующим образом:

$$-L_k \frac{i}{T-\tau} + ri = U. \quad (\text{IV-7})$$

Далее, принимая во внимание уравнение (IV-4), получим

$$-\frac{L_k}{r_0 T} \cdot ri + ri = U, \quad (\text{IV-8})$$

откуда

$$ri = \frac{U}{1 - \frac{L_k}{r_0 T}}. \quad (\text{IV-9})$$

Это уравнение показывает, что напряжение размыкания зависит от индуктивности контура L_k , времени размыкания T и контактного сопротивления r . Так как с увеличением L_k или уменьшением T произведение ri растет, то при определенном сочетании этих величин ri может стать больше U , а при критическом условии

$$T = L_k/r_0 \quad (\text{IV-10})$$

может достигнуть бесконечности.

Таким образом, для того чтобы произведение ri было конечной величиной, необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$T > L_k/r_0. \quad (\text{IV-11})$$

Отношение L_k к r_0 называется постоянной времени отключающих контактов:

$$\tau = L_k/r_0. \quad (\text{IV-12})$$

Итак, чтобы напряжение размыкания отключающих контактов ri было конечной величиной, необходимо, чтобы время размыкания было больше постоянной времени отключающих контактов.

Из уравнения (IV-9) можно получить и условие для размыкания цепи без скачка напряжения. Очевидно, если

$$(L_k/r_0) T = 0, \quad (\text{IV-13})$$

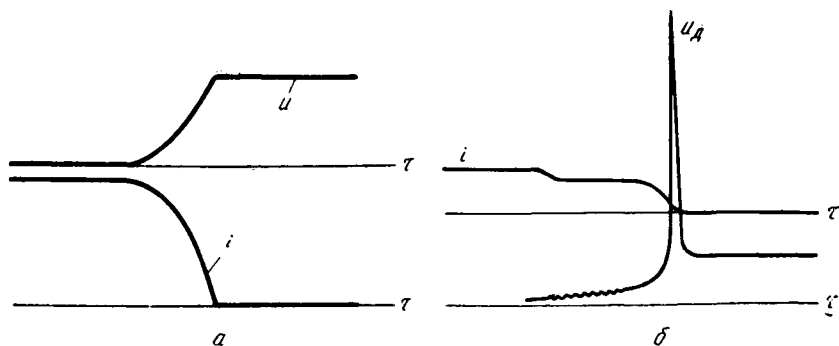


Рис. 85. Осциллограмма отключения тока

то напряжение размыкания будет равно U . Так как r_0 и T не равны нулю, то получаем условие $L_k = 0$.

Но если индуктивность контура равна нулю, то уравнение (IV-6) упрощается и дает решение:

$$i = \frac{U}{r_k + \frac{r_0}{1 - \frac{\tau}{T}}}. \quad (\text{IV-14})$$

Итак, равномерному спаду тока i соответствует равномерный подъем напряжения размыкания.

На рис. 85, а, б приведены осциллограммы размыкания цепи постоянного тока с различными характеристиками. На рис. 85, а показано отключение цепи при малой индуктивности. Напряжение на контактах почти прямолинейно достигает конечного значения (235 В), при котором отключается цепь. Ток в течение 8,5 мс спадает от 40 А до нуля. На рис. 85, б показано отключение цепи при большой индуктивности. Процесс отключения сопровождается возникновением дуги и длится 0,45 с. В течение этого времени ток от 20 А спадает до нуля, напряжение же скачком достигает 1600 В, а потом спадает до номинального значения 250 В. За это же время напряжение на индуктивности скачком возрастает от нуля до 1350 В и снова спадает до нуля.

Ход кривой напряжения дуги характерен и в другом отношении. В течение первых 0,35 с, он нарастает всего на 8—10%, остальной скачок напряжения и соответственно спад тока проходит в течение оставшихся 0,01 с.

Рассмотрим энергетическую сторону процесса размыкания. За время размыкания в контактной области выделится в виде тепла энергия

$$W = \int_0^T u_k i \, d\tau. \quad (\text{IV-15})$$

Подставив из уравнения (IV-3) значение напряжения контакта u_k , получим

$$W = \int_0^T \left(U - r_k i - L_k \frac{di}{d\tau} \right) i d\tau = \int_0^T (U - r_k i) d\tau - \\ - \int_{I_0}^0 L_k i d\tau i = \int_0^T (U - r_k i) i d\tau + \frac{I_0^2 L_k}{2}. \quad (\text{IV-16})$$

Как видим, энергия, выделяющаяся в контактной области, складывается из двух составляющих. Первая из них определяется активным сопротивлением контакта, а вторая представляет собой энергию электромагнитного поля контура перед размыканием и пропорциональна индуктивности контура и квадрату силы тока перед размыканием.

За счет этой энергии нагреваются контакты и повышается их температура. Если контур характеризуется малой индуктивностью, а размыкающиеся контакты — большой теплопроводностью, и процесс размыкания протекает достаточно медленно (значение T велико), то количество тепла, выделяющееся в контакте, невелико. Оно быстро рассеивается и температура контактов остается на сравнительно низком уровне, ниже температуры плавления и испарения материалов контактов. В этом случае процесс размыкания цепи заканчивается без возникновения газового разряда между размыкающимися контактами. Во избежание возникновения дуги в коммутационной аппаратуре для изготовления контактов используют обыкновенно материалы, характеризующиеся высокой теплопроводностью и высокими температурами плавления и испарения (серебро, медь). Но такие бездуговые разряды удается осуществлять только при малых токах (до 0,5 А). При больших токах энергия магнитного поля разрываемого контура бывает настолько велика, что даже при сравнительно малых скоростях размыкания энергия размыкания не успевает рассеяться. Контактные поверхности нагреваются до температуры плавления, а потом и испарения, и между расходящимися контактами возникает газовый разряд.

При оплавлении материала контактов и стекании его из контактной области сечение последней уменьшается и соответственно растет ее сопротивление, что приводит к дальнейшему повышению температуры контактных поверхностей и их испарению. Высокая температура паров контактных материалов приводит к их ионизации и создаются условия для возникновения газового разряда.

Правда, неясен механизм образования катодного пятна, так как у многих контактных материалов, в том числе и у меди, температура испарения ниже температуры образования катодных пятен, но описанная выше картина образования дуги типична для размыкания цепей многих видов. Так возникает дуга при разрушении плавких предохранителей, сварочная дуга в начале ее образования и в подавляющем большинстве случаев в коммутационной аппаратуре.

На рис. 86 приведен график нарастания температуры плавкой вставки с указанием стадии состояния материала вставки и длительности этой стадии. Из него видно, как повышение температуры приводит к возникновению дуги.

Так же в большинстве случаев возникает дуга в электропечи. Такое возникновение дуги особенно характерно для сталеплавильных печей в период расплавления, когда электрод часто приходит в соприкосновение с проводящим металлическим ломом, а потом отрывается от него.

На рис. 87 приведена для сравнения осциллограмма разрыва тока плавким предохранителем. Одинаковый характер протекания этого процесса и процесса разрыва тока в сталеплавильной печи очевиден. Разница состоит только в том, что дуга, возникшая после разрушения плавкой вставки, не возобновилась, а дуга в печи после нескольких гашений вступила в устойчивое горение.

Вернемся теперь к напряжению дуги. Мы видели выше, что при выполнении критического условия (IV-10) напряжение на размыкающихся контактах может достигнуть бесконечно большой величины. С появлением дуги это условие нарушается, так как дуговой разряд обеспечивает дальнейшее прохождение тока в контуре.

С появлением дуги существенно меняются условия размыкания контактов, так как величина контактного сопротивления r уже не стремится к бесконечности. В результате этого длительность процесса размыкания T растет. Либо она достигнет конечной величины $T_d > T$, либо — бесконечной. В первом случае дуга будет гореть неустойчиво и исчезнет по прошествии времени T_d , во втором она будет гореть устойчиво до тех пор, пока какие-либо новые возмущения не приведут к ее исчезновению.

Условия устойчивого горения дуги рассмотрим позднее. Здесь же отметим очевидный факт, что дуга может гореть только до тех пор, пока напряжение на контактах будет достаточным для покрытия падения напряжения во всем разрядном промежутке.

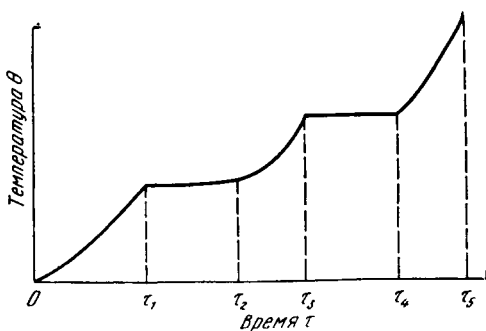


Рис. 86. График нарастания температуры плавкой вставки:

Периоды: $0-\tau_1$ — нагревание; $\tau_1-\tau_2$ — расплавление; $\tau_2-\tau_3$ — нагревание жидкого металла; $\tau_3-\tau_4$ — испарение; $\tau_4-\tau_5$ — дуга



Рис. 87. Осциллограмма разрыва тока плавким предохранителем

2. Возникновение дуги при пробое газоразрядного промежутка

Разряд этого вида возникает в газовом промежутке между электродами, расположенными на некотором расстоянии друг от друга. В этом случае дуговому разряду могут предшествовать газовые разряды других видов (несамостоятельный, самостоятельный, тлеющий). Как было отмечено, все они отличаются от дугового разряда тем, что характеризуются очень высокими потенциалами на катоде и очень малыми токами. Это различие из количественного переходит в качественное. Но все же при определенных условиях предшествующие разряды переходят в дуговые. Не будем останавливаться на теории додуговых разрядов и рассмотрим непосредственно процесс перехода разрядов других видов в дуговой.

В газовом промежутке между электродами всегда находится некоторое число ионизированных частиц и процессы электризации и деэлектризации газа протекают непрерывно. Уровень электризации газа зависит от ряда условий (температуры, давления и т. д.). Если наложить на газ между электродами электрическое поле, то ионизированные частицы получат направленное движение. При благоприятных условиях в приэлектродных областях эти частицы создадут электрический ток. Очевидно, что чем сильнее будет электризован газ, тем больше ток в разрывном промежутке.

С возрастанием напряжения, приложенного к электродам, растет и ударная ионизация газового промежутка.

Когда скорость ионизации превысит скорость деионизации газа рекомбинацией и диффузией, ток в разрядном промежутке начнет резко возрастать и произойдет пробой газа — возникнет дуговой разряд.

Напряженность поля, при которой происходят пробой газового промежутка и возникновение дуги, называется *пробивным градиентом газа*.

Таким образом, когда напряженность внешнего поля, приложенного к электродам, превысит пробивной градиент, в газе возникнет дуговой разряд, который сам установит необходимые на электродах условия горения.

Пробивной градиент газов при нормальных условиях температуры и давления весьма велик. Например, для воздуха при 760 мм рт. ст. и 273 К он составляет ~ 30 кВ/см.

Однако с изменением этих условий пробивной градиент резко меняется. На рис. 88, а, б приведены кривые, показывающие зависимость изменения пробивного градиента от этих условий.

С разрядом такого вида в электрических печах мы встречаемся значительно чаще, чем обычно принято это считать.

Действительно, в печах переменного тока при прерывистом горении дуги в течение каждого полупериода возникает и исчезает дуговой разряд. Дуга возникает только в тот момент, когда нарастающее внешнее напряжение создает напряженность поля, превышающую пробивной градиент газа при данной температуре и дуга го-

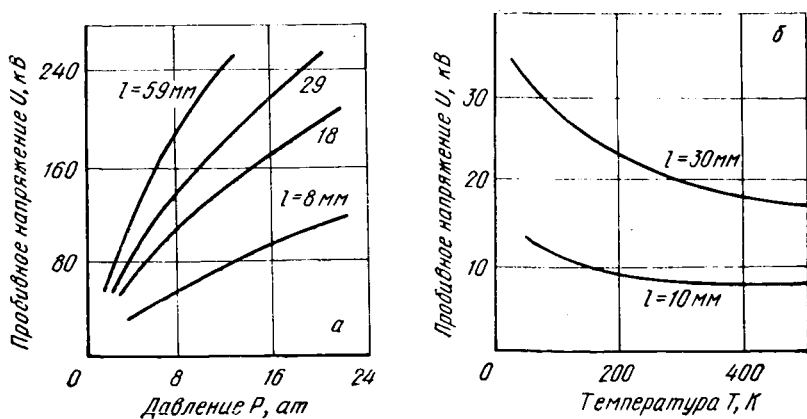


Рис. 88. Зависимость пробивного напряжения воздуха при различных расстояниях между электродами (электроды симметричные):
 а — от давления; б — от температуры (l — расстояние между электродами)

рит только до тех пор, пока существуют эти условия. После прохождения напряжения через максимум его значение падает; вместе с тем падает и напряженность поля. Когда она станет меньше пробивного градиента, дуговой разряд исчезнет. В зависимости от тепловой инерции газового разряда и значения его пробивного градиента необходимое напряжение горения дуги будет различным. Итак, при периодическом изменении напряжения и напряженности разрядного промежутка дуга будет периодически возникать и исчезать. Возможны следующие предельные случаи. После возникновения дуги внешние факторы быстро и интенсивно усиливают условия деэлектризации газа (быстрая рекомбинация). Вследствие этого пробивной градиент дуги возрастает, становится больше напряженности поля, созданного внешним источником, и дуга гаснет. В этом случае наблюдается неустойчивая угасающая дуга.

При постоянном внешнем напряжении возможен случай, когда внешние факторы не меняют пробивного градиента дугового промежутка. При этом дуга будет гореть длительно и устойчиво.

При переменном внешнем напряжении газовая среда может обладать достаточно малой инерцией пробивного градиента. Пробивной градиент тоже будет меняться периодически. Дуга возникает и исчезает в течение каждого полупериода и горит прерывисто, но устойчиво.

Наконец, при определенных условиях, инерция газового слоя и его пробивного градиента может быть настолько велика, что пробивной градиент будет оставаться постоянным и достаточно низким. В этом случае дуга переменного тока может гореть устойчиво и непрерывно.

Рассмотрим, как зависит устойчивость горения дуги от параметров внешней части дугового контура.

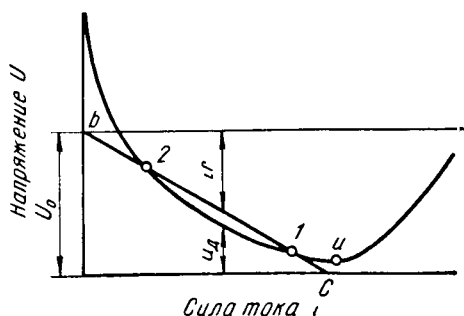


Рис. 89. Вольтамперная характеристика дуги в общем виде

3. Устойчивость горения дуги постоянного тока

Пусть контур дуги содержит постоянное сопротивление r_k и индуктивность L_k (рис. 89). Вольтамперная характеристика дуги в общем случае может иметь и нисходящую и восходящую ветви, т. е. до точки минимума (точка *a* на рис. 89) с увеличением силы тока напряжение дуги будет уменьшаться, а за точкой минимума увеличиваться.

В общем виде уравнение рассматриваемого контура можно записать так:

$$U_0 = u_d + ir_k + L_k \frac{di}{dt}, \quad (\text{IV-17})$$

где U_0 — приложенное постоянное напряжение;

u_d — напряжение дуги;

r_k — сопротивление внешней части дугового контура;

L_k — индуктивность внешней части дугового контура.

Когда дуга горит устойчиво и контур находится в установившемся режиме, индуктивного падения напряжения в контуре не будет и приложенное напряжение будет уравниваться падениями напряжений на активном сопротивлении r_k и дуге:

$$U_0 = u_d + ir_k. \quad (\text{IV-17a})$$

Первая составляющая определяется вольтамперной характеристикой, а вторая — прямой *bc*. Как видно из рис. 89, уравнение (IV-17) может быть удовлетворено только в двух точках пересечения этих кривых — 1 и 2. Обе точки соответствуют установившемуся горению дуги.

Рассмотрим теперь случай, когда по какой-либо причине в контуре произойдет возмущение и ток в цепи получит приращение Δi , которому будет соответствовать дополнительное падение напряжения:

$$\Delta u_d = r_{\text{диф}} \cdot \Delta i, \quad (\text{IV-18})$$

где $r_{\text{диф}}$ — дифференциальное сопротивление дуги.

Для нового значения тока $i' = i + \Delta i$ уравнение (IV-17) перепишем так:

$$U_0 = u_d + \Delta u_d + i' r_k = L_k \frac{di'}{dt}, \quad (\text{IV-19})$$

или

$$U_0 = u_d + r_{\text{диф}} \cdot \Delta i + r_k (i + \Delta i) + L_k \cdot \frac{d(i + \Delta i)}{dt}. \quad (\text{IV-20})$$

Вычитая уравнение (IV-17) из уравнения (IV-20), получим:

$$r_{\text{диф}} \cdot \Delta i + r_k \Delta i + L_k \frac{d\Delta i}{d\tau} = 0, \quad (\text{IV-21})$$

или

$$(r_{\text{диф}} + r_k) \Delta i + L_k \frac{d\Delta i}{d\tau} = 0. \quad (\text{IV-22})$$

Интегрируя последнее уравнение, получим

$$\Delta i = (\Delta i)_0 \cdot \exp\left(-\frac{r_k + r_{\text{диф}}}{d\tau}\right), \quad (\text{IV-23})$$

где $(\Delta i)_0$ — приращение тока в начале возмущения.

Из этого уравнения видно, что величина приращения тока зависит от суммы сопротивлений $r_k + r_{\text{диф}}$.

Если

$$r_k + r_{\text{диф}} > 0, \quad (\text{IV-24})$$

или, иначе,

$$r_k + \frac{du_d}{di} > 0, \quad (\text{IV-25})$$

то экспонента стремится к нулю, и вместе с ней стремится к нулю приращение тока Δi . Таким образом, по прошествии некоторого времени возмущение ликвидируется и ток придет к первоначальному установившемуся значению. В общем виде условие (IV-24) называется критерием Кауфмана и соответствует устойчивому протеканию процесса, в данном случае — горению дуги при появлении возмущений.

Если

$$r_k + r_{\text{диф}} < 0, \quad (\text{IV-26})$$

то экспонента, а вместе с ней приращение тока и полный ток будут стремиться к бесконечности, т. е. процесс не возвращается к начальному состоянию.

Следовательно, условие (IV-26) соответствует неустойчивому горению дуги.

Выше мы определили дифференциальное сопротивление дуги как отношение бесконечно малого приращения напряжения к бесконечно малому приращению тока, или, иначе, как производную напряжения по току:

$$r_{\text{диф}} = (du_d/di). \quad (\text{IV-27})$$

На рис. 90 наряду с вольтамперной характеристикой дуги

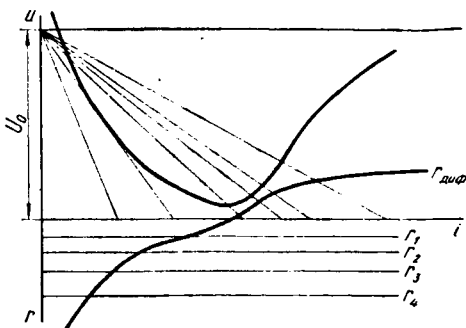


Рис. 90 Кривая дифференциального сопротивления дуги

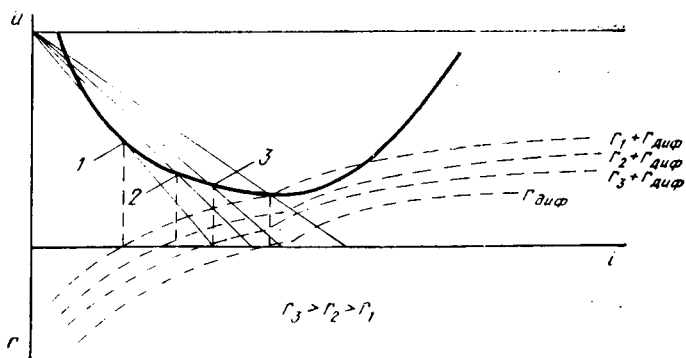


Рис. 91. Семейство кривых результирующего сопротивления

приведена кривая дифференциального сопротивления. На падающей ветви вольтамперной характеристики $r_{\text{диф}}$ имеет отрицательное значение, так как на ней увеличению тока соответствует уменьшение напряжения; в точке минимума характеристики $r_{\text{диф}}$ равно нулю, а на восходящей части характеристики оно приобретает положительное значение.

Так как в начальной части характеристика падает резко, то значение $r_{\text{диф}}$ на этом участке велико. Восходящая же часть в большинстве случаев прямолинейна, поэтому $r_{\text{диф}}$ для нее остается почти постоянным.

На рис. 91 построена кривая дифференциального сопротивления и семейство кривых результирующего сопротивления $r_k + r_{\text{диф}}$ для нескольких значений сопротивления внешней части дугового контура.

Точки пересечения этих кривых показывают критические значения токов и напряжений дуги, соответствующие значению $r_k + r_{\text{диф}} = 0$. Возмущения, возникающие правее точек 1, 2, 3, ликвидируются, и дуга продолжает гореть устойчиво.

4. Устойчивость горения дуги переменного тока

По сравнению с дугой постоянного тока дуга переменного тока менее устойчива. Это объясняется тем, что напряжение источника в течение каждого периода дважды проходит через нулевое значение и, следовательно, дважды за период напряжение на электродах разрядного промежутка может оказаться меньше напряжения возникновения дуги. Вообще говоря, в течение каждого полупериода возникает и исчезает дуга. Вопрос стоит только о длительности паузы тока между исчезновением и повторным возникновением дуги. При непрерывном горении дуги длительность паузы равна нулю — ток дуги так же плавно проходит через нулевое значение, как и напряжение источника. При прерывистом, но устойчивом горении дуги эта пауза имеет конечное значение. Наконец, при неустойчивом горении после исчезновения дуга снова не возникает, происходит гашение дуги, пауза тока становится равной бесконечности.

Если контур с дугой содержит большую индуктивность и незначительное активное сопротивление, то ток в контуре будет сдвинут на значительный угол по отношению к напряжению. Поэтому в момент прохождения тока через нуль на электродах создается напряжение, достаточное для возникновения дуги. В таких контурах дуга легко появляется повторно, и горение ее становится устойчивым.

При больших активных сопротивлениях и малых индуктивностях контура в момент прохождения тока через нуль напряжение на разрядном промежутке уменьшается и вследствие этого затрудняется повторное возникновение дуги.

Рассмотрим устойчивость горения дуги для этих двух предельных случаев.

Устойчивость горения дуги в контуре с большой индуктивностью

Пусть в контуре дуги активное сопротивление ничтожно мало, а индуктивность велика (рис. 92).

Примем напряжение источника синусоидальным:

$$u = U_m \sin (\omega \tau + \varphi). \quad (\text{IV-28})$$

Мощность источника примем настолько большой, что искажения тока, обусловленные наличием дуги, не повлияют на форму напряжения u .

Форма кривой напряжения дуги зависит от внешних условий среды, в которой будет гореть дуга. При устойчивом горении дуги кривая напряжения дуги будет периодической несинусоидальной функцией времени и в общем виде ее можно выразить рядом Фурье:

$$u_d = \sum_1^{\infty} U_{mn} \sin (n \omega \tau + \varphi). \quad (\text{IV-29})$$

Зная параметры контура и коэффициенты ряда, можно решить задачу в общем виде, т. е. найти силу тока и соответствующие значения напряжения. Но решение задачи в общем виде затруднительно. К этому мы вернемся позже. Сейчас рассмотрим частный случай, когда напряжение дуги имеет прямоугольную форму (рис. 93.)

Решение этой задачи в свое время было дано С. И. Тельным [37]. Для

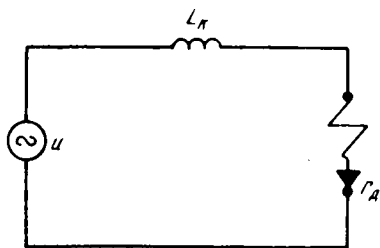


Рис. 92. Контур дуги с ничтожно малым активным сопротивлением

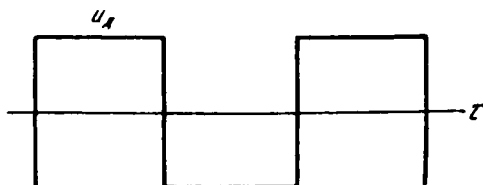


Рис. 93. Прямоугольная кривая напряжения дуги

случая прямоугольной формы кривой напряжения дуги можем положить

$$u = \pm u_d. \quad (\text{IV-30})$$

Так как мы пренебрегли активным сопротивлением контура, то дифференциальное уравнение контура запишется:

$$L_k \frac{di}{d\tau} + u_d = u, \quad (\text{IV-31})$$

или

$$L_k \frac{di}{d\tau} + u_d = U_m \sin(\omega\tau + \varphi). \quad (\text{IV-31a})$$

Отсюда мы получим значение силы тока:

$$i = \frac{U_m}{L_k} \int \sin(\omega\tau + \varphi) \pm \int \frac{u_d}{L_k} d\tau. \quad (\text{IV-32})$$

После интегрирования для положительной полуволны сила тока будет равна:

$$i = -\frac{U_m}{\omega L_k} \cos(\omega\tau + \varphi) + \frac{U_m}{\omega L_k} \cos \varphi - \frac{u_d}{\omega L_k} \omega\tau. \quad (\text{IV-33})$$

Для отрицательной полуволны форма кривой тока будет та же. Через полпериода ток должен стать равным нулю, т. е. при $\tau = -\frac{T}{2}$ или $\omega\tau = \pi$:

$$-\frac{U_m}{\omega L_k} \cos(\pi + \varphi) + \frac{U_m}{\omega L_k} \cos \varphi - \frac{u_d}{\omega L_k} \pi = 0, \quad (\text{IV-34})$$

или

$$U_m \cos \varphi + U_m \cos \varphi - u_d \pi = 0, \quad (\text{IV-34a})$$

откуда можно определить

$$\cos \varphi = \frac{\pi}{2} \frac{u_d}{U_m}. \quad (\text{IV-35})$$

Подставив уравнение (IV-35) в (IV-33), получим значение силы тока

$$i = -\frac{U_m}{\omega L_k} \cos(\omega\tau + \varphi) + \frac{u_d}{\omega L_k} \left(\frac{\pi}{2} - \omega\tau \right). \quad (\text{IV-36})$$

Как видим, ток складывается из двух составляющих. Одна из них имеет синусоидальную форму и сдвинута по отношению к напряжению на угол φ . Вторая составляющая в пределах полупериода меняется линейно и, следовательно, как периодическая кривая имеет треугольную форму. В точках перехода этой составляющей через максимум падение напряжения на индуктивности L_k так же, как и приложенное напряжение, имеет скачок. На рис. 94, а представлены

кривая напряжения источника и расчетная кривая силы тока. Как видим, последняя искажена — она медленно поднимается к максимуму и резко спускается к нулю. Там же показаны кривые напряжений дуги и индуктивности. Мы видим, что напряжение последней резко искажено и сильно отстает от синусоиды.

С ухудшением условий горения дуги напряжение дуги растет. Поэтому с увеличением напряжения дуги усиливается искажение формы тока. На рис. 94, б приведены расчетные кривые, показывающие это искажение. С увеличением искажения кривой силы тока уменьшается угол сдвига между силой тока и напряжением. Это объясняется тем, что с увеличением напряжения дуги активное сопротивление цепи начинает преобладать над индуктивным. Как видно из уравнения (IV-35), при напряжении дуги, равном $u_d = \frac{2}{\pi} U_m$,

угол сдвига фазы становится равным нулю; кривые силы тока и напряжения совпадают по фазе. Кривая напряжения на индуктивности u_L в этом случае искажена еще больше, чем в предыдущих. На рис. 95 представлены кривые для этого случая. Как видим, кривая u_L имеет весьма искаженную форму с довольно длительными паузами, соответствующими паузам тока. Наконец, на рис. 95 приведена экспериментальная кривая, подтверждающая эти закономерности.

Теоретически предельным случаем прекращения горения дуги будет равенство напряжения дуги и амплитуды приложенного напряжения:

$$u_d = U_m.$$

В этом случае u может быть равно напряжению возникновения дуги только в момент прохождения через максимум и дуга, конечно, не возникает. В действительности более или менее устойчивое горение дуги прекращается значительно раньше.

Всякая пауза тока связана с определенным ухудшением теплового состояния разрядного промежутка, так как деионизационные про-

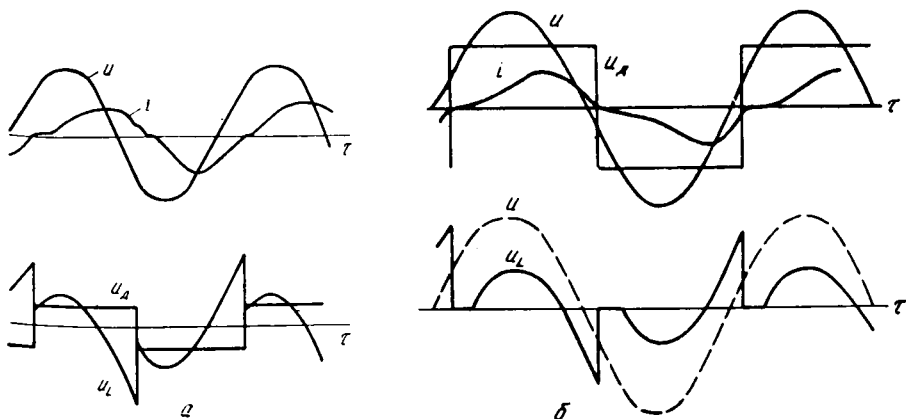


Рис. 94. Расчетные кривые силы тока и напряжения дуги согласно уравнению (IV-32): а — напряжение дуги мало; б — напряжение дуги велико

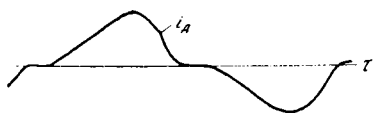


Рис. 95. Осциллограмма тока печи с паузами

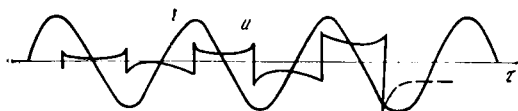


Рис. 96. Осциллограмма гашения дуги с пиками возникновения и исчезновения дуги

цессы резко уменьшают электризацию газа. А это связано с увеличением сопротивления столба и, следовательно, с увеличением напряжения возникновения разряда. Поэтому с увеличением паузы тока пики возникновения и исчезновения дуги растут. Форма кривой напряжения уже не может быть прямоугольной, и приведенный выше анализ становится недействительным. Для иллюстрации на рис. 96 приведена кривая гашения дуги. Процесс гашения занял всего $\sim 2,5$ периода и видно, как с увеличением напряжения дуги растут и его пики.

Следует отметить, что с увеличением силы тока дуги тепловой режим в столбе дуги улучшается и дуга начинает гореть более устойчиво. Поэтому для улучшения теплового режима дуги и повышения ее устойчивости и эффективности в последнее время на дуговых сталеплавильных печах стремятся поддерживать большие токи при относительно низких напряжениях.

Глава V

Математические методы анализа силы тока и напряжения дуги

1. Введение

Математический анализ силы тока и напряжения дугового разряда осложняется тем, что цепь, содержащая дугу, является нелинейной, и вольтамперные характеристики дуги изменяются в весьма широких пределах. Вследствие этого выводы, касающиеся характеристик одного вида, становятся неприемлемыми для характеристик другого. Сами же характеристики зависят от большого числа факторов. Несмотря на это, математический анализ позволяет сделать ряд весьма полезных обобщений.

Ниже приведена попытка общего анализа дугового разряда. Основное ограничение наложено на динамическое сопротивление столба дуги. Предполагается, что оно зависит главным образом от температуры.

2. Уравнение напряжения столба дуги

В основу вывода общего уравнения контура, содержащего электрическую дугу, можно положить электронную теорию строения столба дуги.

Согласно последней, плотность тока в столбе дуги определяется уравнением

$$\delta = n_e e_0 k_e E, \quad (V-1)$$

где δ — плотность тока, А/см²;
 n_e — объемная плотность электронов (число электронов в 1 см³), 1/см³;
 e_0 — заряд одного электрона, равный $1,59 \cdot 10^{-19}$ Кл;
 k_e — подвижность электрона, см²/(В·с);
 E — напряженность электрического поля, В/см.

С помощью коэффициента Саха плотность электронов определяют по уравнению

$$n_e = nx, \quad (V-2)$$

где n — общее число частиц в единице объема;

x — степень ионизации газа, которая, согласно выражению (II-20), определяется уравнением

$$x = 2,2 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{g_p}{g_g}} \cdot \frac{T^{3/4}}{p^{1/2}} e^{-\frac{5800U_i}{T}}. \quad (V-3)$$

Так как давление можно выразить через абсолютную температуру уравнением

$$p = nkT, \quad (V-4)$$

то уравнение Саха можно переписать так:

$$x = 2,2 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{g_p}{g_g}} \cdot \frac{T^{3/4}}{n^{1/2} k^{1/2}} \cdot e^{-\frac{5800U_i}{T}}. \quad (V-5)$$

Из формул (V-2) и (V-5) для плотности электронов получаем

$$n_e = 2,2 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{g_p}{g_g}} n^{-1/2} k^{-1/2} T^{3/4} e^{-\frac{5800U_i}{T}}, \quad (V-6)$$

Подвижность же электронов k_e , как известно, в первом приближении определяется уравнением Ланжевена:

$$k_e = a_e \frac{e_0 \lambda_e}{m_e v_e}, \quad (V-7)$$

где a_e — числовой коэффициент;

λ_e — средняя длина свободного пробега электрона в газе;

m_e — масса электрона;

v_e — средняя скорость электрона.

Пользуясь этим же законом, можно выразить подвижность электронов через концентрацию частиц и температуру

$$k_e = a_1 \frac{1}{n \sqrt{T}}, \quad (V-8)$$

где a_1 — постоянная.

Подставив уравнения (V-6) и (V-8) в уравнение (V-1), получим уравнение для определения плотности тока:

$$\delta = 2,2 \cdot 10^{-2} a_1 \sqrt{\frac{g_p}{g_g}} n^{-1/2} k^{-1/2} T^{1/4} e_0 e^{-\frac{5800U_i}{T}} E. \quad (V-9)$$

Обозначим все постоянные одной буквой

$$A' = 0,022 a_1 e_0 k^{-1/2} \sqrt{\frac{g_p}{g_g}}; \quad (V-10)$$

тогда плотность тока

$$\delta = A' n^{-1/2} T^{1/4} e^{-\frac{5800 U_i}{T}} E. \quad (V-11)$$

В то же время, так как плотность тока равна произведению удельной электропроводности на напряженность электрического поля, т. е. $\delta = \gamma_k E$, электропроводность разрядного контура γ_k выражается следующей формулой:

$$\gamma_k = A' n^{-1/2} T^{1/4} e^{-\frac{5800 U_i}{T}}. \quad (V-12)$$

Примем напряжение столба дуги пропорциональным градиенту потенциала и длине столба:

$$u_d = El. \quad (V-13)$$

Из (V-11) следует, что напряженность поля дуги

$$E = \frac{\delta}{A' n^{-1/2} T^{1/4} e^{-\frac{5800 U_i}{T}}}. \quad (V-14)$$

Так как плотность тока равняется частному от деления силы тока на поперечное сечение дуги, т. е.

$$\delta = i/S, \quad (V-15)$$

то напряженность поля дуги можно выразить через ток:

$$E = \frac{i}{A' S n^{-1/2} T^{1/4} e^{-\frac{5800 U_i}{T}}}. \quad (V-16)$$

Подставив выражение (V-16) в уравнение (V-13), получим напряжение столба дуги:

$$u_d = i \frac{l}{A' S n^{-1/2} T^{1/4}} e^{-\frac{5800 U_i}{T}}. \quad (V-17)$$

В этом уравнении коэффициент, стоящий при величине силы тока, представляет собой динамическое сопротивление разрядного промежутка, так как он является отношением мгновенного значения напряжения столба к мгновенному значению тока. Обозначим его через r_d , т. е.

$$r_d = \frac{l}{A' S n^{-1/2} T^{1/4}} e^{-\frac{5800 U_i}{T}}, \quad (V-18)$$

или, принимая во внимание (V-10), можем записать

$$r_d = \frac{l \sqrt{nk}}{2,2 \cdot 10^{-2} a_1 e_0 \sqrt{\frac{g_p}{g_g}} T^{1/4} S} e^{-\frac{5800 U_i}{T}}. \quad (V-19)$$

Тогда напряжение столба дуги можно выразить через силу тока и динамическое сопротивление уравнением:

$$u_d = i r_d, \quad (V-20)$$

т. е. напряжение столба дуги равно произведению тока дуги на динамическое сопротивление столба.

3. Зависимость динамического сопротивления столба дуги от температуры

Из уравнения (V-19) видно, что r_d зависит от ряда факторов. Наиболее важными из них являются геометрические размеры столба дуги (l и S) и его температура.

Примем все величины, от которых зависит r_d , за исключением температуры, постоянными и исследуем величину r_d как функцию T .

Температура входит в уравнение (V-19) в качестве множителя дважды — один раз в знаменатель в степени 0,25, а другой раз в показатель e . Так как влияние первого множителя значительно слабее, чем второго, то мы можем положить величину $T^{0,25}$ постоянной и рассматривать динамическое сопротивление столба как показательную функцию температуры

$$r_d = A e^{B/T}, \quad (V-21)$$

где A и B — постоянные:

$$A = \frac{45,5 l \sqrt{N k}}{a_1 e_0 \sqrt{\frac{g_p}{g_g}} S T^{0,25}}; \quad (V-22)$$

$$B = 5800 U_i. \quad (V-23)$$

Выше мы видели, что при периодическом напряжении сети температура дуги также имеет периодический характер, но с двойной частотой. Это объясняется тем, что при каждом прохождении тока через нуль температура становится минимальной и, наоборот, при каждом максимуме тока температура также достигает максимального значения. На рис. 97 приведены кривые, иллюстрирующие изменение температуры дугового столба в предположении, что кривая напряжения дуги имеет

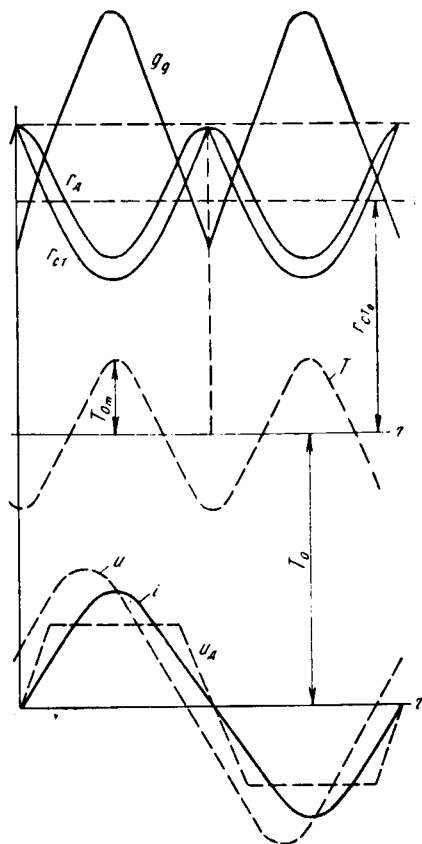


Рис. 97. Изменение температуры, сопротивления и проводимости дуги при синусоидальном токе

трапецеидальную форму, а кривая силы тока весьма близка к синусоиде. Как видим, кривая температуры имеет постоянную составляющую T_0 и колеблется около нее с двойной частотой. Максимумы температуры совпадают с максимумами тока, а минимумы — с нулевыми значениями тока. На рис. 38 была приведена экспериментальная кривая по данным Кессельринга для дуги при силе тока $I=2,82$ А, температура которой меняется от 4000 до 6000 К. Кривая температуры отстает от синусоидальной формы, предельные значения температур смещены от нулевых и амплитудных значений тока, но эти отступления настолько незначительны, что кривую температуры можно заменить синусоидой с двойной по отношению к току частотой.

При этих условиях кривую температур можно выразить уравнением

$$T = T_0 + T_{0m} \sin(2\omega\tau - 90^\circ),$$

или

$$T = T_0 - T_{0m} \cos 2\omega\tau, \quad (V-24)$$

где T и T_0 — соответственно мгновенное и среднее значения температуры столба дуги;

T_{0m} — амплитуда колебания среднего значения температуры.

Подставив это значение температуры в уравнение (V-21), получим динамическое сопротивление столба дуги в таком виде:

$$r_d = A e^{\frac{B}{T_0 - T_{0m} \cos 2\omega\tau}}. \quad (V-25)$$

На рис. 97 наряду с кривыми напряжения, силы тока и температуры приведены также кривые динамического сопротивления и динамической проводимости дуги. Как видим, при сделанных допущениях сопротивление в течение всего периода имеет конечное значение и, следовательно, уравнение (V-25) неприменимо для случая горения дуги с паузами, тем более, если эти паузы носят длительный характер. Однако уравнение (V-25) дает вполне приемлемые результаты для подавляющего большинства случаев горения дуги в руднотермической печи.

Действительно, диапазон изменения r_d в течение периода, определяемый функцией (V-25), зависит как от общего уравнения температуры T_0 , так и от амплитуды ее колебания T_{0m} .

Степень колебания температуры в течение периода можно характеризовать относительным изменением температуры $K_{o. и. \tau}$:

$$K_{o. и. \tau} = T_{0m}/T_0.$$

Исследование уравнения (V-25) относительно T_0 , T_{0m} и K проведено М. С. Отарьяном. Оно охватывает диапазон средних температур T_0 от 5000 до 7000 К. Амплитуды же температур во всех случаях приняты от 400 до 1000 К.

Таким образом, исследованием охвачено относительное изменение температуры $K_{o. и. \tau}$ в достаточно широких пределах — от 0,2 до 0,057. На рис. 98 приведены три семейства кривых изменения r_d

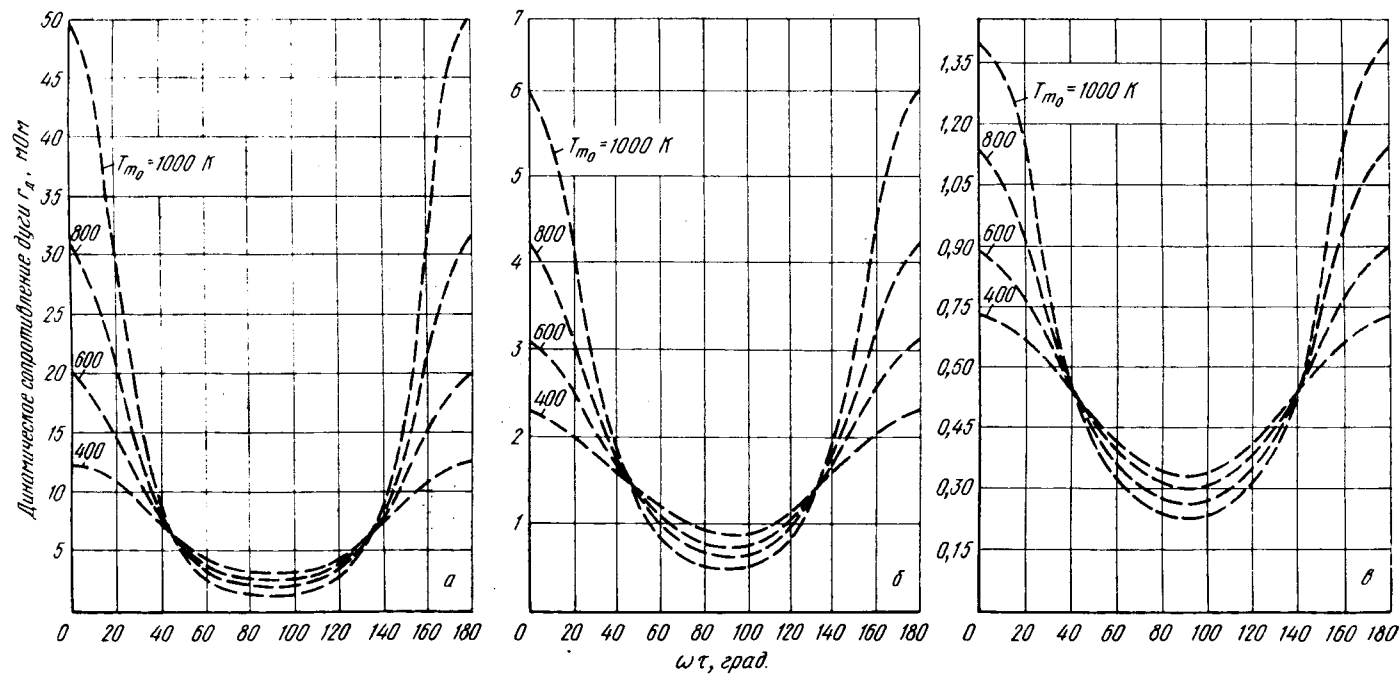


Рис. 98. Кривые изменения динамического сопротивления дуги при различных уровнях и температурах, К:
a — 5000; *б* — 6000; *в* — 7000

для значений T_0 , равных 5000, 6000 и 7000 К. Они показывают, что при $T_0 = 5000$ К и $T_{0m} = 1000$ К ($K_{o.и.т} = 0,2$) максимальное сопротивление дуги больше минимального в 17 раз, а при $T_0 = 5000$ К и $T_{0m} = 400$ К ($K_{o.и.т} = 0,08$) всего в три раза. Для среднего же уровня температуры 7000 К при $T_{0m} = 1000$ К ($K_{o.и.т} = 0,14$) максимальное значение сопротивления больше минимального всего в 5,6 раза, а при $T_{0m} = 400$ К ($K_{o.и.т} = 0,057$) диапазон колебания сопротивления составляет всего 2,1.

Однако в приведенном виде уравнение динамического сопротивления неудобно для интегрирования. Поэтому ниже оно дается в упрощенном виде.

В дальнейшем примем следующие обозначения:

$$\frac{B}{T_0} = \alpha'; \quad \frac{T_{0m}}{T_0} = K_{o.и.т}; \quad \frac{A}{L} e^{\frac{B}{T_0}} = D \text{ и } \alpha' K_{o.и.т} D = \beta'. \quad (V-26)$$

При этих обозначениях показатель степени уравнения сопротивления получит следующий вид:

$$\frac{B}{T_0 - T_{0m} \cos 2\omega\tau} = \frac{B}{T_0} \frac{1}{1 - \frac{T_{0m}}{T_0} \cos 2\omega\tau} = \alpha' \frac{1}{1 - K_{o.и.т} \cos 2\omega\tau}. \quad (V-27)$$

Разложим выражение (V-27) в ряд:

$$\frac{1}{1 - K_{o.и.т} \cos 2\omega\tau} = 1 + K_{o.и.т} \cos 2\omega\tau + K_{o.и.т}^2 \cos^2 2\omega\tau + K_{o.и.т}^3 \cos^3 2\omega\tau + \dots \quad (V-28)$$

При $K_{o.и.т} \ll 1$ можно пренебречь членами выше 1-го порядка и положить

$$\frac{1}{1 + K_{o.и.т} \cos 2\omega\tau} \approx 1 + K_{o.и.т} \cos 2\omega\tau. \quad (V-29)$$

Исследование показывает, что погрешность при таком упрощении для небольшого диапазона изменений температуры лежит в допустимых пределах. Погрешности расчетов при замене функции (V-27) функцией (V-29) следующие:

$K_{o.и.т}$	0,40	0,30	0,25	0,20	0,18
Пределы погрешности, %	39,2—0,68	17,7—0,22	10,2—0,53	4,8—0,12	4,5—0,12

$K_{o.и.т}$	0,16	0,14	0,12	0,10
Пределы погрешности, %	3,44—0,10	2,55—0,08	2,5—0,07	1,22—0,05

Верхние пределы погрешности относятся к углу 10° , а нижние — к углу $80-90^\circ$. Как видим, при значениях $K_{o.и.т} \leq 0,2$ погрешности составляют $< 5\%$. Следовательно, при температуре порядка 5000—7000 К и амплитудах ее колебаний 400—500 К погрешность, обуслов-

ленная заменой функции (V-27) функцией (V-29), не будет превышать 5%.

Таким образом, в дальнейших расчетах для динамического сопротивления столба дуги примем уравнение

$$r_d = Ae^{\frac{B}{T_0 - T_{0m} \cos 2\omega\tau}} = Ae^{\frac{B}{T_0} \left(\frac{1}{1 - \frac{T_{0m}}{T_0} \cos 2\omega\tau} \right)} = Ae^{\frac{B}{T_0} \left(1 + \frac{T_{0m}}{T_0} \cos 2\omega\tau \right)}.$$

или

$$r_d = Ae^{\frac{B}{T_0}} e^{\frac{BT_{0m} \cos 2\omega\tau}{T_0^2}}. \quad (V-30)$$

С учетом принятых обозначений получим

$$r_d = Ae^{\alpha'} e^{\alpha' K_{0. \text{н.т.}} \cos 2\omega\tau}. \quad (V-31)$$

Этим уравнением будем пользоваться при анализе контура, содержащего дугу.

4. Контур с электрической дугой в однофазной печи

Контур мощной дуговой печи можно изобразить схемой, приведенной на рис. 99, содержащей активное и реактивное сопротивление контура подводящей сети r_k и x_k и активное сопротивление дугового промежутка r_d .

Составим для этого контура дифференциальное уравнение.

Примем приложенное к контуру напряжение синусоидальным. Так как контур содержит индуктивность, то приложенное напряжение будет опережать ток на некоторый угол; если совместить начало отсчета времени с моментом прохождения тока через нуль, то мгновенное значение приложенного к контуру напряжения будет

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (V-32)$$

где φ — угол сдвига фазы.

Падение напряжения в граничных областях дуги будем учитывать отдельно. По величине анод-катодное напряжение $u_{a.k}$ в пределах полупериода можно считать постоянным. Но при переходе от одного полупериода тока к другому оно меняет знак. Поэтому его можно представить в виде прямоугольной кривой, находящейся в фазе с током.

Как известно, прямоугольная кривая изображается рядом

$$\begin{aligned} u_{a.k} = & \frac{4}{\pi} U_{a.k} \left[\sin \omega t + \right. \\ & + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \\ & \left. + \dots + \frac{1}{n} \sin n\omega t \right]. \end{aligned} \quad (V-33)$$

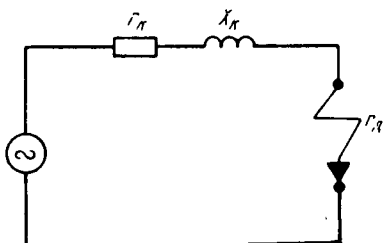


Рис. 99. Контур дуги с активным и реактивным сопротивлениями

Как видно, амплитуда третьей гармоники составляет 33, а пятой — 20% амплитуды основной гармоники. Для остальных гармоник это соотношение еще меньше. А так как само анод-катодное напряжение составляет не более 10—15% приложенного напряжения, то в уравнении (V-33) можно пренебречь высшими гармониками, т. е. положить

$$u_{a.к} = \frac{4}{\pi} U_{a.к} \sin \omega \tau, \quad (V-34)$$

или, обозначая

$$\frac{4}{\pi} U_{a.к} = CL_{к}, \quad (V-35)$$

положить

$$u_{a.к} = CL_{к} \sin \omega \tau. \quad (V-36)$$

Для всего контура приложенное внешнее напряжение должно быть равно сумме падений напряжений в подводящей части цепи u_r и u_L , в граничных областях разрядного промежутка $u_{a.к}$ и в столбе разряда u_c , т. е.

$$u = u_r + u_L + u_{a.к} + u_c; \quad (V-37)$$

так как

$$u_r = ir_{к}, \quad u_b = L_{к} \frac{di}{d\tau},$$

то уравнение (V-37) с учетом выражений (V-31) и (V-36) перепишем так:

$$U_m \sin(\omega \tau + \varphi) = ir_{к} + L_{к} \frac{di}{d\tau} + CL_{к} \sin \omega \tau + Aie^{\alpha'K} e^{\alpha'K \cos 2\omega \tau}. \quad (V-38)$$

Обычно в печных контурах активное сопротивление контура подводящей части цепи $r_{к}$ в несколько раз меньше реактивного сопротивления $x_{к}$. Поэтому в уравнении (V-38) можно пренебречь активным падением напряжения в короткой сети.

Тогда, принимая во внимание обозначения (V-26), уравнение (V-38) можно переписать:

$$\frac{di}{d\tau} + Die^{\alpha'K \cos 2\omega \tau} = \frac{U_m}{L_{к}} \sin(\omega \tau + \varphi) - C \sin \omega \tau. \quad (V-39)$$

Полагая

$$\frac{U_m}{L_{к}} \sin(\omega \tau + \varphi) - C \sin \omega \tau = U_n \sin(\omega \tau + \varphi_n), \quad (V-40)$$

получим дифференциальное уравнение цепи в окончательном виде:

$$\frac{di}{d\tau} + Die^{\alpha'K \cos 2\omega \tau} = U_n \sin(\omega \tau + \varphi_n). \quad (V-41)$$

При некоторых допущениях решение этого интеграла получается в виде ряда Фурье, содержащего нечетные гармоники. Коэффициенты их в значительной степени зависят как от среднего уровня температуры T_0 , так и от амплитуды ее колебания T_{0m} . Для иллюстрации

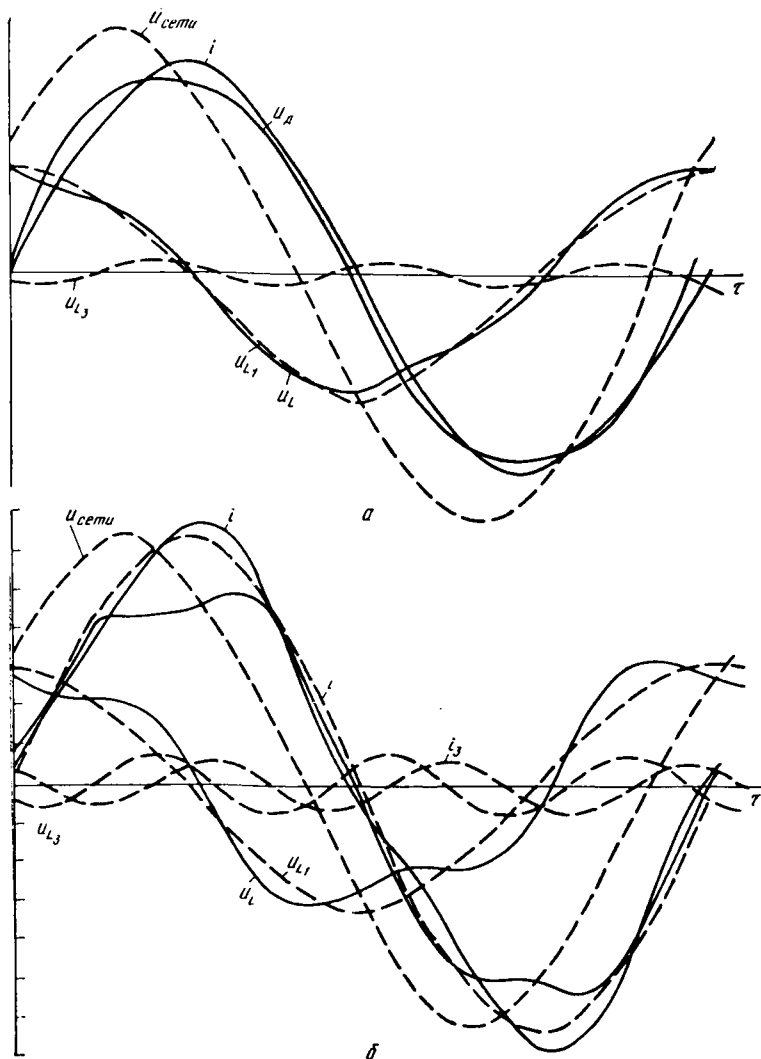


Рис. 100. Расчетные кривые силы тока и напряжения дуги:
 а — при $T_0 = 5000$ и $T_{0m} = 400$ К; б — при $T_0 = 5000$ и $T_{0m} = 2000$ К. (Цифры у обозначений на кривых — номера гармонических составляющих)

на рис. 100, а, б приведены результаты двух расчетов кривых на основании решения уравнения (V-41).

На рис. 100, а кривая силы тока искажена очень незначительно; амплитуды ее гармоник следующие: $I_{1m} = 22\ 100$ А; $I_{3m} = 500$ А; $I_{5m} = 26$ А. Сравнительно слабо искажены также кривые индуктивного напряжения короткой сети U_L и дуги. На рис. 100, б эти искажения гораздо больше. Амплитуды тока соответственно равны $I = 24700$ А; $I_{3m} = 2410$ А; $I_{5m} = 635$ А. Отсюда видно, что при высо-

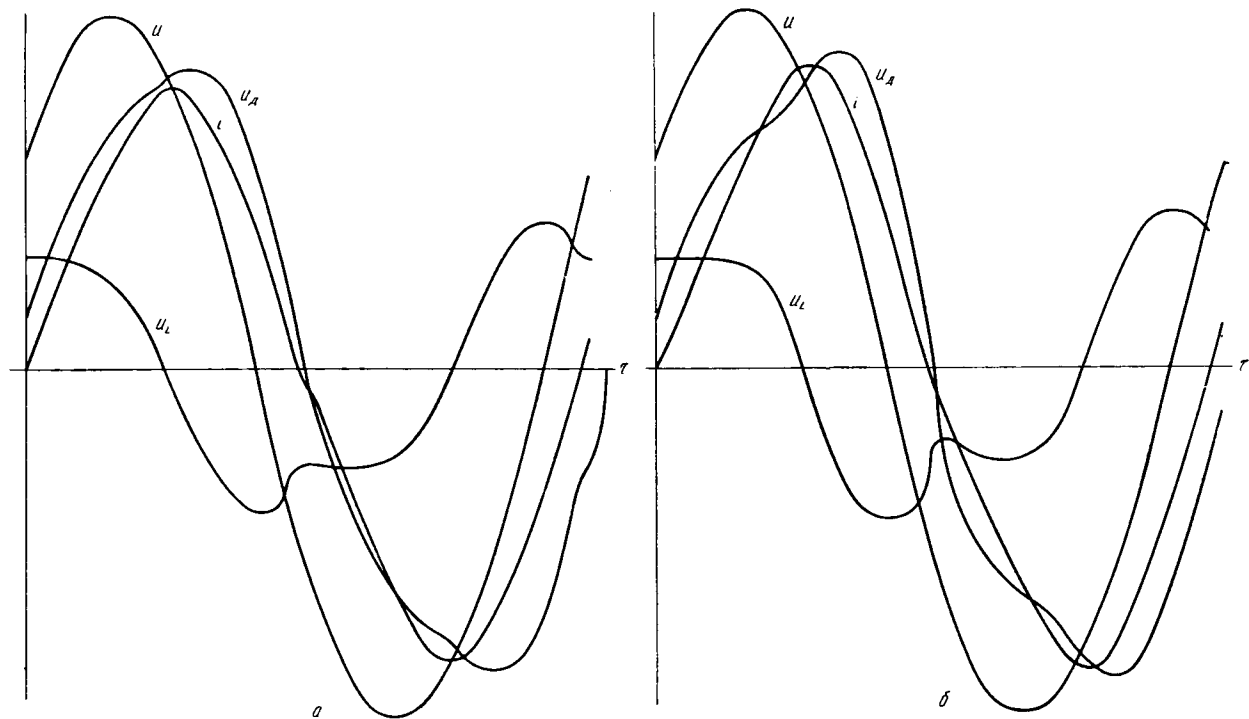


Рис. 101. Расчетные кривые силы тока и напряжения дуги

ких средних температурах и малых колебаниях режим горения дуги становится весьма устойчивым.

На рис. 101, а, б приведены результаты двух решений этого же уравнения методом «шаг за шагом». Здесь даны характеристики силы тока и напряжений сети, дуги и короткой сети. В обоих случаях эффективное сопротивление дуги принято равным 2,71 мОм, колебания сопротивления приняты для первого случая $r_{0m} = 0,542$ (рис. 101, а), а для второго $r_{0m} = 0,813$ мОм (рис. 101, б). Таким образом, даже небольшие колебания сопротивления дуги приводят к определенному искажению формы кривых силы тока и напряжения дуги.

Недостатком приведенного исследования надо считать допущения, сделанные при выводе основного уравнения контура, содержащего дугу. Главным из этих ограничений является постоянство геометрических размеров столба дуги. При изменении режима горения дуги длина и поперечное сечение дуги, конечно, меняются, и это изменение не учитывается уравнением (V-41). Но в целом и само уравнение, и его решение правильно отражают физический процесс горения дуги, так как в основном он определяется именно температурой.

Рассмотрим теперь процессы горения дуги в трехфазной системе. Это тем более важно, что подавляющее большинство наших печей являются трехфазными.

5. Контур с электрической дугой в трехфазной печи

В трехфазных печах дуги горят между торцами электродов и расплавом (или шлаком). Последний ограничен футеровкой с кожухом и электрически не связан с нулевой точкой трансформатора.

Таким образом, ванна печи, если отвлечься от шунтирующих токов, представляет собой трехфазную систему, соединенную в звезду без нулевого провода. Этот вид соединения налагает ограничение на систему токов печи: сумма мгновенных значений токов трех фаз (а, б, с) должна быть равна нулю:

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (V-42)$$

Токи отдельных фазных дуг оказываются связанными друг с другом. Ток одной дуги протекает через расплав к дугам соседних фаз. В ваннах печей предусматривают либо одну летку на все три фазы, либо по одной летке под каждой фазой. В первом случае под электродами предусмотрен общий тигель, основанием которого служит жидкий расплав. В таких ваннах ток дуги одной фазы переходит к другой через этот расплав.

По этому принципу работают сталеплавильные и ферросплавные печи и часть карбидных печей. Как будет показано ниже, для первых из них удельное сопротивление жидкого расплава мало. Поэтому для них сопротивлением расплава между двумя последовательно соединенными дугами можно пренебречь и считать, что фазные дуги непосредственно соединены одна с другой.

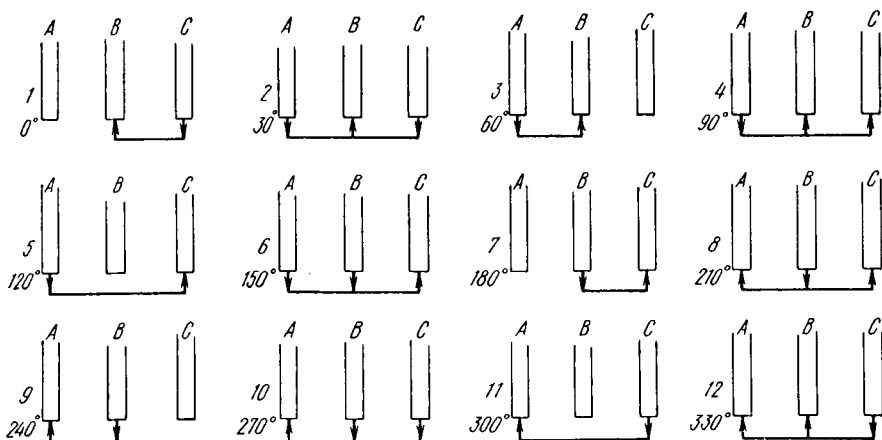


Рис. 102. Схема горения трехфазной дуги. 1—12 — моменты периода

Удельная электропроводность карбида кальция, даже при больших температурах, велика; кроме того, карбид характеризуется высокой вязкостью и механической прочностью. Между фазами образуются твердые перегородки. В этом случае между двумя последовательно соединенными дугами существует еще сопротивление и жидкого расплава, и твердых перегородок. Это сопротивление создает дополнительные условия для неустойчивого горения дуг.

На характер горения дуг влияет и форма ванны. В печах с круглыми симметричными ваннами электроды расположены симметрично, поэтому все три фазные дуги находятся в одинаковых условиях горения. В прямоугольных печах симметрия в ванне нарушена. Расстояние между крайними фазами вдвое больше, чем между средней и крайними, следовательно, при одновременном горении дуг двух крайних фаз сопротивление расплава, включенное между ними, еще больше, чем при горении дуг крайней и средней фаз.

На рис. 102 представлена картина горения дуги и пути прохождения токов для двенадцати моментов (выраженных в угловых градусах) одного периода. Из рисунка видно, что нарушение условий горения дуги под одним электродом отражается на горении дуг двух остальных фаз.

При проведении математического анализа ограничимся рассмотрением только симметричных печей при симметричном напряжении источника. Примем параметры подводящей сети также симметричными и пренебрежем сопротивлением расплава. При этих условиях контур печи можно заменить схемой замещения (рис. 103),

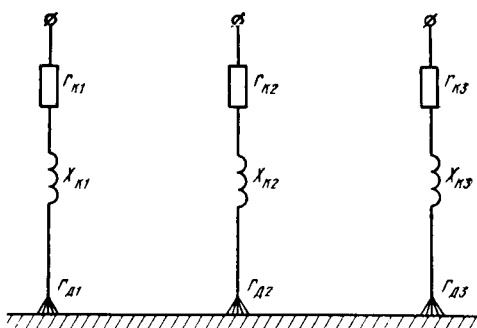


Рис. 103. Схема замещения трехфазной дуги

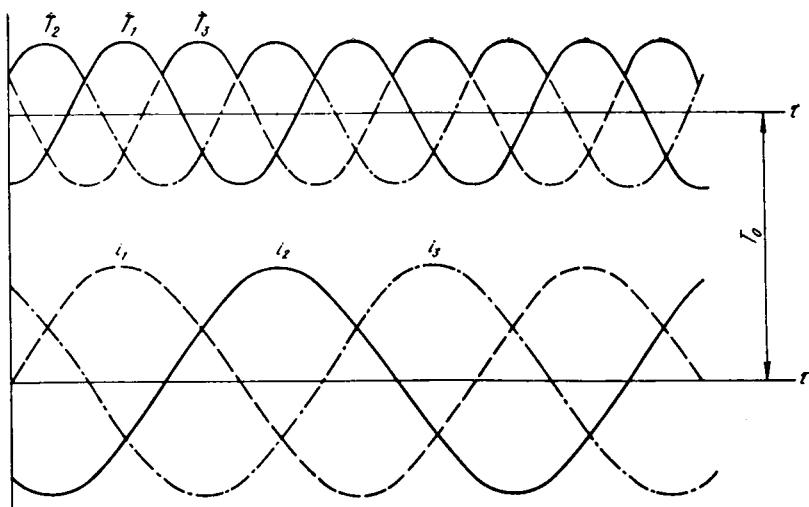


Рис. 104. Характеристики силы тока и температуры трехфазной дуги

в которой r_k и x_k — активное и реактивное сопротивление соответствующей фазы подводящей сети, r_d — сопротивление дуги.

Для математической записи температуры дуги мы приняли уравнение (V-24).

Так как в трехфазной системе токи смещены друг относительно друга на $1/3$ периода, то на такой же отрезок времени должны быть смещены и кривые изменения температуры. Поэтому для всех трех фаз можно записать:

$$\left. \begin{aligned} T_a &= T_0 + T_{0m} \cos 2\omega t, \\ T_b &= T_0 + T_{0m} \cos \left(2\omega t + \frac{4\pi}{3} \right), \\ T_c &= T_0 + T_{0m} \cos \left(2\omega t + \frac{8\pi}{3} \right). \end{aligned} \right\} \quad (V-43)$$

На рис. 104 построены совместные кривые тока и температур фаз. Из кривых видно, что в любой момент времени, когда температура в разрядном промежутке данной фазы снижается до минимума последовательно с этой фазой бывает присоединена другая фаза, характеризующаяся лучшими температурными условиями и лучшей проводимостью. Это, конечно, способствует возникновению тока в данной фазе.

Для каждой фазы симметричной трехфазной системы можно записать уравнения, аналогичные уравнению (V-38). После преобразований их можно привести к виду уравнений (V-41):

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_a}{d\tau} + Di_a e^{\alpha' K \cos 2\omega \tau} &= U_{na} \sin (\omega \tau + \varphi_n); \\ \frac{di_b}{d\tau} + Di_b e^{\alpha' K \cos 2\omega \tau} &= U_{nb} \sin (\omega \tau + \varphi_n - 120^\circ); \\ \frac{di_c}{d\tau} + Di_c e^{\alpha' K \cos 2\omega \tau} &= U_{nc} \sin (\omega \tau + \varphi_n - 240^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (V-44)$$

Во всех этих уравнениях приняты одни и те же постоянные, так как для симметричной печи условия горения дуги принимаем одинаковыми.

На эту систему уравнений налагается ограничение (V-42), т. е. равенство нулю суммы мгновенных значений токов. При заданных фазовых напряжениях и температурах эти три уравнения должны быть решены совместно. Но решить эту систему уравнений в общем виде еще труднее, чем уравнение (V-41) для однофазной дуги. Поэтому задачу следует решать для отдельных частных случаев.

6. Прямоугольная форма напряжения дуги в однофазной печи

Такая задача была рассмотрена при изучении устойчивости горения дуги. Но при этом мы пренебрегли активным сопротивлением контура. Рассмотрим сейчас эту задачу подробнее. Из существующих нескольких вариантов ниже приводится решение по Р. И. Караеву [14].

Пусть r_k и x_k — параметры контура (см. рис. 98). Примем напряжение источника синусоидальным:

$$u = U_m \sin(\omega\tau + \psi). \quad (V-45)$$

Обозначим отношение напряжения дуги к амплитуде приложенного напряжения через

$$\beta = u_d / U_m, \quad (V-46)$$

а отношение реактивного сопротивления контура к его активному сопротивлению через

$$\gamma = x_k / r_k. \quad (V-47)$$

Дифференциальное уравнение всей цепи запишем так:

$$U_m \sin(\omega\tau + \psi) = r_k i + L_k \frac{di}{d\tau} + u_d \quad (V-48)$$

В общем случае ток в цепи будет прерывистым. Он возникнет в момент, когда приложенное к цепи напряжение достигнет напряжения горения дуги, и исчезнет в момент, когда внешнее напряжение станет меньше напряжения горения дуги.

Примем начало отсчета времени совпадающим с моментом возникновения тока. Тогда интегралом дифференциального уравнения будет

$$i = \frac{U_m}{Z} \left\{ \left[\sin(\omega\tau + \psi - \varphi) - \frac{\beta}{\cos \varphi} \right] - \left[\sin(\psi - \varphi) - \frac{\beta}{\cos \varphi} \right] e^{-\frac{\omega\tau}{\gamma}} \right\}. \quad (V-49)$$

Продолжительность паузы тока $\Delta\omega\tau$ можно определить, положив в уравнении (V-49), что сила тока равна нулю; получаем уравнение для нахождения $\Delta\omega\tau$:

$$\sin(\psi - \varphi - \Delta\omega\tau) + \frac{\beta}{\cos \varphi} - \gamma \cos(\psi - \varphi) e^{\frac{\pi - \Delta\omega\tau}{\gamma}} = 0. \quad (V-50)$$

На рис. 105 приведено графическое решение этого уравнения. По оси абсцисс отложены значения γ , а по оси ординат $\Delta\omega\tau$. Кривые

построены для различных значений β , т. е. отношения напряжения горения дуги к амплитуде приложенного напряжения.

Из уравнения (V-49) можно получить начальную фазу напряжения источника при непрерывном горении дуги. Для этого надо положить ток равным нулю при $\omega t = \pi$. Тогда из уравнения (V-49) получим

$$\sin(\psi - \varphi) = -\frac{\beta}{\cos \varphi} \frac{1 - e^{-\frac{\pi}{\gamma}}}{1 + e^{-\frac{\pi}{\gamma}}}, \quad (V-51)$$

или

$$\psi = \varphi - \arcsin \left(\frac{\beta}{\cos \varphi} \operatorname{th} \frac{\pi}{2\gamma} \right). \quad (V-52)$$

Однако, так как

$$\beta = u_d / U_m, \quad (V-53)$$

то

$$\psi = \arcsin \beta. \quad (V-54)$$

Подставив значение ψ из выражения (V-54) в уравнение (V-52), получим предельное значение $\beta_{\text{пр}}$, при котором начинается непрерывное горение дуги

$$\beta_{\text{пр}} = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \left[1 + (1 + \gamma^2) \operatorname{th} \frac{\pi}{2\gamma} \right]^2}}. \quad (V-55)$$

Можно также вывести выражения для мощностей цепи.

При непрерывном режиме горения дуги полная активная мощность цепи выражается уравнением

$$P = \frac{U_m^2}{\pi Z} \left[\frac{\pi}{2} \cos \varphi - 2\beta \cos(\psi + \varphi) \right], \quad (V-56)$$

а полная мощность нагрузки

$$P_n = \frac{U_m^2 \beta}{\pi r_k} (2 \cos \psi - \pi \beta). \quad (V-57)$$

При режиме прерывистого горения дуги эти формулы усложняются:

$$P = \frac{U_m^2}{\pi Z} \left\{ \frac{\pi - \Delta \omega \tau}{2} \cos \varphi + \frac{1}{4} [\sin(2\psi + \varphi) - \sin(2\psi + \varphi - 2\Delta \omega \tau)] - \beta [\cos(\psi + \varphi) + \cos(\psi + \varphi - \Delta \omega \tau)] \right\}, \quad (V-58)$$

$$P_n = \frac{U_m \beta}{\pi r_k} [\cos \psi + \cos(\psi - \Delta \omega \tau) - \beta(\pi - \Delta \omega \tau)]. \quad (V-59)$$

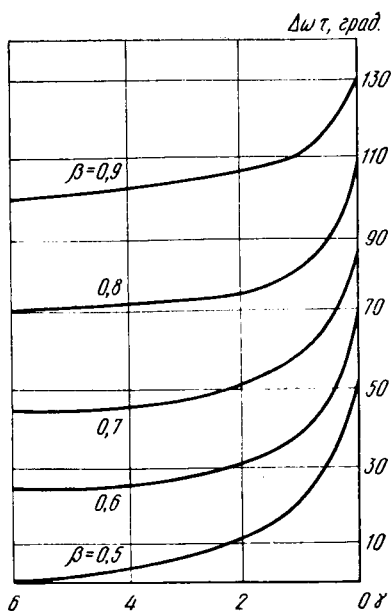


Рис. 105. Графическое решение уравнения (V-50)

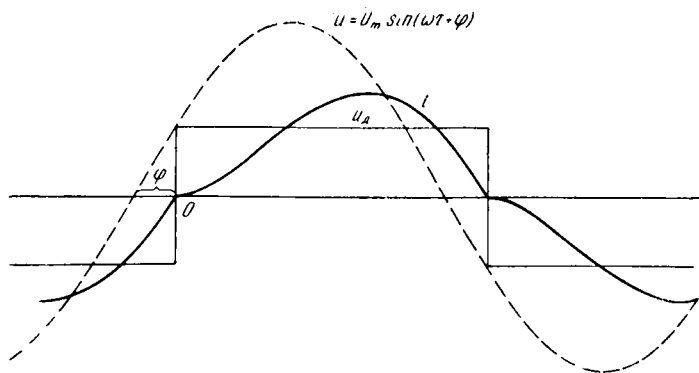


Рис. 106. Характеристики напряжения контура, напряжения дуги и силы тока при $\beta = 0,4$

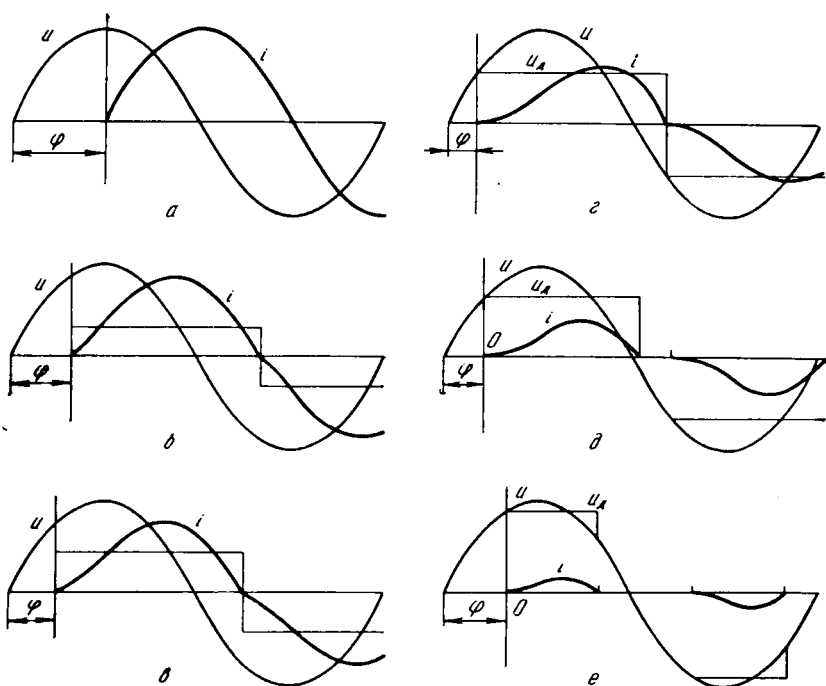


Рис. 107. Напряжение контура. Напряжение дуги и сила тока при различных значениях β и φ :

$a - \beta = 0$; $\varphi = 90^\circ$; $b - \beta = 0,32$; $\varphi = 60^\circ$; $c - \beta = 0,40$; $\varphi = 45^\circ$; $d - \beta = 0,54$; $\varphi = 32^\circ$; $e - \beta = 0,66$; $\varphi = 41^\circ$; $f - \beta = 0,87$; $\varphi = 60^\circ$

Для иллюстрации на рис. 106 приведены [43] кривые заданного синусоидального напряжения контура, прямоугольного напряжения дуги и тока. Кривые даны для случая, когда ток дуги искажен, но горение дуги протекает без перерывов. На рис. 107 приведено шесть диаграмм того же контура при различных значениях β и φ . Эти диа-

граммы показывают, что при изменении β от 0 до 0,870 форма кривой силы тока меняется в широких пределах и за определенным значением β ток дуги приобретает прерывистый характер.

7. Прямоугольная форма напряжения дуги в трехфазной печи

При выводе формул для трехфазной печи воспользуемся рядами Эйлера—Фурье, так как результаты решения в виде рядов лучше поддаются анализу. Подробное решение как для однофазной, так и для трехфазной дуговых печей с применением рядов при прямоугольной форме кривой напряжения дуги было дано С. И. Тельным [37].

Примем напряжение источника синусоидальным и симметричным:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= U_m \sin \omega \tau; \\ u_b &= U_m \sin (\omega \tau - 120^\circ); \\ u_c &= U_m \sin (\omega \tau - 240^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (\text{V-60})$$

Примем подводящую сеть печи также симметричной, т. е. положим

$$\left. \begin{aligned} r_{ka} &= r_{kb} = r_{kc} = r_k; \\ x_{ka} &= x_{kb} = x_{kc} = x_k. \end{aligned} \right\} \quad (\text{V-61})$$

Полагаем также, что напряжение дуги по всем трем фазам имеет прямоугольную форму и одинаковые амплитуды.

Для первой фазы оно может быть выражено рядом

$$\begin{aligned} u_{д.а} &= \frac{4}{\pi} U \left[\sin (\omega \tau - x_0) + \frac{1}{3} \sin 3 (\omega \tau - x_0) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{5} \sin 5 (\omega \tau - x_0) + \dots \right], \end{aligned} \quad (\text{V-62})$$

где $\frac{4}{\pi} U$ — амплитуда основной гармоники кривой;

x_0 — ее начальная фаза.

Так как напряжения дуг второй и третьей фаз отстают на 120 и 240° от $u_{да}$, то для них получим

$$\left. \begin{aligned} u_{дб} &= \frac{4}{\pi} U \left[\sin (\omega \tau - x_0 - 120^\circ) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \sin 3 (\omega \tau - x_0 - 120^\circ) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{5} \sin 5 (\omega \tau - x_0 - 120^\circ) + \dots \right]; \\ u_{дс} &= \frac{4}{\pi} U \left[\sin (\omega \tau - x_0 - 240^\circ) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \sin 3 (\omega \tau - x_0 - 240^\circ) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{5} \sin 5 (\omega \tau - x_0 - 240^\circ) + \dots \right]. \end{aligned} \right\} \quad (\text{V-62'})$$

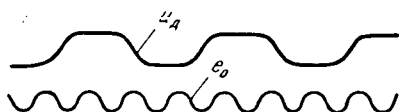


Рис. 108. Осциллограмма напряжения дуги и смещения нейтрали

Так как подина печи является непроводящей и сопротивление между нулевыми точками печи и трансформатора равно бесконечности, то соблюдается условие $i_a + i_b + i_c = 0$.

Напишем теперь уравнения для мгновенных значений напряжений всех трех фаз:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= r_k i_a + L_k \frac{di_a}{d\tau} + u_{da} + u_0; \\ u_b &= r_k i_b + L_k \frac{di_b}{d\tau} + u_{db} + u_0; \\ u_c &= r_k i_c + L_k \frac{di_c}{d\tau} + u_{dc} + u_0, \end{aligned} \right\} \quad (V-63)$$

где u_0 — мгновенное значение напряжения между нулевыми точками печи и источника (трансформатора).

Так как напряжения, токи и параметры системы симметричны, то решение уравнения (V-63) относительно u_0 дает:

$$u_0 = \frac{4}{\pi} U \left[\frac{1}{3} \sin 3(\omega\tau - x_0) + \frac{1}{9} \sin 9(\omega\tau - x_0) + \frac{1}{15} \sin 15(\omega\tau - x_0) + \dots \right]. \quad (V-64)$$

Как известно, если в трехфазной линейной системе фазные напряжения синусоидальны, то при соединении системы в звезду потенциалы нулевых точек источника и приемника совпадают. В данном случае, несмотря на симметричность напряжений и токов фаз, напряжение между нулевыми точками трансформатора и печи имеет вполне определенную величину. Если кривая дуги прямоугольной формы, то и кривая смещения нейтрали также будет прямоугольной, но с утроенной по отношению к дуге частотой. Для иллюстрации на рис. 108 показана осциллограмма напряжения дуги и напряжения смещения нейтрали, снятая на сталеплавильной печи. Кривая напряжения дуги почти прямоугольная. Такую же форму, но при утроенной частоте, имеет кривая смещения нейтрали.

Подставив из уравнения (V-60) и (V-61) значения u_a , u_b , u_c , u_{da} , u_{db} , u_{dc} и u_0 в уравнение (V-63), получим уравнения токов. Так как токи всех трех фаз имеют одинаковую форму и сдвинуты одна относительно другой на одинаковый угол, то запишем и решим уравнение для одной фазы.

Из уравнений (V-62), (V-63) и (V-64) получим

$$r_k i + L_k \frac{di}{dt} = u - u_d - u_0 = U_m \sin \omega\tau - \frac{4}{\pi} U \left[\sin(\omega\tau - x_0) + \frac{1}{5} \sin 5(\omega\tau - x_0) + \frac{1}{7} \sin 7(\omega\tau - x_0) + \dots \right]. \quad (V-65)$$

Ток является периодической функцией времени, поэтому его можно выразить рядом Фурье. Так как сила тока и напряжение дуги совпадают по фазе, то уравнение силы тока запишем так:

$$i = I'_1 \sin(\omega\tau - x_0) + I''_2 \sin(2\omega\tau - x_0) + \dots + I'_1 \cos(\omega\tau - x_0) + I''_2 \cos(2\omega\tau - x_0) + \dots, \quad (\text{V-66})$$

где I'_n и I''_n — коэффициенты при синусоидальных и косинусоидальных составляющих гармониках тока.

Если взять производную тока, а затем в выражение (V-65) подставить значения i и $di/d\tau$, оно переписывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum_1^{\infty} (r_k I'_n - n\omega L_k I''_n) \sin n(\omega\tau - x_0) + \sum_1^{\infty} (r_k I''_n + \\ + n\omega L_k I'_n) \cos n(\omega\tau - x_0) = U_m \sin \omega\tau - \\ - \frac{4}{\pi} U \left[\sin(\omega\tau - x_0) + \frac{1}{5} \sin 5(\omega\tau - x_0) + \right. \\ \left. + \frac{1}{7} \sin 7(\omega\tau - x_0) + \dots \right] \end{aligned} \quad (\text{V-67})$$

Приравнявая друг другу коэффициенты при членах одинакового порядка, получим систему уравнений для определения неизвестных коэффициентов I'_n и I''_n .

Для основной гармоники ($n = 1$):

$$(r_k I'_1 - \omega L_k I''_1) \sin(\omega\tau - x_0) = \left(U_m \cos x_0 - \frac{4}{\pi} U \right) \sin(\omega\tau - x_0) \quad (\text{V-68})$$

или

$$\left. \begin{aligned} r_k I'_1 - \omega L_k I''_1 &= U_m \cos x_0 - \frac{4}{\pi} U; \\ r_k I''_1 + \omega L_k I'_1 &= U_m \sin x_0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{V-69})$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} I'_1 &= \frac{1}{r_k^2 + \omega^2 L_k^2} \left[r_k U_m \cos x_0 - \frac{4}{\pi} U r_k + \omega L_k U_m \sin x_0 \right]; \\ I''_1 &= \frac{1}{r_k^2 + \omega^2 L_k^2} \left[r_k U_m \sin x_0 - \frac{4}{\pi} U \omega L_k - \omega L_k U_m \cos x_0 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (\text{V-70})$$

Из (V-67) для нечетных гармоник и гармоник, кратных трем, имеем

$$\left. \begin{aligned} r_k I'_n - n\omega L_k I''_n &= 0 \\ \text{и} \\ r_k I''_n + n\omega L_k I'_n &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{V-71})$$

Так как n , ω , r_k и L_k — заданные конечные величины, то, чтобы удовлетворить условию (V-69), необходимо равенство соответствующих коэффициентов нулю.

Итак,

$$\left. \begin{aligned} I'_{2n} &= 0; & I''_{2n} &= 0; \\ I'_{3n} &= 0; & I''_{3n} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{V-72})$$

Для нечетных гармоник, не кратных трем ($n=5, 7, 11, 13, 17 \dots$), из уравнения (V-67) имеем:

$$\left. \begin{aligned} r_k I''_n - n\omega L_k I''_n &= -\frac{4}{\pi} \frac{U}{n}; \\ r_k I''_n + n\omega L_k I'_n &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{V-73})$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} I'_n &= -\frac{4}{\pi n} U \frac{r_k}{r_k^2 + n^2 \omega^2 L_k^2}; \\ I''_n &= \frac{4}{\pi n} U \frac{n\omega L_k}{r_k^2 + n^2 \omega^2 L_k^2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{V-74})$$

Подставив эти коэффициенты в уравнение (V-66) и выполнив ряд тригонометрических преобразований, получим уравнение силы тока в окончательном виде:

$$i = \frac{U_m}{\sqrt{r_k^2 + \omega^2 L_k^2}} \left\{ \sin(\omega\tau - \varphi_n) - \frac{4}{\pi} \beta \sin(\omega\tau - x_0 - \varphi_n) - \right. \\ \left. - \frac{4}{\pi} \beta \sqrt{1 + \gamma_n^2} \sum_{n=5, 7, 11 \dots} \frac{1}{n} \frac{1}{\sqrt{1 + \gamma_n^2}} \sin[n(\omega\tau - x_0) - \varphi_n] \right\}, \quad (\text{V-75})$$

где

$$\beta = \frac{u_n}{U_m}; \quad \gamma_n = \frac{n\omega L_k}{r_k}; \quad \varphi_n = \arctg \frac{n\omega L_k}{r_k}. \quad (\text{V-76})$$

Определим теперь угол сдвига тока по отношению к полному напряжению. Так как при $\omega\tau = x_0$ ток равен нулю, то, приравняв правую часть уравнения (V-75) нулю и решив его относительно x_0 , получим значение начальной фазы возникновения дуги:

$$x_0 = \varphi - \arcsin \frac{4}{\pi} \beta \left[\sin \varphi_n + \gamma_n \sqrt{1 + \gamma_n^2} \sum_{n=5, 7, 11 \dots} \frac{1}{1 + n^2 \gamma_n^2} \right], \quad (\text{V-77})$$

или же, обозначив одним коэффициентом

$$k_\gamma = \sin \varphi_n + \gamma_n \sqrt{1 + \gamma_n^2} \sum_{n=5, 7, 11 \dots} \frac{1}{1 + n^2 \gamma_n^2}, \quad (\text{V-78})$$

получим

$$x_0 = \varphi_n - \arcsin \frac{4}{\pi} \beta k_n. \quad (\text{V-79})$$

Уравнение тока (V-75) можно представить в более симметричном виде, если его основную гармонику выразить одним слагаемым

$$i = \sum_{n=1, 5, 7, 11, \dots} I_{m.n} \sin [n (\omega \tau - x_0) - \varphi_n]. \quad (\text{V-80})$$

Тогда амплитуда первой гармоники тока будет

$$I_{m1} = \frac{U_m}{\sqrt{r_{\kappa.з}^2 + \omega^2 L_{\kappa.з}^2}} k_1, \quad (\text{V-81})$$

где

$$k_1 = \sqrt{1 + \left(\frac{4}{\pi} \beta\right)^2 - 2 \frac{4}{\pi} \beta \cos x_0}. \quad (\text{V-82})$$

Так как первый множитель представляет амплитуду тока короткого замыкания

$$I_{m_{\kappa.з}} = \frac{U_m}{\sqrt{r_{\kappa.з}^2 + \omega^2 L_{\kappa.з}^2}}, \quad (\text{V-83})$$

то амплитуду первой гармоники тока можно записать

$$I_{m1} = I_{m_{\kappa.з}} k_1. \quad (\text{V-84})$$

Для амплитуд высших гармоник тока имеем:

$$I_{mn} = \frac{U_m}{\sqrt{r_{\kappa.з}^2 + \omega^2 L_{\kappa.з}^2}} k_n; \quad (\text{V-85})$$

$$k_n = - \frac{4}{\pi} \beta \frac{1}{n} \frac{\sqrt{1 + \gamma_n^2}}{\sqrt{1 + n^2 \gamma_n^2}}, \quad (\text{V-86})$$

или, выразив I_{mn} через амплитуду тока короткого замыкания, получим

$$I_{mn} = I_{m_{\kappa.з}} k_n. \quad (\text{V-87})$$

Если взять производную тока по времени, то можно получить индуктивное падение напряжения в подводящей сети:

$$\begin{aligned} u_L &= L_{\kappa.з} \frac{di}{d\tau} = \\ &= I_{m_{\kappa.з}} \omega L_{\kappa.з} \sum n k_n \cos [n (\omega \tau - x_0) - \varphi_n]. \end{aligned} \quad (\text{V-88})$$

На рис. 109 приведены кривые тока и напряжений для одной фазы дуги, согласно данным С. И. Тельного. Мы видим, что форма кривой силы тока в основном определяется амплитудой основной гармоники.

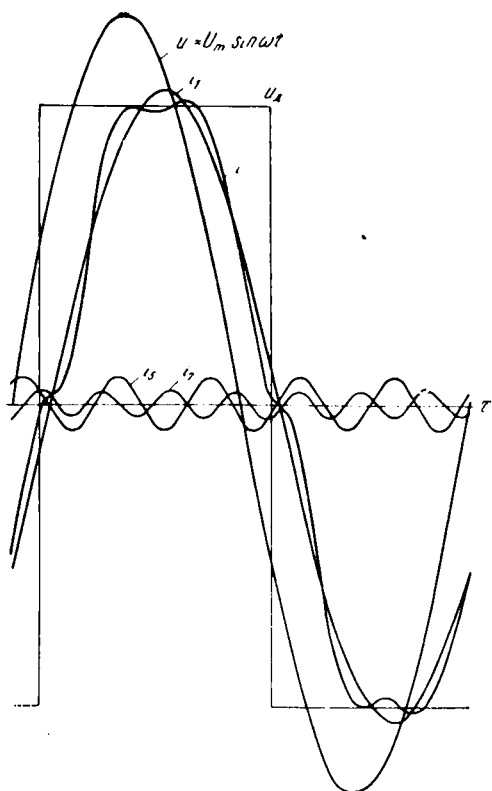


Рис. 109. Характеристика силы тока и напряжения одной фазы трехфазной дуги [37]

Коэффициенты амплитуды высших гармоник i_5 , i_7 по отношению к основной составляют незначительную величину; например, при $\gamma_n = 4$ и $\beta = 0,6$ равны для k_5 , k_7 и k_{11} соответственно 8,8; 4,55 и 2%. Эффективное значение силы тока, определенное по формуле

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + \dots}, \quad (\text{V-89})$$

отличается от эффективного значения тока первой гармоники всего на 0,5%.

Однако высшие гармоники существенно влияют на форму кривой падения напряжения в соответствии с индуктивностью подводящей сети. Для приведенного примера коэффициенты амплитуды u_L составляют для k_5 , k_7 , k_{11} , k_{13} и т. д. соответственно 44, 31, 22, 15%. Эффективное значение кривой u_L отличается от эффективного значения первой гармоники на 9%.

8. Трапецидальная форма напряжения дуги в трехфазной печи

Мы видели, что форма кривой напряжения дуги характеризуется большим разнообразием. Прямоугольная форма является одним частным и, пожалуй, теоретическим случаем. Ближе к истине представление о том, что повышение напряжения на разрядном промежутке происходит с некоторой конечной скоростью, а не мгновенно. Поэтому трапецидальная форма кривой напряжения дуги встречается чаще, чем прямоугольная. Кроме того, прямоугольник можно рассматривать как частный случай трапеции.

Итак, примем, что напряжение дуги меняется по закону равнобокой трапеции. Совместим начало отсчета времени с началом кривых напряжения дуги и силы тока.

Уравнение тока кривой, имеющей форму равнобокой трапеции, записывается так:

$$f(\omega, \tau) = \frac{4}{\pi} \frac{a}{\alpha} \left(\sin \alpha \sin \omega \tau + \frac{1}{3^2} \sin 3\alpha \sin 3\omega \tau + \dots + \frac{1}{n^2} \sin n\alpha \sin n\omega \tau + \dots \right), \quad (\text{V-90})$$

где a — высота трапеций;

α — угол наклона боковой стороны.

Поэтому уравнения напряжения дуг всех фаз примут вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{да} &= \frac{4}{\pi\alpha} U \left[\sin \alpha \sin (\omega\tau - x_0) + \right. \\ &+ \frac{1}{3^2} \sin 3\alpha \sin 3 (\omega\tau - x_0) + \dots + \\ &+ \left. \frac{1}{n^2} \sin n\alpha \sin n (\omega\tau - x_0) + \dots \right]; \\ u_{дб} &+ \frac{4}{\pi\alpha} U \left[\sin \alpha \sin (\omega\tau - x_0 - 120^\circ) + \right. \\ &+ \frac{1}{3^2} \sin 3\alpha \sin 3 (\omega\tau - x_0 - 120^\circ) + \dots + \\ &+ \left. \frac{1}{n^2} \sin n\alpha \sin n (\omega\tau - x_0 - 120^\circ) + \dots \right], \\ u_{дс} &= \frac{4}{\pi\alpha} U \left[\sin \alpha \sin (\omega\tau - x_0 - 240^\circ) + \right. \\ &+ \frac{1}{3^2} \sin 3\alpha \sin 3 (\omega\tau - x_0 - 240^\circ) + \dots + \\ &+ \left. \frac{1}{n^2} \sin n\alpha \sin n (\omega\tau - x_0 - 240^\circ) + \dots \right]. \end{aligned} \right\} \quad (V-91)$$

Уравнения фазных напряжений для всех трех фаз запишутся так же, как и раньше (V-63). После подстановки в эти уравнения новых значений и решения их относительно напряжения смещения нейтрали для последнего выражения получим:

$$u_0 = \frac{4}{\pi\alpha} U \left[\frac{1}{3^2} \sin 3\alpha \sin 3\omega\tau + \frac{1}{9^2} \sin 9\alpha \sin 9\omega\tau + \right. \\ \left. + \frac{1}{15^2} \sin 15\alpha \sin 15\omega\tau + \dots \right]. \quad (V-92)$$

Подставив значения u , u_d и u_0 для одной фазы цепи, получим:

$$r_{к.з} i + L_{к.з} \frac{di}{d\tau} = U_m \sin \omega\tau - \frac{4}{\pi\alpha} U \left[\sin \alpha \sin (\omega\tau - x_0) + \right. \\ + \frac{1}{5^2} \sin 5\alpha \sin 5 (\omega\tau - x_0) + \frac{1}{7^2} \sin 7\alpha \sin 7 (\omega\tau - x_0) + \dots + \\ \left. + \frac{1}{n^2} \sin n\alpha \sin n (\omega\tau - x_0) + \dots \right]. \quad (V-93)$$

Так же как в предыдущем случае, ток можно представить в виде ряда по формуле (V-67):

$$i = \sum_{n=1}^{n=\infty} I'_n \sin n (\omega\tau - x_0) + \sum_{n=1}^{n=\infty} I''_n \cos n (\omega\tau - x_0). \quad (V-94)$$

Приравнявая друг другу гармоники одинакового порядка, найдем амплитуды гармоник токов. Опуская промежуточные выкладки, запишем окончательное выражение для силы тока:

$$i = \frac{U_m}{\sqrt{r_2 + \omega^2 L_{к.з}^2}} \left\{ \sin(\omega\tau - x_0) - \frac{4}{\pi\alpha} \beta \sin \alpha \sin(\omega\tau - x_0 - \varphi) - \right. \\ \left. - \frac{4}{\pi\alpha \cos \varphi} \beta \sum_{n=5, 7, 11, \dots} \frac{\sin n\alpha}{n^2} \cos \varphi_n \sin[n(\omega\tau - x_0) - \varphi_n] \right\}. \quad (V-95)$$

Исходя из того, что при $\omega\tau = x_0$ ток в цепи равен нулю, можем найти и начальную фазу напряжения:

$$x_0 = \varphi - \arcsin \frac{4}{\pi} \beta \left[\sin \varphi \frac{\sin \alpha}{\alpha} + \gamma_n \sqrt{1 + \gamma^2} \sum_{n=5, 7, 11, \dots} \frac{\sin n\alpha}{n\alpha} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{1 - n^2 \gamma_n^2} \right]. \quad (V-96)$$

Сравнение формул (V-95) и (V-96) с соответствующими формулами контура при прямоугольной форме напряжения дуги показывает, что трапецидальная форма благоприятнее для горения дуги, чем прямоугольная, так как высшие гармоники в кривой тока играют меньшую роль. Это и понятно, так как прямоугольная кривая является предельным случаем трапеции и амплитуды высших гармоник выражены в ней довольно сильно, например, $I_{5m} = 0,2 I_{1m}$, $I_{7m} = 0,143 I_{1m}$ и т. д.

Другим предельным случаем трапецидальной кривой является треугольная кривая. Она выражается уравнением

$$f(\omega\tau) = \frac{8}{\pi^2} a \left(\sin \omega\tau - \frac{1}{9} \sin 3\omega\tau + \right. \\ \left. + \frac{1}{25} \sin 5\omega\tau + \dots + \frac{(-1)^{\frac{k-1}{2}}}{k^2} \sin k\omega\tau - \dots \right). \quad (V-97)$$

Из этого видно, что амплитуда пятой гармоники составляет всего 4% амплитуды первой, а седьмая гармоника имеет отрицательный знак.

Наконец заслуживает внимания трапецидальная кривая с углом наклона α рис. 110. В уравнении такой кривой все гармоники, кратные трем, равны нулю ($\sin 3\alpha = 0$) и кривая выражается рядом

$$f(\omega\tau) = \frac{6\sqrt{3}}{\pi^2} a \left(\sin \alpha - \frac{1}{25} \sin 5\alpha + \right. \\ \left. + \frac{1}{49} \sin 7\alpha + \frac{1}{121} \sin 11\alpha + \dots \right) \quad (V-98)$$

Как видим, она незначительно отступает от синусоиды.

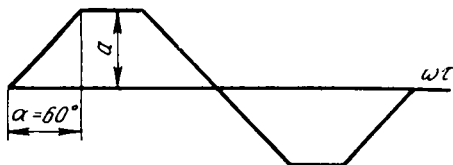


Рис. 110. Равнобокая трапеция

9. Смещение нейтрали печи

Вернемся теперь к рассмотрению нейтрали печи. Мы видели, что при несинусоидальной форме напряжения дуги нейтральная точка печи смещена относительно нейтральной точки трансформатора. Это вытекает из общего свойства многофазных систем, соединенных по схеме звезда—звезда без нулевого провода. В n -фазной системе при приложенном несинусоидальном напряжении в линейном напряжении выпадают гармоники, кратные n . Эти последние действуют между нулевыми точками, так как смещение напряжений, действующих в фазах на угол $2\pi/n$, приводит не к уравниванию, а к согласованию. Поэтому эти гармоники действуют между нулевыми точками как параллельно соединенные э. д. с.

При появлении нулевого провода в последнем протекает n -кратный ток n -кратных гармоник.

При горении дуги высшие гармоники генерируются в самом приемнике, так как мы приняли напряжение источника синусоидальным. Так как гармоники дуги, кратные трем, во всех трех фазах оказываются согласованными по фазе, то они проявляются на замыкающем участке контура — между нейтральными точками источника и приемника.

Иногда возникает вопрос — существует ли связь между формой кривой напряжения дуги и формой кривой смещения нейтрали? При положительном ответе можно было бы установить эту связь и, пользуясь ею, по форме напряжения смещения нейтрали судить о форме напряжения дуги.

К сожалению, ответ на этот вопрос получается отрицательный. Действительно, при симметрии напряжения источника и параметров контура наличие в напряжении смещения нейтрали гармоник, кратных трем, показывает только то, что в напряжении дуги эти гармоники присутствуют. *Но дуга может гореть, а гармоники, кратные трем, при этом могут отсутствовать.* Если, например, напряжение дуги имеет форму синусоиды или трапеции, угол наклона которой составляет 60° , то она не будет содержать гармоник, кратных трем. Но это не значит, конечно, что в это время в печи не горит дуга.

Форма кривой смещения нейтрали, имеющей трехкратную частоту, подобна форме кривых фазных напряжений только в том случае, если последние изображаются бесконечным рядом нечетных гармоник.

Например, при прямоугольной форме кривых фазных напряжений кривая смещения нейтрали будет также прямоугольной, но с утроенной частотой. В этом случае, зная форму кривой фазных напряжений, можно записать уравнение кривой смещения нейтрали.

Обратная задача неопределенна. Если задана кривая смещения нейтрали, нельзя судить о форме основной кривой, так как две кривые с одинаковыми гармониками, кратными трем, могут содержать гармоники, не кратные трем и с различными амплитудами.

Наконец, если основная кривая содержит конечное число гармоник и среди них кратные трем, то между кривой основного напряже-

ния и кривой смещения нейтрали не будет никакого сходства. Например, если основная кривая содержит первую, третью, пятую гармоники, то смещение нейтрали будет иметь форму синусоиды трехкратной частоты, в то время как основная кривая, в зависимости от амплитуд первой и пятой гармоник, может быть сильно искажена.

Еще больше задача осложняется при асимметрии э. д. с. источника или асимметрии параметров приемника. В этом случае форма кривой напряжения смещения нулевой точки еще меньше будет зависеть от формы напряжений на дугах, горящих в отдельных фазах.

Мы так подробно остановились на этом вопросе потому, что иногда делается попытка по форме кривой смещения нейтрали или по третьей гармонике делать какие-либо заключения о характере горения дуги в печи или о форме ее кривой. Из вышеизложенного следует, что при одной и той же величине и форме напряжения смещения нейтрали режимы работы печи могут колебаться в весьма широких пределах и, наоборот, при одинаковых режимах нагрузки напряжение u_0 и его третья гармоника могут быть различными.

Поэтому в зависимости от напряжения смещения нейтрали u_0 нельзя ни выбирать, ни поддерживать какой-либо режим, а тем более рациональный режим работы печи.

Глава VI

Методика измерений на мощных электрических печах

1. Введение

Электрические измерения на мощных руднотермических печах вообще представляют сложную задачу с точки зрения как методики, так и техники выполнения измерений.

При измерениях приходится иметь дело со значительными токами, достигающими нескольких десятков и даже сотен тысяч ампер и характеризующимися сильными магнитными полями.

Эти обстоятельства требуют подбора специальной аппаратуры и определенного расположения проводов измерительных контуров. Кроме того, из-за высоких температур около колошника требуется особая защита проводов от теплового действия колошника.

Так как остановки печей связаны с нарушением технологического процесса плавки и уменьшением выпуска продукции, то измерительные приборы надо подключать либо при работе печи, что крайне затруднительно и нежелательно, либо при остановках печи в весьма ограниченные сроки, диктуемые производственными соображениями.

Все это требует строго разработанных планов и схем включения, так как иногда вследствие незначительных неполадок в схемах приходится откладывать проведение измерения.

Перед осциллографированием необходимо проверить суммарные параметры коротких сетей печи, чтобы удостовериться в правильности данных, по которым строятся нагрузочные характеристики.

2. Измерение напряжения

Как известно, в цепи постоянного тока разность потенциалов, или напряжение между какими-либо двумя точками цепи, определяется как интеграл вектора напряженности электрического поля между этими точками и не зависит от пути интегрирования

$$U_{ab} = \int_a^b \vec{E} d\vec{l}. \quad (\text{VI-1})$$

В цепи переменного тока понятие о разности потенциалов и напряжений теряет свой смысл, так как значение интеграла (VI-1) зависит от пути интегрирования. Поэтому применительно к цепям переменного тока следует говорить о напряжении между какими-либо точками вдоль определенного заданного пути. Таким образом, форма измерительного контура влияет на результаты измерения и показания приборов.

Для мощных электрических печей э. д. с., индуцируемые сильными магнитными полями в подводящих проводах, становятся соизмеримыми с падением напряжения в них и могут вносить значительные погрешности в результаты измерений. Рассмотрим типичный для электропечей случай, когда две шины расположены параллельно друг другу (рис. 111, а).

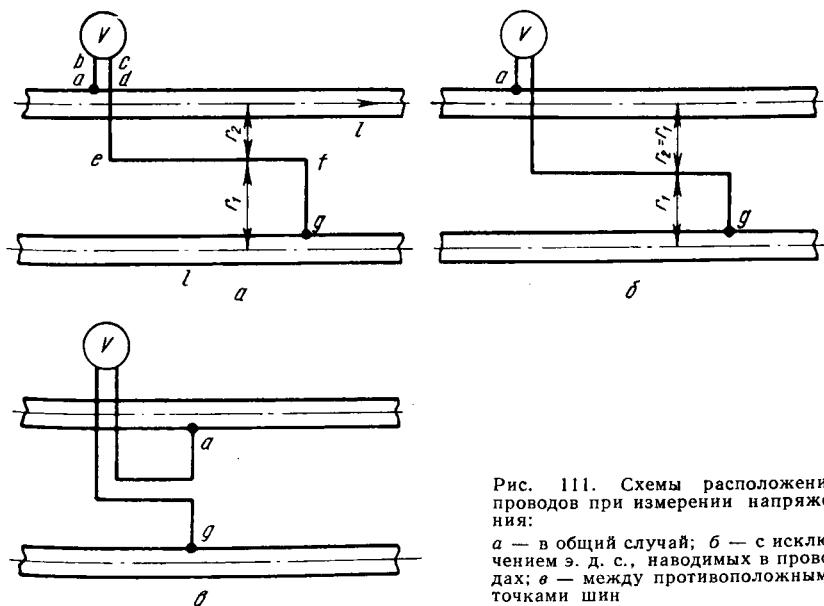


Рис. 111. Схемы расположения проводов при измерении напряжения:
а — в общем случае; б — с исключением э. д. с., наводимых в проводах; в — между противоположными точками шин

Пусть требуется определить напряжение между точками a и g , находящимися на расстоянии l друг от друга. Измерительный контур составлен из проводов $abcdefg$. Провода ab и cd идут бифилярно и перпендикулярно шинам, провод fg расположен также перпендикулярно шинам: поэтому магнитный поток токов i , протекающих в шинах на этих участках, не будет индуцировать э. д. с.: с участком же ef сцепляются магнитные потоки обеих шин.

Полный поток сцепления будет

$$\Phi = \int_{r_1}^{\infty} \frac{2i}{r} l dr - \int_{r_2}^{\infty} \frac{2i}{r} l dr = \int_{r_1}^{r_2} 2li \frac{dr}{r} = 2li \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (\text{VI-2})$$

При синусоидальном изменении тока

$$i = I_m \sin \omega t \quad (\text{VI-3})$$

магнитный поток также будет меняться синусоидально:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (\text{VI-4})$$

и индуцированная в контуре э. д. с.

$$e_u = - \frac{d\Phi}{dt} = - \omega \Phi_m \cos \omega t. \quad (\text{VI-5})$$

Эффективное значение э. д. с. будет

$$E_u = \omega \Phi_m = 2\omega l I \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (\text{VI-6})$$

На длине провода в 1 м наведенная э. д. с. составит около 0,7 В, т. е. станет сравнимой с падением напряжения, обусловленным током, протекающим в подводящей сети. Для рассматриваемого случая наведенная э. д. с. будет равна нулю при условии $r_2 = r_1$.

Поэтому для снижения погрешности при измерении напряжения между различными точками шины соединительные провода нужно расположить согласно схеме на рис. 111, б. При измерении напряжения между противоположными точками надо оба соединительных провода вести перпендикулярно шинам, а за пределами шин бифилярно (рис. 111, в). При трехфазной системе токи в прямом и обратном проводах не равны, поэтому погрешность измерений, обусловленная наличием посторонних магнитных полей, значительно больше.

При измерении падения напряжения вдоль одной шины погрешность от посторонних магнитных полей будет значительно снижена, если измерительный шлейф расположить так, чтобы посторонние магнитные поля целиком проходили внутри шлейфа и не пересекали его. При осциллографировании необходимо регистрировать линейные напряжения на клеммах трансформатора, фазовые напряжения на каждой фазе печи, падение напряжения от клемм трансформатора до входа электрода в ванну, т. е. до поверхности колошника и, наконец, напряжение фазы внутри ванны, т. е. от поверхности колошника до нулевой точки печи.

Строго говоря, для получения картины распределения напряжений в печи необходимо снять все двенадцать осциллограмм одновре-

менно. Это особенно важно для несимметричных печей. Однако, если не требуется определение соотношения между напряжениями отдельных фаз, можно ограничиться и меньшим числом осциллограмм.

Линейные напряжения можно регистрировать двумя способами. При одном из них измерительный контур можно присоединить непосредственно к шинам короткой сети у низковольтных зажимов трансформатора и соединительные провода вести бифилярно к осциллографу; при втором — тот же контур можно присоединить непосредственно к клеммам вольтметра, установленного на пульте управления печи. Форма кривых напряжения в обоих случаях будет одинакова.

Дело в том, что измерительный контур между шинами двух фаз при обоих способах остается неизменным, а проводка от шин к измерительным приборам проложена бифилярно и, следовательно, посторонние по отношению к измерительному контуру магнитные поля не могут влиять на результаты измерения.

При измерении остальных напряжений сети расположение измерительных контуров может повлиять на результаты измерения.

В большинстве случаев в печных трансформаторах обмотка низкого напряжения соединена звездой и ее нулевая точка изолирована. В ванне печи все три фазовые дуги горят над общим подом. Этот же под служит нулевой точкой для токов шихтовой проводимости по звезде. В работах ряда авторов доказывается, что в несимметричных печах нулевая точка фазовых напряжений смещена относительно нулевой точки симметричной звезды фазовых э. д. с. трансформатора. Чем больше асимметрия печи и, следовательно, трансформаторный перенос мощности с фазы на фазу, тем больше смещение нулевой точки нагрузки.

Для определения фазового напряжения или напряжения дуги необходимо присоединить измерительный провод к нулевой точке нагрузки, а в некоторых случаях к действительному нулю нагрузки. В таком случае погрешности измерения уменьшаются, но чаще всего действительная нулевая точка находится внутри печи и для непосредственного экспериментирования недоступна. Однако, так как кожух ванны обычно наглухо заземлен, то при этом в качестве нулевой точки нагрузки можно использовать точку заземления кожуха. Это, конечно, искажает результаты измерения. Однако при осциллографировании задача, в основном, заключается в выявлении формы кривой падения напряжения, а возможное смещение между нулевой точкой нагрузки и потенциалом кожуха по величине мало и, по-видимому, существенно не влияет на форму кривой.

Таким образом, при измерении фазового напряжения один провод измерительного контура следует присоединить к шинам короткой сети зажима трансформатора, а второй провод — к заземлению кожуха ванны.

Весьма важной частью исследования печей является определение падения напряжения вдоль короткой сети от зажима трансформатора до колошника и падения напряжения от поверхности колошника до нулевой точки ванны.

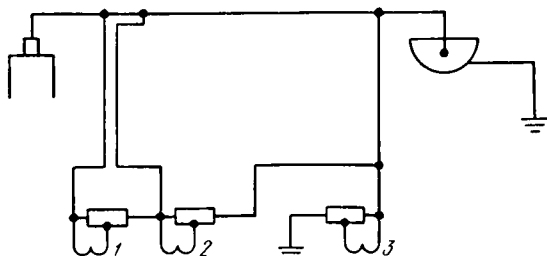


Рис. 112. Схема подключения вибраторов осциллографа к одной фазе печи:

1 — вибратор тока; 2 — вибратор напряжения короткой сети; 3 — вибратор напряжения дуги

Для этих измерений в измерительную схему приходится вводить дополнительный провод. Один конец этого провода подводят к осциллографу, а другой — в ряде испытаний присоединяют к контактной плите электрододержателя. Чтобы приблизить измерительный контур к поверхности колошника, свободный конец провода можно подвести

непосредственно к поверхности электрода у самого входа его в шихту. На рис. 112 приведена общая схема включения вибратора осциллографа для одной фазы печи. Остановимся теперь на расположении проводов измерительных контуров. Как было сказано выше, при измерении токов методом падения напряжения для исключения из контура индуктированных э. д. с. приходится соблюдать принцип бифилярности во всем контуре, включая и участок шины, на котором измеряется плотность тока.

При измерении напряжений к расположению измерительного контура предъявляются два противоречивых требования:

1. Так как в рассматриваемом случае необходимо учесть не только активное, но и индуктивное падения напряжения на рассматриваемом участке, то контур необходимо расположить так, чтобы он охватывал весь магнитный поток, сцепленный с этим участком.

2. Вместе с тем измерительный контур не должен охватывать посторонние потоки, не сцепленные с данным участком.

Для соблюдения первого условия необходимо, чтобы измерительный контур был достаточно широк и свободен от бифилярных участков. Измерительный контур должен быть настолько удален от измеряемого участка, чтобы основная часть потока, сцепленного с исследуемым участком, пронизывала контур и вне последнего не оставалась бы существенная часть потока.

При одновременной работе нескольких печей соблюдение этого условия обычно приводит к нарушению второго условия, так как при удалении от одной печи измерительный контур приближается к соседней работающей печи и с ним сцепляется часть магнитного потока этой печи.

Для выполнения второго условия необходимо располагать измерительную проводку в плоскости, параллельной магнитным силовым линиям. Это обычно достигается расположением проводов перпендикулярно оси шин.

Чтобы удостовериться в правильном охвате потока, сцепленного с испытуемым участком, после установки и наладки приборов измерительный контур расширяют до тех пор, пока не убеждаются, что дальнейшее увеличение контура не влияет на показания приборов.

3. Измерение силы тока

Специфические конструктивные особенности коротких сетей и сильные магнитные поля заставляют отказываться от обычных приборов для измерений и искать измерители силы тока специальной конструкции.

Такой измеритель (токомер) должен удовлетворять ряду условий:

1) поскольку часть короткой сети состоит из параллельных шин, расположенных близко друг к другу, размеры измерителя должны быть такие, чтобы можно было охватить им каждую шину в отдельности;

2) измеритель должен обеспечить правильное суммирование токов, измеренных в отдельных параллельных шинах;

3) ввиду того, что вокруг короткой сети существуют большие магнитные поля, измеритель должен быть свободен от влияния посторонних магнитных полей;

4) в электротермических печах кривая силы тока в той или иной степени отличается от синусоидальной формы, поэтому токомер должен не только правильно определять эффективное значение тока сети, но и записывать кривую мгновенных значений тока;

5) токомер должен быть разъемным, так как введение его в шины в расщелку невозможно.

Из существующих методов измерения силы тока могут быть использованы магнитный пояс (пояс Роговского), разъемный трансформатор тока с ферромагнитным сердечником и метод определения тока по его плотности на поверхности токопровода.

Измерение тока при помощи магнитного пояса

Магнитный пояс представляет собой гибкий сердечник из изоляционного материала (кожа, резина) небольшого сечения. На сердечник намотана обмотка из тонкого изолированного провода.

Работа магнитного пояса основана на законе полного тока. Если охватить магнитным поясом проводник с током, так чтобы его концы были совмещены друг с другом, то ток, охватываемый поясом, будет равен линейному замкнутому интегралу вектора напряженности магнитного поля, возбуждаемому током:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = i. \quad (\text{VI-7})$$

Электродвижущая сила, индуцируемая магнитным потоком в каждом витке пояса, будет

$$e_1 = - \frac{d\Phi}{d\tau} = - \frac{d}{d\tau} (\mu_n \bar{S}_n \vec{H}), \quad (\text{VI-8})$$

где μ_n — магнитная проницаемость материала пояса;
 $\bar{S}_n$ — сечение пояса.

Если обмотка наложена на пояс с равномерной плотностью витков на 1 м, то э. д. с., индуцированная во всем замкнутом контуре пояса, будет

$$e = \oint e_1 w_1 dl = \oint \frac{d}{d\tau} (\mu_n \bar{S}_n \bar{H}) w_1 dl. \quad (\text{VI-9})$$

Вынесем постоянные и распространим интегрирование на напряженность магнитного поля вдоль всего замкнутого контура вокруг проводника:

$$e = - \mu_n S_n w_1 \frac{d}{d\tau} \oint H \cos \alpha dl. \quad (\text{VI-10})$$

Так как интеграл равен полному току, охватываемому поясом, т. е.

$$e = - \mu_n S_n w_1 \frac{di}{d\tau}, \quad (\text{VI-11})$$

то э. д. с., индуцированная в поясе, пропорциональна производной измеряемого тока, а коэффициент пропорциональности является взаимоиндуктивностью M между проводником с измеряемым током и магнитным поясом:

$$M = \mu_n S_n w_1. \quad (\text{VI-12})$$

Если измеряемый ток синусоидален, то и э. д. с., индуцированная в поясе, также будет синусоидальной, и по эффективному значению э. д. с. пояса можно определить эффективное значение тока (в комплексной форме):

$$\bar{I} = j \frac{\bar{E}}{\omega M}. \quad (\text{VI-13})$$

Из приведенной формулы видно, что э. д. с. пояса должна быть измерена при отсутствии в нем тока, так как при протекании тока появляется падение напряжения в сопротивлении пояса. Так как э. д. с. пояса невелика, то при отсутствии тока ее можно измерить только компенсационным методом. В условиях печных установок применение этого метода измерения неприемлемо.

Как станет ясно ниже, э. д. с. магнитного пояса в производственных условиях лучше всего измерять при помощи лампового прибора.

В случае несинусоидального тока магнитный пояс дает значительные искажения. Действительно эффективное значение э. д. с. пояса при наличии высших гармоник:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}, \quad (\text{VI-14})$$

где E_n — n -я гармоника э. д. с.;

$$E_n = \omega_n M I_n = n \omega M I_n, \quad (\text{VI-15})$$

где I_n — n -я гармоника тока.

Выразив значения E_n через силу тока, для э. д. с. получим

$$E = \omega M \sqrt{I_1^2 + 4I_2^2 + 9I_3^2 + \dots + n^2 I_n^2}, \quad (\text{VI-16})$$

Эффективное значение несинусоидального тока равно:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}. \quad (\text{VI-17})$$

Следовательно, э. д. с. пояса измеряет величину, превышающую эффективное значение тока:

$$E = \omega M \sqrt{I_1^2 + 4I_2^2 + 9I_3^2 + \dots + n^2 I_n^2} > \omega MI. \quad (\text{VI-18})$$

Ошибка измерения силы тока оказывается тем больше, чем выше порядок гармоник тока.

Однако, как показали Л. Р. Нейман и Н. А. Голубинская, эффективное значение тока в первичном контуре можно получить путем измерения тока в поясе при условии

$$S = \frac{r_2}{\omega L_2} \leq 0,2, \quad (\text{VI-19})$$

где r_2 и ωL_2 — активное и реактивное сопротивления замкнутой цепи магнитного пояса. К оценке этой погрешности мы вернемся при рассмотрении лампового прибора.

Измерение тока при помощи трансформатора тока с разъемным сердечником

Трансформаторы тока с разъемным стальным сердечником давно уже применяют в измерительной технике. Однако, так же как и воздушным трансформаторам тока, модификацией которых являются магнитные пояса, им свойственны существенные недостатки. Основной из них — влияние на результаты измерения внешних магнитных полей и высших гармоник при несинусоидальности измеряемого тока.

Л. Р. Нейман и Н. А. Голубинская разработали общие геометрические условия распределения обмоток трансформатора тока, при которых исключается влияние внешних магнитных полей на результаты измерения. Форма обмоток должна быть такова, чтобы суммарное сцепление внешнего потока с обмоткой было равно нулю (рис. 113). Для эллиптического трансформатора это условие сводится к уравнению

$$M = 2\mu h w \ln \frac{n_2 + m_2}{n_1 + m_1}, \quad (\text{VI-20})$$

где h — высота трансформатора;
 n и m — размеры большой и малой полуосей эллипсов обмоток.
 В соответствии с этим сечение обмоток должно представлять собой площадь, ограниченную конфокальными эллипсами.

Для круглого трансформатора (рис. 114) эллипсы вырождаются в окружности и уравнение (VI-20) принимает вид

$$M = 2\mu h w \ln \frac{R}{r}. \quad (\text{VI-21})$$

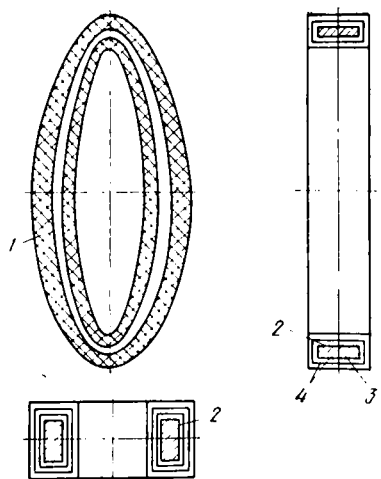


Рис. 113. Форма обмоток трансформатора тока, исключающая влияние внешних полей:

1 — сечение обмотки; 2 — провода обмотки; 3 — сердечник; 4 — прокладки

Такие трансформаторы тока можно выполнить и с сердечниками из магнитного материала, однако необходимым условием является постоянство магнитной проницаемости $\mu = \text{const}$.

В качестве сердечников в этом случае используют прессованные материалы из порошкообразного железа с различными наполнителями. При изменении напряженности поля в достаточно широких

пределах магнитная проницаемость этих сердечников изменяется незначительно. Трансформаторы с такими сердечниками характеризуются небольшими размерами и удобны для охвата отдельных шин подводящей сети.

Измерение силы тока методом падения напряжения

Этот метод основан на измерении плотности тока на поверхности проводника. Сущность его заключается в следующем. К шине А, по которой протекает измеряемый ток (рис. 115), припаивают изолированные провода в точках *a* и *b*. От точки *a* провода протягивают вдоль шины до точки *b* (участок *ab'*), и затем оба провода бифилярно ведут к измерительному прибору. Электродвижущие силы, индуцируемые потоком сцепления на участке шины *ab* и на участке изолированного провода *a'b'*, компенсируют друг друга, так как эти участки параллельны и в измерительном контуре направлены про-

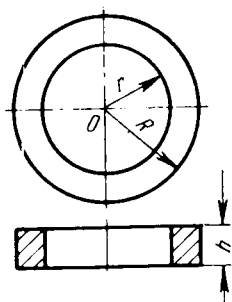


Рис. 114. Трансформатор тока кругового сечения

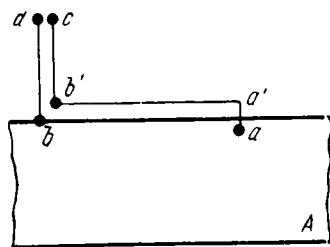


Рис. 115. Схема измерения плотности тока методом падения напряжения

тивоположно. Э. д. с., действующая в контуре $dbaa'b'c$, будет равна падению напряжения вдоль шины:

$$e = \delta_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}} l_{\text{ш}}, \quad (\text{VI-22})$$

где $\delta_{\text{ш}}$ — плотность тока в шине;

$\rho_{\text{ш}}$ — удельное сопротивление шины;

$l_{\text{ш}}$ — длина шины.

Если измерить эту э. д. с. компенсационным методом, то, зная длину и удельное сопротивление шины, можно найти плотность тока:

$$\delta_{\text{ш}} = e / \rho_{\text{ш}} l_{\text{ш}}. \quad (\text{VI-23})$$

Если известен закон распределения плотности тока по сечению шины, то можно получить представление и о полном токе, протекающем через шину. Однако, как известно, в шинах подводящих сетей печей, вследствие эффекта близости, распределение тока как между шинами, так и по сечению каждой шины в отдельности неравномерно, поэтому определить абсолютную величину силы тока по его плотности затруднительно. Эти недостатки делают данный метод непригодным для эксплуатационных измерений больших токов в печных контурах, но он вполне оправдывает себя при снятии формы кривой тока. Для этого достаточно припаять к шине короткой сети изолированный провод и вести его бифилярно к измерительной схеме.

Расстояние между точками присоединения проводов обычно берется ~ 10 см. В печах мощностью 7—10 мВА максимальное значение номинального тока при номинальной нагрузке составляет ~ 50 кА. Так как сечение шин на фазу обычно принимают равным 24 000 мм², а шины изготавливаются из меди, то падение напряжения в измерительном контуре составляет около 3—4 мВ.

Регулировать силу тока в цепи до допустимых для вибратора пределов следует по потенциометрической схеме.

При снятии кривых в цепи все-таки будет протекать небольшой ток и вносить искажения. Но токи, протекающие в этих схемах, настолько малы, что вносимыми искажениями, можно пренебречь.

Как было отмечено, зная закон распределения плотности тока по сечению проводника, можно определить и всю силу тока в шине. Но, во-первых, законы распределения тока по сечению сложны, а, во-вторых, в производственных условиях трудно выполнять как сами измерения, так и пересчеты.

При осциллографировании на мощных электропечах задача несколько облегчается тем, что весьма важно определить не абсолютную величину максимального и эффективного значения силы тока, а только форму кривых силы тока и напряжения.

Так как форма кривой мгновенных значений тока не зависит от распределения плотности тока по сечению шины, то можно регистрировать кривую плотности тока у поверхности шины по методу падения напряжения, а эффективное значение силы тока определять по осциллограммам, снятым при помощи магнитного пояса. В случае измерения полного тока всей печи при наличии трансформаторов тока со стороны низкого напряжения можно воспользоваться последними.

Кроме этого, эффективные значения токов рекомендуется контролировать путем регистрации и пересчета их со стороны высокого напряжения печного трансформатора, где всегда установлены трансформаторы тока. На рис. 139 приведена одновременная регистрация тока поясом (2) и плотности тока методом измерения падения напряжения (1).

Как и следовало ожидать, кривая 2 искажена больше, чем кривая 1.

4. Ламповый прибор для измерения напряжения, тока и мощности

Как было отмечено выше, магнитные пояса обладают рядом положительных свойств, но э. д. с., наводимая в поясе, мала и для ее измерения должны быть применены компенсационные методы. Особенно трудно использовать их при малых токах. Вместо компенсаторов для измерений э. д. с. в магнитном поясе можно применять приборы, позволяющие усилить э. д. с. На рис. 116 приведена принципиальная схема одного из таких приборов [24]. Этим прибором можно выполнять измерения без разрыва цепи тока, напряжения, активной и реактивной мощности; его пределы по току составляют 8; 16; 32 и 40 кА и по напряжению — 5; 10; 30; 60; 120 и 240 В.

Магнитный пояс T_1 разделен на две половины, и э. д. с. e_1 и e_2 через делитель подаются на сетки ламп Λ_1 и Λ_2 .

Через трансформатор напряжения T_2 и делитель r между катодами обеих ламп вводится напряжение u_1 , пропорциональное напряжению нагрузки.

Общее напряжение каждой лампы будет

$$u_{\Lambda_{1,2}} = u_1 \pm e_{1,2}. \quad (\text{VI-24})$$

Если принять следующие обозначения.

$u_{\text{ан}}$ — анодное напряжение;

$u_{\text{см}}$ — напряжение смещения на сетке;

$k_{\text{ус}}$ — коэффициент усиления, то напряжение настройки будет

$$u_0 = u_{\text{см}} + \frac{u_{\text{ан}}}{k_{\text{ус}}} \quad (\text{VI-25})$$

В качестве рабочего участка выбирают начальный участок характеристики лампы, форма которого близка к квадратичной кривой. Поэтому сила тока в лампах будет пропорциональна квадрату суммы этих напряжений

$$i_{1,2} = k(u_0 + u_1 + e_{1,2})^2. \quad (\text{VI-26})$$

Напряжение пояса пропорционально измеряемому току, а напряжение u_1 — измеряемому напряжению u :

$$e_1 = k_1 \frac{di}{d\tau} \text{ и } u_1 = k_2 u, \quad (\text{VI-27})$$

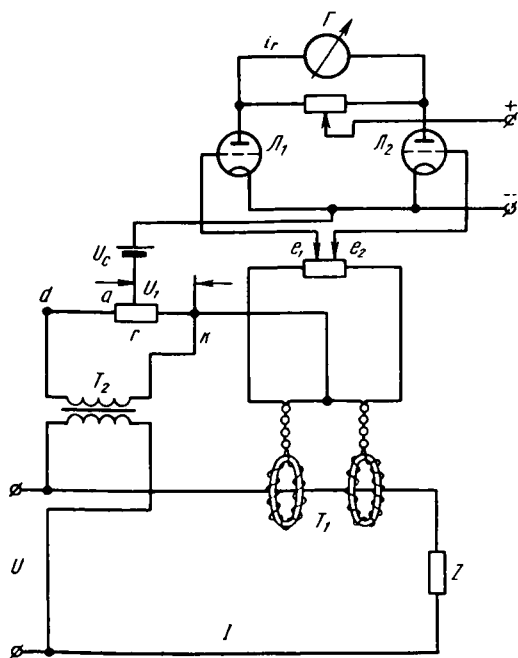


Рис. 116. Принципиальная схема лампового прибора

поэтому ток лампы можно переписать так:

$$i_{1,2} = k \left(u_0 \pm k_1 \frac{di}{d\tau} + k_2 u \right)^2. \quad (\text{VI-28})$$

Мгновенное значение тока в гальванометре будет

$$i_{\Gamma} = \frac{i_1 r_1 - i_2 r_2}{r_1 + r_2 + r_{\Gamma}}. \quad (\text{VI-29})$$

Примем $r_1 = r_2 = r$ и подставим в это уравнение значение токов i_1 и i_2 из уравнения (VI-25); после преобразования для тока в гальванометре получим

$$i_{\Gamma} = \frac{4rk k_1}{2r + r_{\Gamma}} \left[u_0 \frac{di}{d\tau} + k_2 u \frac{di}{d\tau} \right]. \quad (\text{VI-29a})$$

Проинтегрировав выражение (VI-29a) за период и разделив полученное выражение на длительность периода, получим среднее значение тока в гальванометре I_{Γ} :

$$I_{\Gamma} = \frac{4rk k_1}{T(2r + r_{\Gamma})} \left[\int_0^T u_0 \frac{di}{d\tau} d\tau + k_2 \int_0^T u \frac{di}{d\tau} d\tau \right]. \quad (\text{VI-30})$$

Так как первый интеграл за период равен нулю, то

$$I_{\Gamma} = c' \frac{1}{T} \int_0^T u \frac{di}{d\tau} d\tau, \quad (\text{VI-31})$$

где

$$c' = \frac{4rk k_1 k_2}{2r + r_{\Gamma}}. \quad (\text{VI-31a})$$

Если ток и напряжение сети синусоидальны, то среднее значение I_{Γ} из уравнения (VI-31) будет:

$$I_{\Gamma} = cIU \sin \varphi = cQ, \quad (\text{VI-32})$$

где

$$c = c' \omega. \quad (\text{VI-32a})$$

Таким образом, приведенная схема служит для измерения реактивной мощности приемника. Мы получили реактивную мощность, потому что пояс измеряет величину производной тока приемника, смещенную по отношению к самому току на $1/4$ периода. Для измерения активной мощности должна быть изменена на $1/4$ фаза либо тока, либо напряжения. Для этой цели авторы прибора использовали мостовую схему (рис. 117), смещающую на 90° напряжение u_1 , пропорциональное напряжению приемника u .

Таким образом, при присоединении к ламповому прибору зажимов a и b прибор измеряет мощность приемника, а при присоединении зажимов a и k — реактивную.

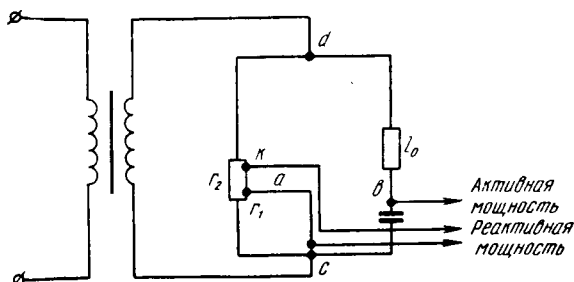


Рис. 117. Схема измерения активной и реактивной мощности

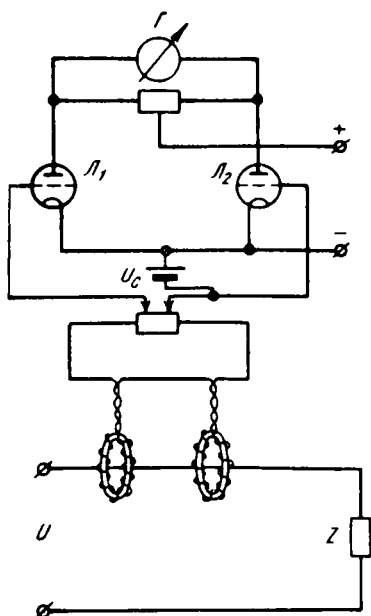


Рис. 118. Схема измерения тока

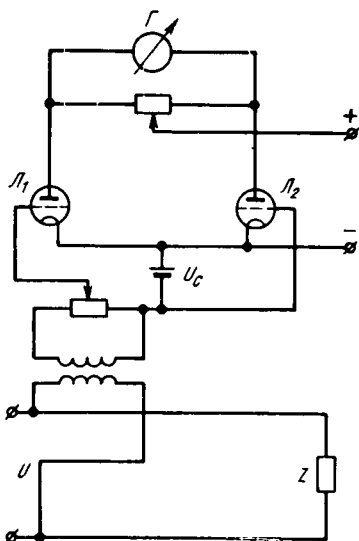


Рис. 119. Схема измерения напряжения

На рис. 118 приведена схема для измерения этим же прибором тока. В этом случае с прибора снимается напряжение, пропорциональное току приемника, и на сетку лампы Λ_1 подается постоянное отрицательное напряжение смещения, необходимое для установки прибора на нуль. При синусоидальном токе показание гальванометра будет пропорционально квадрату эффективного значения тока:

$$I_{\Gamma} = c_2 I^2, \quad (\text{VI-33})$$

где

$$c_2 = \frac{r k k_1^2 \omega^2}{2r + r_{\Gamma}}. \quad (\text{VI-33a})$$

При измерении напряжения (рис. 119) на сетку лампы подается только напряжение u_1 . В этом случае при синусоидальности измеряемого напряжения показание гальванометра будет пропорционально квадрату его эффективного значения:

$$I_{\Gamma} = c_3 u^2, \quad (\text{VI-34})$$

где

$$c_3 = \frac{r}{2r + r_{\Gamma}} k k_2^2. \quad (\text{VI-34a})$$

При измерении силы тока и напряжения шкала прибора получается квадратичной.

Погрешности описанного прибора определяются неидентичностью характеристик ламп, отступлением последних от квадратичной зависимости, колебаниями частоты и появлением высших гармоник в кривых силы тока и напряжения. Из всех этих факторов для цепей, содержащих дугу, наибольшее значение имеет последний. Особенно это важно при сильном искажении, когда амплитуды высших гармоник достигают значительных величин.

Как известно, мощность цепи несинусоидального тока при вертикальной симметрии кривых равна:

$$P = I_1 U_1 \cos \varphi_1 + I_3 U_3 \cos \varphi_3 + \dots + I_{2n-1} U_{2n-1} \cos \varphi_{2n-1}. \quad (\text{VI-35})$$

Рассматриваемый же прибор измеряет мощность:

$$P_n = m\omega \left[A_1 I_1 U_1 \cos \left(\varphi_1 + \theta_1 - \frac{\pi}{2} \right) + A_3 I_3 U_3 \cos \left(\varphi_3 + \theta_3 - \frac{\pi}{2} \right) + \dots \right]. \quad (\text{VI-36})$$

Необходимым условием точности измерения, очевидно, будет

$$\theta_n - \frac{\pi}{2} = 0 \text{ и } A_n = 1. \quad (\text{VI-37})$$

Отклонение от этих равенств обуславливает погрешности измерения. Как показывает анализ, при небольшом различии между всей мощностью и мощностью первой гармоники измерения прибора характеризуются достаточно высокой точностью и погрешность не превышает 2%.

Следует, однако, отметить, что вопрос регистрации формы кривых силы тока не снимается, так как этот прибор регистрирует эффективное значение производной тока. Поэтому для регистрации формы тока предпочтение должно быть отдано методу падения напряжения и применению специальных разъемных трансформаторов тока.

Следует еще остановиться на измерении мощности при малых коэффициентах мощности. Как известно, эта проблема возникает при определении параметров подводящей сети. Особенное значение этот вопрос имеет для мощных печей, у которых реактивное сопротивление значительно выше активного. В этом случае обычные ваттметры дают очень большие погрешности. Л. Р. Нейман разработал метод измерения этой мощности описанным ламповым прибором. Сущность его заключается в том, что в измерительной схеме реактивная составляющая измеряемого напряжения компенсируется вспомогательным реактивным напряжением. Благодаря этому на измерительный прибор подается только активное напряжение и, следовательно, измерение осуществляется при коэффициенте мощности, близком к единице. Благодаря использованию этого метода резко уменьшается погрешность измерения.

Глава VII

Электрическая дуга в дуговой сталеплавильной печи

1. Введение

Сталеплавильные печи работают в периодическом режиме — загрузка, расплавление, рафинирование и выпуск.

Основная часть электроэнергии расходуется в период расплавления шихты. В самом начале расплавления дуга горит между электродом и кусками холодной шихты. Поскольку температура шихты низкая, процесс горения дуги затруднителен.

По мере проплавления шихты электроды прорезают под собой колодцы, диаметр которых на 30—50% превышает диаметр самого электрода. Электроды углубляются в шихту, так как автоматические регуляторы, стремясь поддержать заданный электрический режим, опускают электроды. Расплавленный металл стекает вниз и накапливается на подине печи. После проплавления этой толщи шихты конец электрода выходит в крайнее положение и дуга начинает гореть на поверхности жидкого металла. Иногда после достижения электродами предельного положения их поднимают и прорезают вторую

серию колодцев. Благодаря этому ускоряется процесс расплавления шихты.

В период проплавления колодцев в межэлектродное пространство подают известь или известняк. Благодаря низкому потенциалу ионизации извести дуга стабилизируется и начинает гореть спокойно.

По мере проплавления шихты зеркало жидкого металла увеличивается и дальнейшее расплавление шихты происходит в результате лучеиспускания и теплового обмена между жидким металлом и кусками твердой шихты.

В конце расплавления куски твердой шихты остаются обычно на периферии ванны у откосов и приходится их сталкивать к жидкой поверхности.

К этому времени на поверхности расплава находится уже достаточно толстый слой шлака и дуга горит на шлаке или на поверхности металла внутри лунки, образующейся в шлаке благодаря аксиальному давлению столба дуги.

После образования колодцев металл расплавляется вблизи электродов в зоне расплавления излучения дуги. Чем больше длина дуги, тем больше и поверхность активного излучения и, следовательно, зона расплавления.

Так как с увеличением напряжения длина дуги увеличивается, то целесообразно в этот период вести работу печи на высших ступенях напряжения.

Процесс рафинирования распадается на два периода — окислительный и восстановительный. Оба они являются ответственными и с технологической точки зрения. Но расход энергии на технологические процессы в эти периоды незначителен и основное количество энергии, подводимой к печи в это время, затрачивается на покрытие тепловых потерь печи.

Условия горения дуги в эти периоды более благоприятны. Короткие замыкания между электродом и твердой шихтой из-за расплавления последней отсутствуют.

В течение всего времени рафинирования зеркало расплава закрыто достаточно толстым слоем шлака. Благодаря этому вокруг дуги создаются весьма благоприятные тепловые условия. Кроме того, газовую атмосферу дуги составляют пары металлов, характеризующихся низким потенциалом ионизации.

В это время нет надобности и в высоких напряжениях, так как необходимая мощность (небольшая по сравнению с периодом расплавления) должна передаваться металлу с большей равномерностью через шлак.

На рис. 120 представлен электрический режим 100-т дуговой печи [35]. Как видно из графика, весь процесс плавки длился 5 ч, а расплавление заняло 3 ч 30 мин. Максимальная мощность 25 000 кВт; расход энергии 50 000 кВт·ч. В период расплавления печь работала на ступени 417 В, а в конце периода на ступени 365 В. Окислительный период занял ~ 0,5 ч. На это время электроэнергию отключали и проводили продувку кислородом.

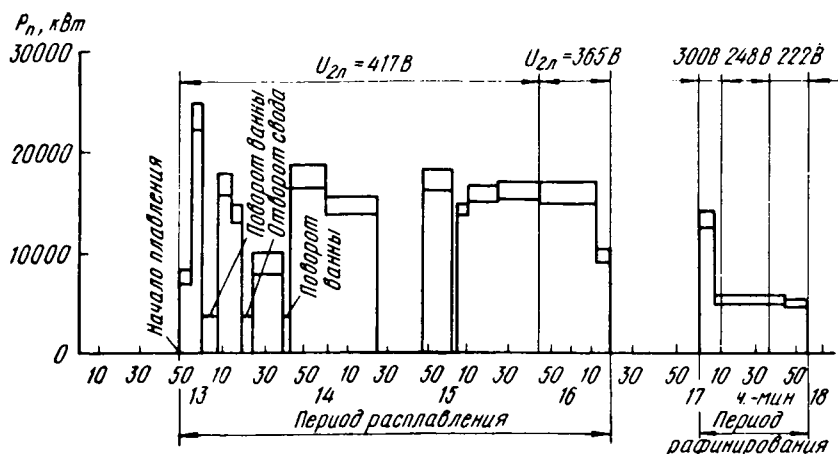


Рис. 120. Электрический режим плавки в 100-т сталеплавильной печи

После включения печи и скачивания шлака начался процесс рафинирования, длившийся ~ 1 ч. Расход энергии за этот период составил $5000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, напряжение снизилось с 300 до 222 В, а мощность с 15 000 до 6000 кВт. Несмотря на значительные колебания мощности и длительности отдельных периодов процесса, расплавление все же ведется всегда при высоких мощностях и основная доля подводимой энергии тратится именно на этот процесс.

2. Параметры современных дуговых сталеплавильных печей

Как известно, мощность и емкость современных сталеплавильных печей меняется в весьма широких пределах. В эксплуатации находятся печи емкостью от 0,5 до 360 т. В широком диапазоне изменяется также напряжение печей. Для маломощных печей применяют напряжение 100—300, а для наиболее мощных — 200—500 В.

Основными электрическими параметрами печи являются активные r_k и реактивные x_k сопротивления печного контура.

Для однотипных печей активные сопротивления подводящих сетей незначительно зависят от мощности печи. Это объясняется влиянием двух противоречивых факторов. Длина подводящих сетей малых печей сравнительно небольшая, но так как номинальные токи этих печей малы, то сечение шин подводящей сети выбирают меньшим. У более мощных печей длина подводящих сетей больше, но зато и сечение шин фазы также больше, так как выше номинальные токи. А так как сопротивление прямо пропорционально длине и обратно пропорционально поперечному сечению проводников, то изменение этих двух факторов не оказывает резкого влияния на результирующую величину сопротивления r_k .

Примерно в такой же зависимости от мощности находится и реактивное сопротивление x_k .

В табл. 5 приведены параметры нескольких действующих печей. Наряду с сопротивлениями r_k и x_k приведены также кажущиеся мощности, диапазоны напряжений на низкой стороне трансформаторов и номинальные токи.

При изменении конструкции подводящих сетей эти величины могут, конечно, резко изменяться. Так, например, при выполнении подводящих сетей в виде бифилярной проводки и соединении их в треугольник на электродах общее реактивное сопротивление значительно снижается. В последнее время создана рациональная конструкция подводящей сети, реактивное сопротивление которой снижено до 0,7—1,0 мОм. Но надо иметь в виду, что при таком соединении общий расход меди на подводящую сеть увеличивается на 16%.

ТАБЛИЦА 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Емкость, т	Мощность, кВт	Диапазон напряжений, В	Номинальный ток, кА	Сопротивление подводящей сети, мОм	
				активное	реактивное
3	1 500	90—200	4	1,5	10,7
5	2 000	110—200	4	1,4	6,7
7,5	2 500	115—200	8	1,6	4,3
10	3 500	120—200	9	0,8	4,0
15	5 000	120—240	12	1,0	4,6
20	6 000	120—200	17	0,78	3,2
30	8 000	120—260	18	0,8	3,5
40	15 000	120—300	29	1,04	3,0—3,3
100	25 000 *	131—417	34,6	0,58	3,15
200	45 000 *	164—592	44	0,65	4,65

* В настоящее время в мировой сталеплавильной практике значительное внимание уделяется повышению мощности трансформаторов. По исследованиям, проведенным в СССР, в ряде случаев экономически оправдано применение для печей емкостью 100 т трансформаторов мощностью до 40—44 МВА, а для печей емкостью 200 т — до 60—62 МВА и выше [28].

С увеличением емкости печи увеличивается не только ее мощность, но и размеры ванны, что влечет за собой повышение тепловой инерции внутри ванны. Поэтому ванны более мощных печей меньше подвержены колебаниям температурного режима внутри печи, чем ванны маломощных печей. При прочих равных условиях дуга в последних горит менее устойчиво.

Для изучения горения дуги сталеплавильной печи в наиболее неблагоприятных условиях рассмотрим результаты опытов, проведенных на печи емкостью 3 т.

Печь оборудована печным трансформатором мощностью 1500 кВА со встречным реактором мощностью 300 кВА. Схема соединения трансформаторов треугольник—звезда—треугольник; группа 11—12. Напряжение при холостом ходе 6300/210 составляет 121 В. Номинальный ток со стороны высокого напряжения составил 137/79,3,

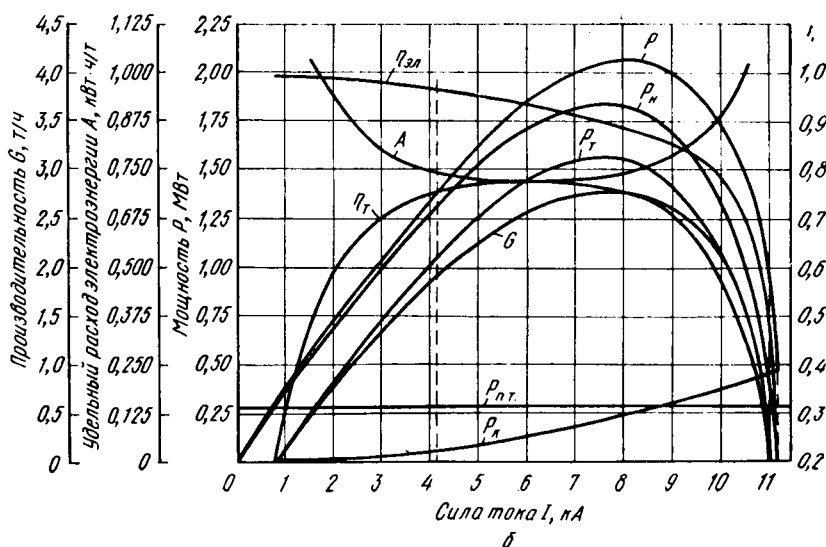
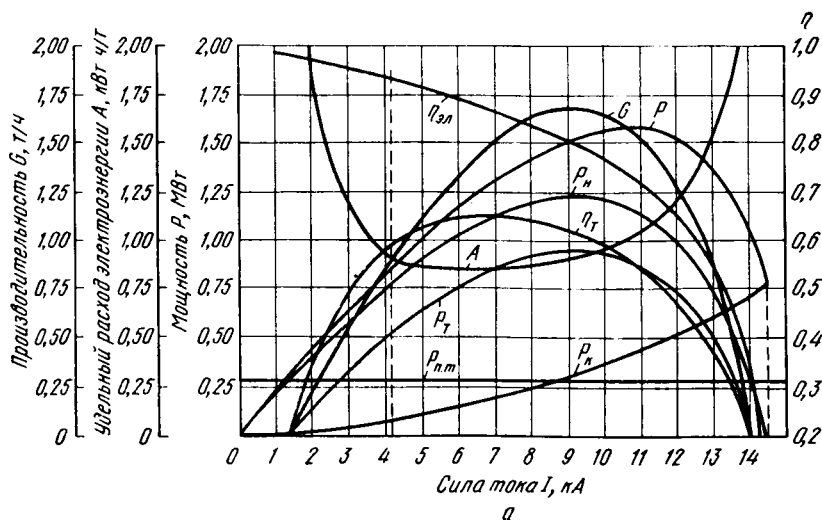


Рис. 121. Нагрузочные характеристики сталеплавильной печи при различном напряжении:

а — $U_0 = 121$ В; б — $U_0 = 210$ В.

а со стороны низкого напряжения — 4130 А. Печи работают с графитовыми электродами диаметром 300 мм.

Согласно измерениям, проведенным перед испытаниями, параметры контура испытуемой печи были следующие: $r_k = 1,11 \times 10^{-3}$ МОм; $x = 11,14 \cdot 10^{-3}$ МОм.

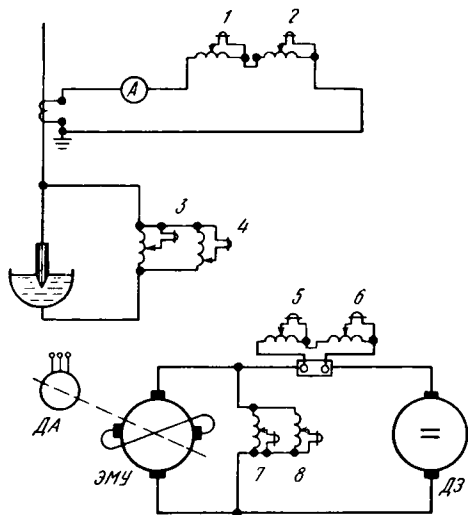


Рис. 122. Схема одной фазы регулятора печи: 1—8 — вибраторы; ДЭ — двигатель перемещения электродов; ЭМУ — электромашинный усилитель; ДА — двигатель асинхронный

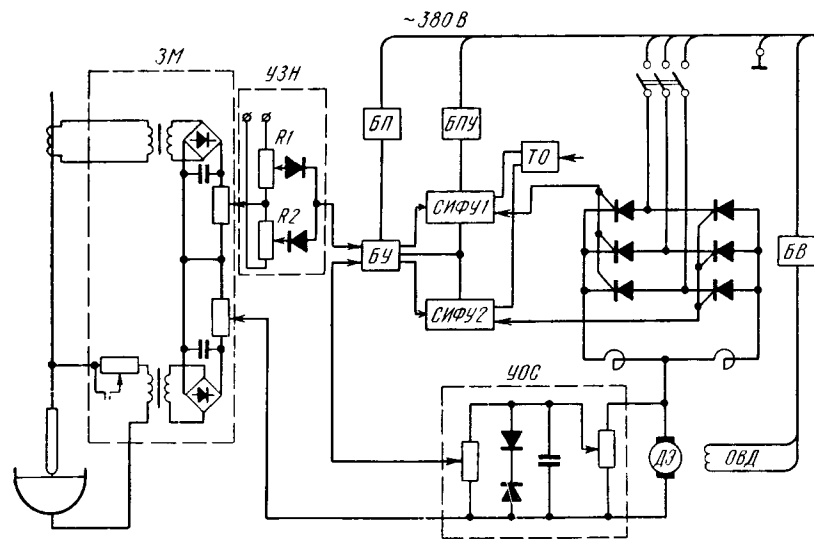


Рис. 123. Блок-схема одной фазы автоматического регулятора мощности на тиристорах типа АРДМ-Т:

ЗМ — задатчик мощности; УЗН — узел зоны нечувствительности; БУ — блок усилителей; БП — блок питания; БПУ — блок питания и управления; ТО — токовая отсечка; СИФУ1, СИФУ2 — блок импульсно-фазового управления тиристорами; БВ — блок возбуждения; ДЭ — двигатель перемещения электрода; ОБД — обмотка возбуждения двигателя; УОС — узел обратной связи

На характеристиках здесь и в дальнейшем будут приняты следующие обозначения:

- $S_{м.у}$ — общая мощность установки;
- P — подведенная активная мощность;
- P_n — мощность, выделяющаяся в печи (на нагрузке);
- P_k — мощность электрических потерь в контуре;
- P_t — мощность, расходуемая для технологических целей;
- $P_{п.т}$ — мощность тепловых потерь;
- η_t — технологический к. п. д.;
- $\eta_{эл}$ — электрический к. п. д.;
- $\cos \varphi$ — коэффициент мощности;
- $u_{ф}$ — фазовое напряжение;
- A — удельный расход электроэнергии;
- G — производительность.

На рис. 121, а, б приведены нагрузочные характеристики для обеих ступеней напряжения.

Электрический режим печи регулировали электромашинным регулятором типа РМД-2,5 по принципу $z - a = 0$, где z — действительное значение регулируемой величины, a — ее заданное значение.

На рис. 122 приведена принципиальная схема включения вибраторов 1—8 осциллографа в одной фазе. Вибраторы сдвоены для одновременной регистрации явлений на разных скоростях.

Серии осциллограмм снимали как в период расплавления, так и в период рафинирования.

Следует указать, что на современных мощных печах устанавливают более совершенные регуляторы. Схема одного из таких устройств приведена на рис. 123.

На выходе датчика мощности $3M$ сигнал пропорционален разности ($bU - cI$) и определяет величину скорости электродвигателя перемещения электрода ДЭ. Этот сигнал через узел зоны нечувствительности УЗН и блок усилителей БУ подается в одну из систем управления фазой угла отпирания тиристоров СИФУ1 или СИФУ2, которые регулируют значение напряжения на обмотке двигателя ДЭ, а следовательно, и его скорость. Зона нечувствительности регулятора устанавливается с помощью потенциометров $R1$ и $R2$.

Однако же осциллограммы, снятые на печах с регулированием по этой схеме, существенно не отличаются от осциллограмм, снятых на печах с регуляторами старой конструкции.

3. Осциллограммы силы тока и напряжения сталеплавильной печи в период расплавления

Как отмечено выше, в самый начальный период расплавления столб дуги одним своим концом опирается на поверхность расплавляемых твердых кусков металла; дуга в это время крайне неустойчива, длина ее непрерывно меняется, она горит с частыми обрывами, длящимися значительное время. В этот период форма кривых мгновенных значений тока и напряжения резко искажена. Кривые

напряжения дуги имеют явно выраженные пики возникновения и исчезновения, кривые тока — более или менее длительные паузы. В значительной степени изменяются также амплитудные значения токов и напряжений дуги. Временами горение дуги прекращается. Поэтому огибающая амплитудных значений токов и напряжений имеет весьма сложную форму. Толчки тока иногда достигают величин, приближающихся к значению тока короткого замыкания печи; иногда же ток прекращается совсем и печь работает вхолостую, пока регуляторы вновь не приведут электроды в соприкосновение с шихтой. Чтобы смягчить токи короткого замыкания, в этот период желательно работать на низких ступенях напряжения со включенным дросселем. На рис. 124, а показана осциллограмма работы печи в начальный период расплавления. Регистрировали вторичный ток одной фазы, ток $I_{\text{я}}$ якоря электромашинного усилителя (ЭМУ), его напряжение и мощность. Запись огибающей проводили со скоростью 4 мм/с. Как видно из осциллограмм, дуга в это время горела весьма неравномерно и со значительными паузами.

Через каждые 15—20 с дуга обрывается и восстанавливается через некоторый промежуток времени, необходимый для соответствующего перемещения электрода и установления повторного контакта между электродом и кусками шихты. Из осциллограмм тока якоря, напряжения и мощности ЭМУ видно, что в это время регуляторы фаз печи усиленно работают и непрерывно перемещают электрод в необходимом направлении.

Записи осциллограмм при разных скоростях показывают резкие колебания амплитуд тока фазы. Они настолько велики и разнообразны, что трудно даже говорить о какой-либо закономерности их изменения. Это понятно. В начальный период плавки одним концом дуга опирается на оплавливающиеся куски шихты; вследствие этого длина дуги все время меняется и горение дуги носит переходящий характер. Всякие попытки построения вольтамперных характеристик для амплитудных или эффективных значений в этот период терпят, конечно, неудачу.

Форма кривых мгновенных значений тока и напряжения дуги в этот период меняется в очень широком диапазоне. При обрыве дуги ток исчезает, в первые моменты появления тока напряжение дуги приобретает резкие пики возникновения и исчезновения; кривая тока в начале имеет значительные паузы при небольших амплитудах, затем эти паузы уменьшаются.

К моменту, когда электрод прорезает толщу шихты, на дне коудца образуется лужица жидкого металла и дуга начинает гореть на ее поверхности. Тепловые условия горения дуги в этот период значительно улучшаются. Длительные обрывы дуги прекращаются, и она начинает гореть непрерывно; кривая тока в это время в той или иной степени отступает от синусоиды. В это время также наблюдаются колебания амплитуд тока. На рис. 124, б приведены кривые токов I , $I_{\text{я}}$, напряжения $U_{\text{я}}$ и мощности $P_{\text{я}}$ для такого периода. Мы видим, что огибающая тока не имеет разрывов и, следовательно, дуга горит непрерывно, но временами всплески токов достигают значительных

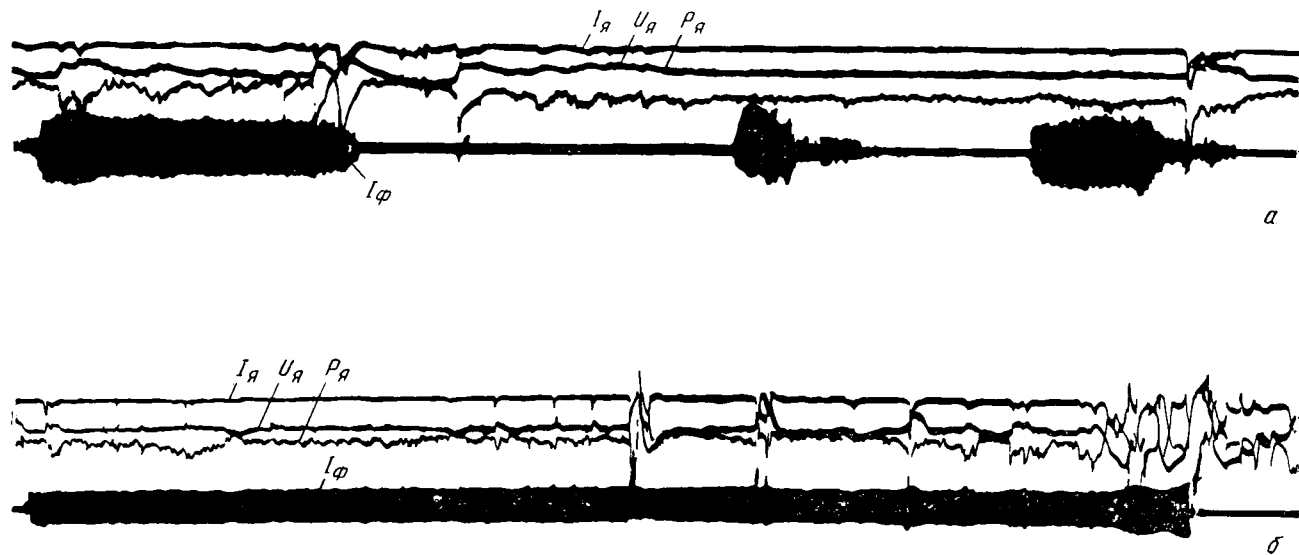


Рис. 124. Осциллограммы, снятые во время расплавления шихты в сталеплавильной печи:
 а — начало периода; б — середина периода

величин. Они происходят в моменты, когда куски сходящей вниз шихты случайно соприкасаются с электродом. На рис. 125 приведена огибающая мощности дуги, снятая к концу периода проплавления колодцев. К этому моменту дуга горит непрерывно и длительных пауз не имеет. Но это не значит, что ток дуги непрерывен внутри периода. Вследствие общих неблагоприятных тепловых условий в моменты прохождения тока через нуль могут возникать значительные паузы.

Во второй, основной период, расплавление происходит главным образом вследствие теплоизлучения дуги и передачи тепла от жидкого металла твердым кускам шихты. Случайные контакты между электродами и шихтой резко уменьшаются, но все же они бывают. Тепловые условия горения дуги еще больше улучшаются, и она горит гораздо спокойнее. Паузы в огибающей тока исчезают, и она становится более или менее плавной. Кривые тока и напряжений продолжают оставаться сильно искаженными. На рис. 126 приведены кривые мгновенных значений тока, напряжения и мощности дуги в середине периода расплавления одной плавки, а на рис. 127 показаны кривые силы тока и напряжения подводящей сети для такого же периода другой плавки. Они показывают значительные искажения кривых.

Но к концу расплавления форма кривых сглаживается.

На рис. 128 приведена одна из осциллограмм конца периода расплавления, когда основная масса шихты уже проплавилась и на поверхности жидкого расплава плавало небольшое число кусков твердого металла. На этой осциллограмме записаны кривые силы тока, напряжения и мощности фазы. Кривая силы тока несколько искажена и в точках перехода через нуль имеет небольшие паузы. Кривая напряжения не имеет пиков возникновения и исчезновения, она приобрела почти трапецеидальную форму, причем горизонтальный участок на некоторых полупериодах имеет выпуклость вверх. Наличие высших гармоник в кривой силы тока этого периода доказывается резкими искажениями формы кривой напряжения подводящей сети (рис. 129).

Следует отметить, что форма кривых силы тока и напряжения, даже для наиболее спокойного периода расплавления — его конца, — не единообразна и изменяется в весьма широких пределах. Поэтому формы кривых на приведенных выше осциллограммах не следует считать единственными. На рис. 130 приведены осциллограммы другой плавки. Мы видим, что кривые тока и напряжения в этом случае значительно отличаются по форме от кривых предыдущих осциллограмм. Наконец, на рис. 131 зарегистрировано значительное изменение формы кривых силы тока и напряжения в течение 10—15 периодов, т. е. десятих долей секунды.

В целом процесс расплавления можно характеризовать так. В начале расплавления дуга горит беспокойно, с частыми обрывами. Кривые мгновенных значений тока сильно искажены и имеют паузы. Огибающая максимальных значений также имеет паузы, обусловленные обрывами дуги. С течением времени дуга начинает гореть непрерывно, а кривые силы тока и напряжения сглаживаются.



Рис. 125. Осциллограмма огибающей мощности дуги в конце периода проплавления ко-лодцев

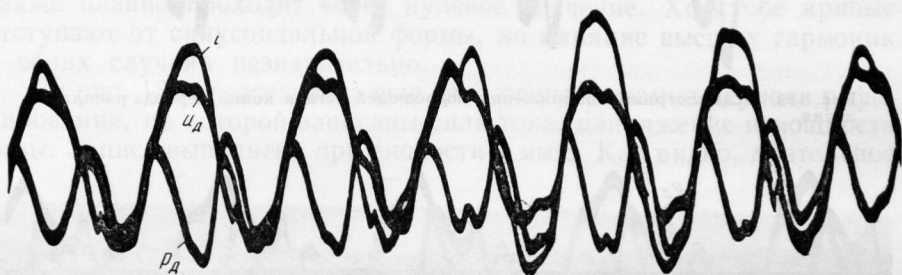


Рис. 126. Осциллограммы силы тока i , напряжения u_d и мощности P_d дуги в середине пе-риода расплавления

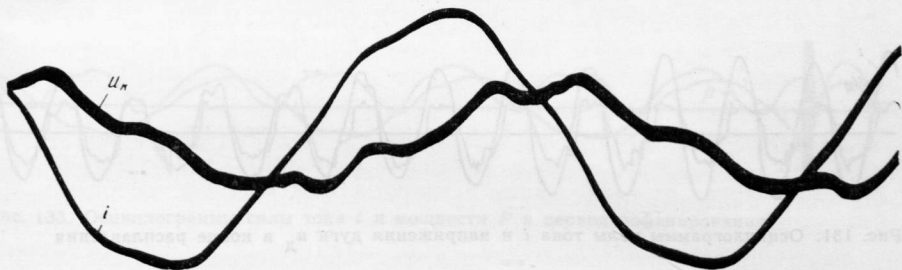


Рис. 127. Осциллограммы силы тока i и напряжения подводящей сети u_k в середине периода расплавления

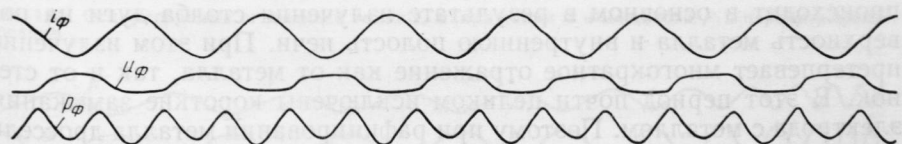


Рис. 128. Осциллограммы силы тока $i_ф$, напряжения $u_ф$ и мощности $P_ф$ одной фазы печи в конце периода расплавления

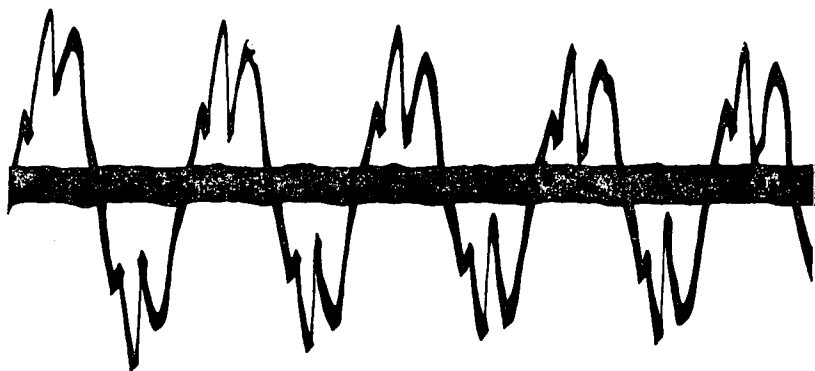


Рис. 129. Осциллограмма напряжения подводящей сети в конце периода расплавления

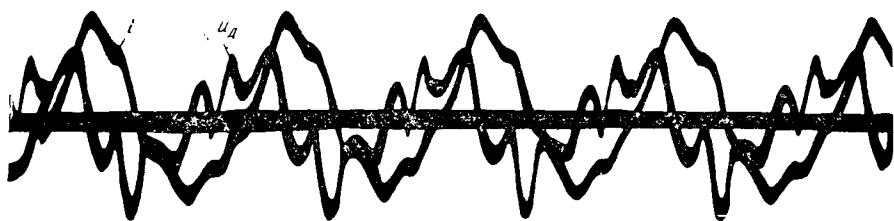


Рис. 130. Осциллограммы силы тока i и напряжения дуги u_d в конце расплавления

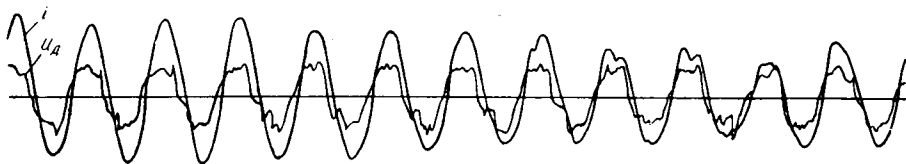


Рис. 131. Осциллограммы силы тока i и напряжения дуги u_d в конце расплавления

4. Осциллограммы силы тока и напряжения сталеплавильной печи в период рафинирования

В период рафинирования в печи уже нет твердой завалки и дуга горит на поверхности жидкого металла. Теплообмен в этот период происходит в основном в результате излучения столба дуги на поверхность металла и внутреннюю полость печи. При этом излучение претерпевает многократное отражение как от металла, так и от стенок. В этот период почти целиком исключены короткие замыкания электрода с металлом. Поэтому при рафинировании металла дроссель выводят из контура. Таким образом, в период рафинирования в ванне печи создаются весьма благоприятные тепловые условия для горения дуги; она горит спокойнее и устойчивее, чем в период расплавления. Незначительные возмущения, обусловленные кипением металла

и движением газовых потоков, легко и быстро устраняются сами по себе. Благодаря этому огибающая максимальных значений токов приближается к прямой, на которую накладываются высшие гармоники незначительной амплитуды. На рис. 132 приведена осциллограмма типичной огибающей амплитудных значений токов. Анализ этой кривой показывает, что величины амплитуды высших гармоник не превосходят 5—10% амплитуды первой гармоники тока. На рис. 133 показаны кривые мгновенных значений силы тока и мощности одной фазы. Как видим, кривые силы тока не имеют пауз и более или менее плавно проходят через нулевое значение. Кривая мощности также плавно проходит через нулевое значение. Хотя обе кривые отступают от синусоидальной формы, но влияние высших гармоник в обоих случаях незначительно.

На рис. 134 представлена еще одна осциллограмма периода рафинирования, на которой записаны сила тока, напряжение и мощность фазы. Запись выполнена при скорости 4 мм/с. Как видно, длительное

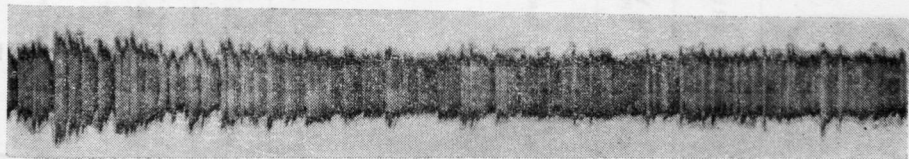


Рис. 132. Осциллограмма огибающей токов в период рафинирования

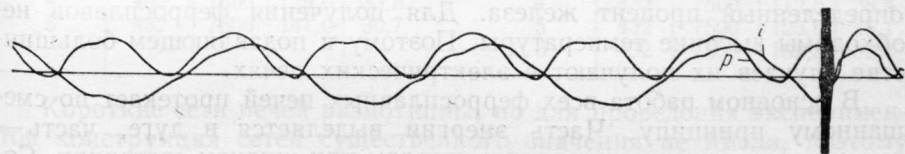


Рис. 133. Осциллограммы силы тока i и мощности P в период рафинирования

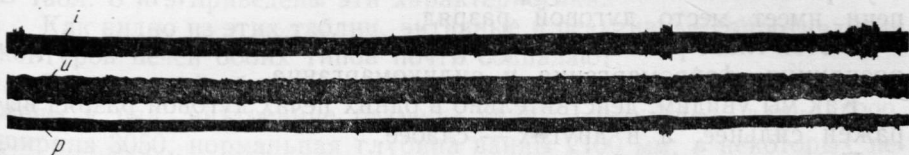


Рис. 134. Осциллограмма огибающей токов i , напряжения u и мощности P в период рафинирования

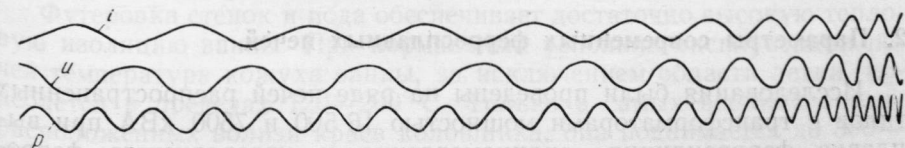


Рис. 135. Осциллограммы силы тока i , напряжения u и мощности P в конце плавки

время печь работала очень устойчиво. Незначительные возмущения ликвидировались очень быстро. Более или менее длительное возмущение, зарегистрированное в конце осциллограммы, объясняется тем, что в это время в печь была подана корректирующая шихта. После всплеска тока регулятор привел печь к заданному режиму, но подача новой порции шихты снова нарушила установившийся режим. Однако и на этот раз регулятор быстро привел печь в нормальное состояние. В конце плавки зафиксированы мгновенные значения силы тока, напряжения и мощности фазы (рис. 135). Они показывают, что дуга горела непрерывно, форма всех кривых весьма близка к синусоиде и высшие гармоники имели незначительные амплитуды.

Из всех этих осциллограмм видно, что форма кривых силы тока и напряжения дуги сталеплавильной печи может меняться в весьма широких пределах и зависит от теплового состояния ванны и общих условий горения дуги.

Глава VIII

Дуга в ферросплавных печах

1. Введение

Ферросплавы составляют обширную группу материалов, используемых в металлургии. Все они характеризуются тем, что содержат определенный процент железа. Для получения ферросплавов необходимы высокие температуры. Поэтому в подавляющем большинстве случаев их получают в электрических печах.

В основном работа всех ферросплавных печей протекает по смешанному принципу. Часть энергии выделяется в дуге, часть — в шихте, когда она находится в твердом или жидком состоянии. Соотношение этих количеств энергии может быть различным, но можно с уверенностью сказать, что в любой электрической ферросплавной печи имеет место дуговой разряд.

В этой главе рассмотрены ферросплавные печи для выплавки ферросилиция, ферромарганца и силикомарганца.

Как мы увидим, действительно в одних печах дуговой разряд выражен сильнее, а в других — слабее.

Прежде чем перейти к рассмотрению поведения электрической дуги в ферросплавных печах, остановимся на параметрах и электрических характеристиках некоторых печей.

2. Параметры современных ферросплавных печей

Исследования были проведены на ряде печей распространенных типов с трансформаторами мощностью 16 500 и 7500 кВА при выплавке ферросилиция, силикомарганца и углеродистого ферромарганца.

Остановимся сначала на параметрах двух типов печей мощностью 7500 кВА.

Печи обоих типов укомплектованы трехфазными трансформаторами с принудительным охлаждением масла. Обмотки соединены по схеме звезда—звезда; переключатель ступеней напряжения—встроенного типа, с одновременным переключением всех трех фаз без нагрузки. У трансформаторов первого типа предусмотрено пять ступеней напряжения, а у трансформаторов второго типа — шесть. Номинальное напряжение с высокой стороны трансформаторов обоих типов составляет 10 кВ. В табл. 6 и 7 приведены характеристики трансформаторов обоих типов.

ТАБЛИЦА 6

ХАРАКТЕРИСТИКА СТУПЕНЕЙ
НАПЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ПЕРВОГО ТИПА

Номер ступени на- пряжения	Сила тока с высо- кой стороны, А	Мощность, кВА	С низкой стороны	
			напряжение, В	сила тока, КА
1	334	6650	91,8	41,7
2	432	7500	103,6	41,7
3	432	7500	119,0	36,4
4	432	7500	129,0	33,5
5	432	7500	141,0	30,7

ТАБЛИЦА 7

ХАРАКТЕРИСТИКА СТУПЕНЕЙ
НАПЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ВТОРОГО ТИПА

Номер ступени на- пряжения	Сила тока с высо- кой стороны, А	Мощность, кВА	С низкой стороны	
			напряжение, В	сила тока, КА
1	386	6680	82,0	47,0
2	432	7500	92,0	47,0
3	432	7500	102,0	42,4
4	432	7500	112,5	38,4
5	432	7500	123,0	35,1
6	432	7500	132,5	32,7

Короткие сети печей разнотипны, но для проведения экспериментов конструкция сетей существенного значения не имела, поэтому на ней не будем останавливаться. В отношении электрических характеристик обе короткие сети довольно близки друг к другу. В табл. 8 и 9 приведены эти характеристики.

Как видно из этих таблиц, активные и реактивные сопротивления контуров печей обоих типов почти совпадают.

Ванны печей обоих типов — прямоугольные, электроды расположены в ряд; внутренние размеры ванны следующие: длина 7200, ширина 3050, нормальная глубина ванны 2100 мм; в некоторых печах глубина ванны уменьшена до 1700 мм.

Электроды всех печей самоспекающиеся, диаметром 1000 мм; расстояние между осями электродов 2100 мм.

Футеровка стенок и пода обеспечивает достаточно высокую тепло-ую изоляцию ванны. При нормальных условиях эксплуатации печей температура кожуха ванны, за исключением области летки, колеблется в пределах 120—200° С. Только в самых верхних зонах, расположенных вблизи краев колошника, она поднимается до 300—400° С.

По приведенным в табл. 8 и 9 электрическим параметрам построены нагрузочные характеристики печей обоих типов.

ТАБЛИЦА 8

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ПЕЧЕЙ ПЕРВОГО ТИПА**

Наименование участка	Реактивное сопротивление		Активное сопротивление	
	МОм	%	МОм	%
Трансформатор	0,137	10,9	0,037	17,0
Ошинка	0,927	74,0	0,085	39,2
Контакт электрод—плита	—	—	0,060	27,0
Электрод	0,188	15,1	0,035	16,8
Всего по печи	1,252	100,0	0,217	100,0

ТАБЛИЦА 9

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ПЕЧЕЙ ВТОРОГО ТИПА**

Наименование участка	Реактивное сопротивление		Активное сопротивление	
	МОм	%	МОм	%
Трансформатор	0,072	6,0	0,032	16,2
Ошинка	0,942	78,4	0,092	40,1
Контакт электрод—щека	—	—	0,065	28,4
Электрод	0,188	15,6	0,035	15,3
Всего по печи	1,202	100,0	0,229	100,0

Анализ этих характеристик показывает, что на первых двух ступенях для печей первого типа и на первых трех ступенях для печей второго типа режим работы при номинальных токах лежит за точкой перегиба кривых полезных мощностей и поэтому эти ступени не могут быть использованы для нормальной эксплуатации печей.

Наиболее эффективными с точки зрения максимальной производительности являются высшие ступени напряжения: для печей первого типа — пятая (141 В), а для второго типа — шестая (132,5 В). На рис. 136, а, б приведены нагрузочные характеристики для этих ступеней напряжения.

Для характеристики всех ступеней напряжения в табл. 10 и 11 приведены основные показатели работы печей при номинальных токах.

Как видно из этих таблиц, при номинальных токах наибольшая мощность подводится к первым печам на пятой ступени — 6590 кВт, а ко вторым печам на шестой ступени — 6420 кВт. Фактически средняя мощность печей бывает на 5—10% больше. Это объясняется тем, что к печным трансформаторам обычно подводится напряжение 10,5 кВ, т. е. на 5% превышающее номинальное. Вследствие этого повышается и напряжение на низкой стороне печного трансформатора. На шестой ступени печи второго типа напряжение холостого хода равно уже не 132,5, а 139 В, и соответственно у печи первого типа на пятой ступени 148 вместо 141 В. На рис. 137, а приведена нагрузочная характеристика шестой ступени печи второго типа с учетом пятипроцентного повышения напряжения. Из этого рисунка

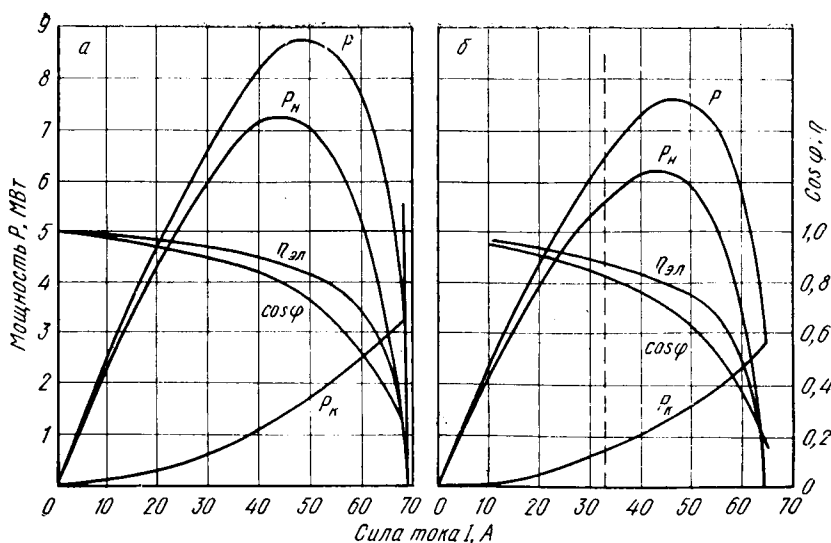


Рис. 136. Нагрузочные характеристики печей:

a — печь первого типа, ступень напряжения 141В; *б* — печь второго типа, ступень напряжения 132,5 В

видно, что при номинальном токе 32,5 кА подводенная мощность печи составляет 6700 кВт, а при перегрузке по току на 5% мощность печи поднимается до 7000 кВт.

В настоящее время на ряде заводов широко внедрены закрытые печи типа РКЗ-16,5 оснащенные тремя однофазными трансформаторами мощностью по 5500 кВА. Печи имеют ванну круглой формы и три самоспекающихся электрода. Диаметр кожуха печи 7800, диаметр плавильного пространства 6100, глубина ванны 2300 мм. Свод печи металлический водоохлаждаемый из отдельных секций, имеет на внутренней стороне обмазку из жароупорного бетона.

ТАБЛИЦА 10

ПОКАЗАТЕЛИ ПЕЧЕЙ
ПЕРВОГО ТИПА
ПРИ НОМИНАЛЬНЫХ ТОКАХ

Напряжение ступени, В	Номинальный ток, кА	Подведенная мощность, кВт	Полезная мощность, кВт	К. п. д.	cos φ
91,8	41,7	2820	1690	0,598	0,425
103,6	41,7	4490	3360	0,750	0,599
119,0	36,4	5840	4980	0,853	0,780
129,0	33,5	6290	5561	0,888	0,839
141,0	30,7	6590	5978	0,906	0,880

ТАБЛИЦА 11

ПОКАЗАТЕЛИ ПЕЧЕЙ
ВТОРОГО ТИПА
ПРИ НОМИНАЛЬНЫХ ТОКАХ

Напряжение ступени, В	Номинальный ток, кА	Подведенная мощность, кВт	Полезная мощность, кВт	К. п. д.	cos φ
82,0	47,0	—	—	—	—
92,0	47,0	—	—	—	—
102,0	42,4	4190	2950	0,705	0,559
112,5	38,4	5480	4460	0,814	0,733
123,0	35,1	6060	5210	0,860	0,811
132,5	32,7	6420	5684	0,884	0,857

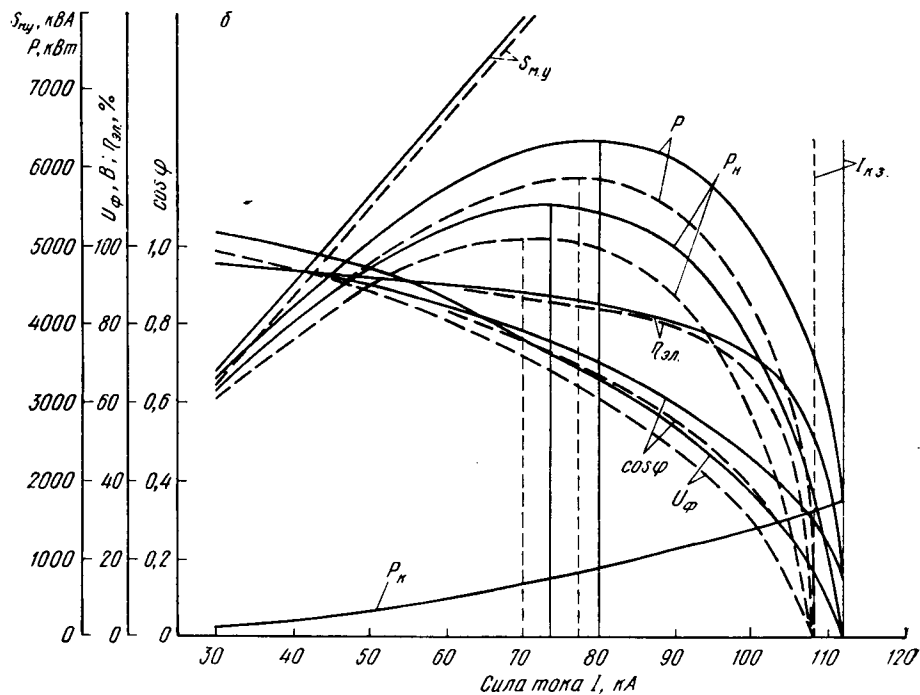
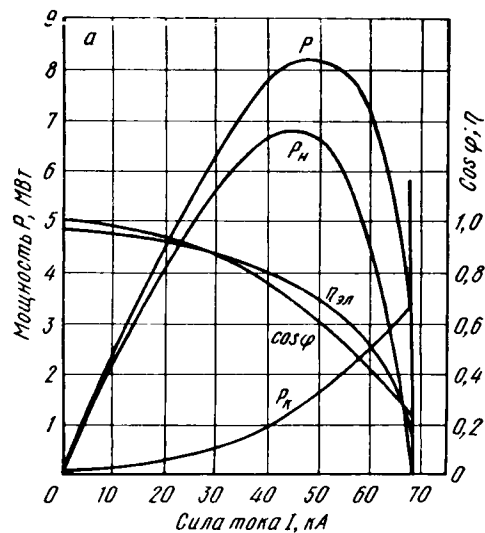


Рис. 137. Нагрузочные характеристики:
 а — печи второго типа, ступень напряжения 139 В; б — печи РКЗ = 16,5 с тремя трансформаторами по 7000 кВА

На некоторых печах мощность трансформаторов была увеличена до 7000 кВА за счет усиления обмотки. В табл. 12 приведена характеристика трансформатора.

Обследование, проведенное В. Л. Розенбергом с сотрудниками [29], позволило установить электрические параметры печи (табл. 13).

ТАБЛИЦА 12

ХАРАКТЕРИСТИКА СТУПЕНЕЙ
НАПРЯЖЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО
ТРАНСФОРМАТОРА
МОЩНОСТЬЮ 7000 кВА

Номер ступени трансформатора	Сила тока с вы- сокой стороны, А	Мощность, кВА	С низкой стороны	
			напря- жение, В	сила то- ка, кА
1	1210	7000	204	57,1
2	1210	7000	198	61,1
3	1210	7000	186	65,1
4	1210	7000	175	69,1
5	1210	7000	166	72,8
6	1140	6620	157	72,8
7	1080	6320	149	72,8

ТАБЛИЦА 13

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗАКРЫТОЙ
ФЕРРОСИЛИЦЕВОЙ ПЕЧИ

Наименование участка	Реактивное сопротивле- ние		Активное сопротивле- ние	
	МОм	%	МОм	%
Трансформатор	0,11	11,5	0,03	1,73
Шинный пакет	0,13	13,5	0,03	1,73
Гирлянды	0,06	6,3	0,01	0,58
Трубы	0,29	30,1	0,08	4,62
Электрод и щеки	0,07	7,3	0,04	2,31
Ванна	0,30	31,3	1,54	89,03
В с е г о	0,96	100	1,73	100

На рис. 137, б приведены электрические характеристики печи РКЗ = 16,5 на двух наиболее часто применяемых ступенях напряжения трансформатора: четвертой — 175 В (сплошные линии) и пятой — 166 В (пунктир). Вертикальные линии идут в точки перегиба кривых активной $P_{акт}$ и полезной $P_{пол}$ мощностей.

3. Дуга при выплавке 45%-ного ферросилиция

А. Специфические свойства плавки 45%-ного ферросилиция. На выплавку 1 т 45%-ного ферросилиция требуется ~1000 кг кремнезема, 560 кг коксика и 513 кг железной стружки [7]. Температура плавления кремнезема и железа составляет ~1700° С, а углерод вплоть до зоны реакции остается в твердом состоянии. Следовательно, все компоненты шихты до 1700° С остаются в твердом состоянии, в то же время температура плавления продукта реакции — ферросилиция — составляет 1340—1410° С. Сплав, образующийся при температуре выше точки его плавления, быстро стекает на дно тигля. Кроме того, процесс выплавки ферросилиция проходит почти без образования шлаков: все продукты реакции, не вошедшие в сплав, улетучиваются в газообразном состоянии из зоны реакции через колошник.

Благодаря этим обстоятельствам толщина магмы (слоя полужидкой вязкой массы) незначительна, и тигель, образующийся во время работы печи, сохраняет свою форму и после отключения печи. Тигель

имеет более или менее правильную форму тела вращения. Верхняя часть тигля оканчивается у поверхности электрода. За тиглем начинается слой непрореагировавшей шихты, прилегающей к телу электрода.

Таким образом, в период работы печи торец электрода погружен в газообразную среду тигля. Часть тока проходит через газовую среду в виде электрической дуги, а другая часть ответвляется от боковой поверхности электрода в шихту.

При отключении печи электроды поднимают вверх. Чтобы избежать провала шихты в тигель, электроды обычно держат так, чтобы их торцы не поднимались выше вершины тигля.

После отключения печи форма тигля остается почти неизменной.

При повторном включении электроды отстоят на значительном расстоянии от дна тигля, а газовая сфера сильно охлаждена. Поэтому дуга не может загореться и в начальной стадии включения печи ток проходит только через шихту.

В течение определенного промежутка времени после включения печи электроды оставляют в неподвижном состоянии. Это объясняется следующим обстоятельством. При остывании печи остывает также шихта вокруг электрода и прилипает к электроду. Вследствие этого исчезает тот незначительный зазор между электродом и шихтой, который в период работы печи обуславливается высокой температурой и отходящими газами. Поэтому после включения печи нужен некоторый промежуток времени, чтобы электрод приобрел необходимую подвижность.

В дальнейшем, после некоторого разогрева печи, начинается регулирование перемещением электродов.

При достаточном опускании электродов и повышении температуры возникают перемежающиеся, прерывистые дуги; затем дуга начинает гореть устойчиво.

Задача исследования заключается в осциллографировании всех процессов, протекающих в ванне печи с момента включения ее до развития устойчивого нормального дугового режима.

Так как для нормального хода печи весьма важное значение имеет общий тепловой режим, ниже приведено описание печи средней мощности до исследования.

Б. Работа печи до исследования. Печь для выплавки 45%-ного ферросилиция, на которой было проведено исследование дуги, длительное время находилась в холодном резерве. Через четверо суток после пуска она вошла в свой нормальный режим по мощности. В течение последующих пяти суток печь работала без простоев и средне-суточная мощность печи составила 7150 кВт. Однако в связи с продолжавшимся разогревом ванны производительность печи была ниже нормальной и составляла ~25 т сплава в сутки.

На 10-й день после пуска печь была выключена на 12 мин, а в последующие два дня была переведена на режим потребителя-регулятора и простояла ~8 ч. Вследствие этого уменьшилась и производительность печи. На 13-й день печь снова начала работать в нормальном тепловом режиме и ее производительность достигла номиналь-

ного значения — 30—31 т сплава в сутки. Параллельно с этим снизился и удельный расход энергии на 1 т сплава. После четырех дней нормальной работы печь снова была переведена на режим потребителя-регулятора и в течение девяти дней работала со среднесуточными простоями 6,5 ч.

Для учета потерь энергии во время горячего простоя печи в одной из наших работ было введено понятие о потерях холостого хода печи [33]. В этой работе показано, что тепловые потери печи во время горячего простоя примерно равны тепловым потерям во время нормального хода печи. Для печи мощностью 7500 кВт потери холостого хода составляют ~1500 кВт. Во время нормальной работы печи эти потери пополняются за счет электроэнергии, поступающей из сети. При горячих простоях тепловые потери покрываются энергией, аккумулированной в ванне печи. При повторном включении печи после более или менее длительного простоя часть электроэнергии тратится на восстановление теплового режима. Таким образом, печь как в период горячего простоя, так и в последующий за ним период работы находится в неустойчивом тепловом режиме.

Это весьма важно для процесса горения дуги. Естественно, что в период разогрева печи, когда часть энергии тратится на аккумуляцию тепла в ванне, температурные градиенты в тигле будут более неравномерны; температура в тигле в этот период будет несомненно ниже и процессы деионизации будут приводить к частным обрывам дуги и неустойчивому ее горению.

Именно в таком неустойчивом тепловом режиме находилась печь перед описанными ниже исследованиями. Для полной характеристики работы печи в табл. 14 приведены основные производственные показатели печи за 20 дней, предшествовавших испытаниям.

ТАБЛИЦА 14

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕЧИ ДО ИСПЫТАНИЙ

Дни	Фактическое рабочее время, ч	Полный расход энергии, кВт·ч	Среднесуточная мощность, кВт	Производительность, т/сутки	Удельный расход энергии, кВт·ч/т	Дни	Фактическое рабочее время, ч	Полный расход энергии, кВт·ч	Среднесуточная мощность, кВт	Производительность, т/сутки	Удельный расход энергии, кВт·ч/т
1	24,00	167 000	6958	23,0	7250	12	24,00	182 000	7613	30,7	5920
2	24,00	173 000	7220	25,6	6767	13	17,75	130 000	7346	18,0	7244
3	24,00	171 000	7100	26,2	6639	14	15,97	113 000	7150	18,6	6097
4	24,00	173 000	7200	25,0	6938	15	13,33	96 000	7179	14,5	6609
5	24,00	175 000	7291	26,5	6594	16	12,67	92 000	7292	13,8	6649
6	23,80	173 000	7256	27,3	6272	17	23,75	178 000	7494	26,6	6686
7	19,17	136 000	7115	22,7	6000	18	19,75	144 000	7295	21,9	6561
8	20,58	150 000	7303	25,3	5937	19	11,10	82 000	7130	9,6	8471
9	23,87	178 000	7450	30,0	5930	20	23,78	176 000	7401	31,3	5516
10	23,30	170 000	7330	31,0	5472	21	18,75	140 000	7466	24,0	5813
11	23,87	171 000	7185	27,3	6253						

В. Исследование дуги при различных режимах. Испытания были начаты на 25-й день после пуска печи. При осциллографировании дуги прежде всего необходимо было удостовериться в отсутствии влияния посторонних магнитных полей на работу осциллографа и в чистоте кривой напряжения энергосистемы. Поэтому после установки и наладки осциллографа прежде всего было сделано несколько контрольных записей линейного и фазового напряжения с высоковольтной стороны печных трансформаторов. Записи показали, что напряжение системы было синусоидальным и не имело заметных искажений. Следовательно, все искажения формы кривых напряжения и силы тока, которые были зарегистрированы в последующих осциллограммах являлись результатами влияния печной дуги.

Перед осциллографированием печь работала с номинальной нагрузкой ~ 7000 кВт в течение 6 ч 15 мин, поэтому она находилась в довольно устойчивом тепловом режиме.

В момент снятия первой осциллограммы в начале исследования (рис. 138, а) мощность печи составляла 7200 кВт при фазовых токах 33—35 кА и фазовых напряжениях 75 В.

На этой осциллограмме зарегистрированы фазовое и линейное напряжения первой фазы печи.

Как видно из осциллограммы, обе кривые несколько искажены, но довольно близко подходят к синусоиде. Линейное напряжение сдвинуто относительно фазового на угол 58° . Это объясняется тем, что фазовое напряжение при подключении к осциллографу цепи фазового напряжения было смещено на угол 180° .

Вторая осциллограмма (рис. 138, б) была снята через 1 ч после первой ($u_\phi = 75$ В, $i = 35$ кА). Режим мощности, силы тока и напряжения остался неизменным. К двум предыдущим вибраторам был добавлен третий для измерения силы тока при помощи магнитного пояса.

Ход кривых напряжения остался почти неизменным, кривая силы тока несколько искажена. Как было указано выше, это объясняется тем, что магнитный пояс регистрирует не ток, а индуцированную э. д. с. Кривая силы тока должна быть искажена меньше, чем показывает пояс. С точки зрения улавливания искажений тока магнитный пояс удобен тем, что он не ослабляет, а наоборот, усиливает высшие гармоники, содержащиеся в кривой силы тока.

Третья осциллограмма (рис. 138, в) снята в устойчивом тепловом режиме через 3 ч после второй. Таким образом, к моменту снятия этой осциллограммы печь проработала бесперебойно более 10 ч.

За такой длительный период, несомненно, печь вошла в свой устойчивый тепловой режим. Дуга при таких условиях должна гореть не только без обрывов, но и без заметного искажения. Действительно, как видно из осциллограммы, кривые линейного и фазового напряжений почти синусоидальны. Кривая тока, снятая опять-таки магнитным поясом, искажена меньше, чем в предыдущем случае.

Нужно еще иметь в виду, что эта осциллограмма снята через 10 мин после выпуска сплава. Во время выпуска, когда из тигля уходит значительное количество горячего сплава, температура внутри

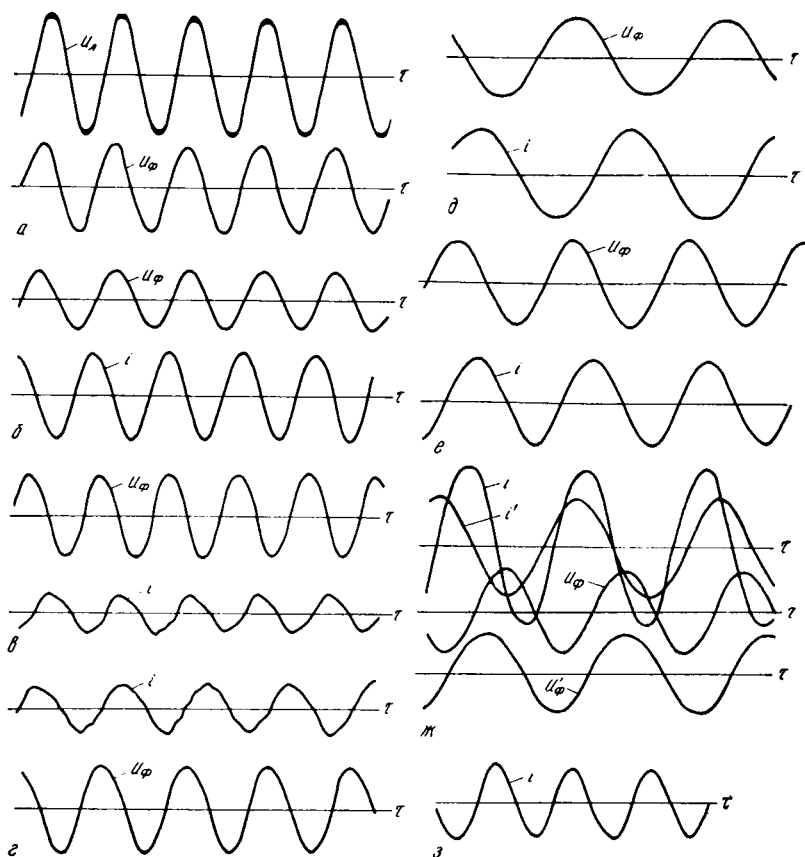


Рис. 138. Осциллограммы, снятые при выплавке 45%-ного ферросилиция; $u_{\text{л}}$ — линейное напряжение; $u_{\text{ф}}$ — фазовое напряжение; i — ток

тигля несколько снижается, а ионизация газов уменьшается. Вследствие этого ухудшаются условия для устойчивого горения дуги. Несмотря на это, в течение 10 мин, последовавших за выпуском, тепловой режим настолько восстановился, что дуга в данном случае горела спокойнее и с меньшими искажениями, чем в предыдущем. В момент снятия этой осциллограммы мощность печи составляла 7500 кВА при силе тока 35—36 кА.

В четвертой осциллограмме (рис. 138, е) записаны те же величины, но в испытуемой фазе ток поднятием электрода вверх был снижен до 25 кА ($u_{\text{ф}} = 78$ В). Осциллограммы были записаны сейчас же после снижения силы тока. Несмотря на такое значительное изменение величины тока, форма кривых силы тока и напряжения не претерпела почти никаких изменений.

Это указывает на весьма высокую степень ионизации и диссоциации газовой сферы тигля при нормальной работе печи.

К сожалению, по условиям эксплуатации нельзя было допустить длительную работу печи с таким большим перекосом токов, но из испытаний другой печи видно, что при длительном уменьшении силы тока в одной фазе дуга горит с значительными искажениями.

В дальнейшем печь была переведена на режим регулятора энергосистемы и отключена; она простояла ~5 ч.

При составлении плана испытаний намеренно была выбрана такая печь, которой мог быть задан режим потребителя-регулятора. Проблема работы руднотермических печей в режиме потребителя-регулятора освещена в работе автора [34], и здесь не будем останавливаться на ней. Остановки печей, связанные с этим режимом, были весьма удобны для производившихся испытаний, так как благодаря им создавалась возможность следить за ходом печи после длительного простоя и остывания ее тигля.

Для печей, работающих в режиме потребителя-регулятора, выработаны особые методы ухода за печью, создающие наименьшие потери тепла в период простоя. Обычно при отключении печи электроды поднимают вверх и колошник надежно закрывается свежей шихтой, благодаря чему резко уменьшается излучение тепла. То же было сделано и в данном случае.

Последующие осциллограммы характеризуют ход печи после включения.

В этой группе осциллограмм регистрировали только фазовое напряжение и силу тока, причем ток фиксировали методом падения напряжения.

При отключении печи электроды были подняты высоко, ванна за время длительного простоя сильно остыла, поэтому печь в момент включения забрала всего 3000 кВт при силе тока 10—11 кА и фазовых напряжениях 80—85 В.

Через 2 мин мощность повысилась до 3500 кВт при силе тока 12—13 кА, а через 5 мин — до 3700 кВт при силе тока 15 кА. На рис. 138, д зафиксирован первый момент работы печи после включения.

О дуговом режиме в этот период работы печи не могло быть и речи, так как электроды стояли высоко и, следовательно, расстояние от пода до торца электрода было слишком велико. Тут следует заметить, что иногда специалисты считают, что горение дуги возможно между электродом (его торцом или боковой поверхностью) и боковой поверхностью цилиндрической части тигля, образуемой шихтой после поднятия электрода вверх. Возможность возникновения такой дуги, конечно, не исключена. Но такая дуга длительно гореть не может, так как это приведет к несимметричному местному перегреву шихты. Кроме того, для осуществления такой дуги необходимо, чтобы электропроводность части шихты, соединенной последовательно с такой дугой, была достаточной.

Таким образом, дуга, возникшая у боковой поверхности колодца тигля, должна быстро исчезнуть как ненормальное явление. Вернемся теперь к эксперименту. В рассматриваемый момент дуга в печи не могла существовать и потому, что тигель сильно остыл и отсутствовали условия для ионизации газовой среды тигля.

Следовательно, за рассматриваемый период печь должна была работать исключительно по принципу печи сопротивления. Действительно, как видно из осциллограмм, кривые силы тока и напряжения — чистые синусоиды без искажений. Через 8 мин после пуска сила тока достигает 18 кА, а мощность — 4300 кВт.

Несмотря на то что электроды оставались неподвижными благодаря разогреву шихты и повышению электропроводности последней, сила тока и мощность печи продолжали нарастать.

Через 10 мин после пуска сила тока достигла 20—21 кА при мощности 5000 кВт.

Следующая осциллограмма (рис. 138, *е*) записана спустя 13 мин от начала пуска печи при силе тока 24 кА, мощности 5300 кВт и фазовых напряжениях 80—70—85 В.

Кривые силы тока и напряжения и при этом режиме весьма близки к синусоиде, хотя у кривой напряжения в периоды пиков уже замечалось некоторое искажение.

С течением времени нарастание тока продолжалось. Спустя 25 мин после пуска печи сила тока повысилась до 28 кА при мощности 6200 и напряжениях фаз 80—73—88 В.

Из осциллограммы, снятой в этот момент, т. е. после увеличения силы тока (i') и заглубления электродов в шихту u_{ϕ} (рис. 138, *ж*), видно, что кривые силы тока и напряжения остаются почти синусоидальными.

Во время горячего простоя печи, как указано выше, шихта обычно остывает и прилипает («примерзает») к телу электрода, вследствие чего увеличивается сила трения электрода о шихту. Поэтому после горячего простоя, в первый период пуска, во избежание излишних механических напряжений в теле электрода и возможных его поломок, печь обычно работает при неподвижных электродах.

После того как ванна достаточно разогреется и шихта вокруг электродов достаточно расплавится и освободит электрод, последний без опасности его повреждения может быть смещен вверх или вниз.

Весьма важную роль в этом вопросе играет и температурный режим. В период разогрева неравномерность температуры как в осевом, так и в радиальном направлениях тела электрода, обуславливает в последнем дополнительные механические перенапряжения, вызывающие иногда трещины в нем и его поломки.

Это хорошо известно обслуживающему персоналу из практики эксплуатации, поэтому при пуске печи обычно в течение более или менее длительного периода электроды оставляют неподвижными.

Как было отмечено, этот период в описываемом случае длился 25 мин. По истечении этого времени персонал начал регулировать печь опусканием электрода. Мощность печи была доведена до 7300 кВт при силе тока 35 кА и фазовых напряжениях 80—65—82 В.

При увеличении посадки электрода и повышении мощности печи с 6200 до 7300 кВт несомненно в тигле должна была возникнуть дуга.

В этом случае существенно важно было зафиксировать момент возникновения этой дуги, поэтому на той же осциллограмме были

зафиксированы ток i' и фазовое напряжение u'_ϕ сейчас же после посадки электродов.

В кривой силы тока появились едва заметные следы искажения.

Через 42 мин после пуска печи и через 17 мин после начала регулирования электродов были снова записаны значения силы тока и напряжения (рис. 138, э). В момент записи мощность печи составляла 7500 кВт при силе тока 36 кА и напряжении фаз 80—68—86 В.

Кривая силы тока здесь еще больше искажена, чем в предыдущем случае (рис. 138, э).

Однако эти искажения в сумме остаются незначительными. Из дальнейшего будет видно, что искажения силы тока могут быть значительно больше. Это объясняется следующим обстоятельством. Во всех снятых осциллограммах был зафиксирован *не ток дуги, а суммарный ток, состоящий из тока дуги и тока шихтовой проводимости*. Из осциллограммы, показанной на рис. 138, ж, следует, что ток шихтовой проводимости при мощности 6200 кВт достиг 28 кА. Посадкой электрода ток печи был увеличен до 35 кА, т. е. на 25%. Несомненно, что при посадке электрода изменяется и ток шихтовой проводимости, но если даже пренебречь этим обстоятельством и считать, что при посадке электрода ток растет исключительно вследствие появления дуги, то можно сделать вывод, что ток дуги составляет не более 25% общего тока, зарегистрированного на осциллограмме. Следовательно, если из кривой на осциллограмме вычесте синусоидальную составляющую с эффективным значением 28 кА, то получим ток дуговой проводимости. Естественно, что эта остаточная кривая будет искажена гораздо больше, чем кривая осциллограммы. Суммарная кривая около нулевых точек проходит весьма плавно и мало чем отличается от синусоиды, едва заметные же искажения наблюдаются на осциллограммах в средней части периода. Это и понятно. В начале появления дуги процесс имеет неустойчивый характер и, видимо, дуга горит прерывисто, поэтому она более или менее сильно влияет на кривую суммарного тока в средней части полупериода. В течение трех часов было сделано еще несколько записей. Чтобы подробнее выявить ход изменения кривой силы тока, вместо вибратора напряжения подключили второй вибратор тока и одновременно записывали ток как методом падения напряжения, так и магнитным поясом. На рис. 139 приведена осцилло-

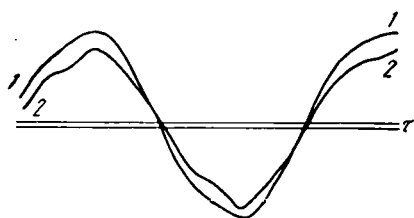


Рис. 139. Осциллограммы тока:
1 — снята методом измерения падения напряжения; 2 — снята с магнитного пояса ($i = 36$ кА)

грамма, записанная при силе тока 36 кА и мощности печи 7300 кВт. Как видно из рисунка, кривая тока искажена достаточно сильно. Сравнение последних осциллограмм этой серии показывает, что с течением времени искажение кривых тока увеличивается.

Следующая запись была сделана через 13 ч после пуска печи. В течение всего этого периода печь работала нормально и без

перерывов. Средняя мощность по показаниям счетчиков составила 7200 кВт, среднее значение напряжения с высокой стороны трансформатора — 10,6 кВ, т. е. на 6% выше номинального. В момент записи осциллограммы (рис. 140) мощность печи составляла 7300 кВт при токе 36 кА. Магнитный пояс был снят и снова включен вибратор фазового напряжения.

Как и следовало ожидать, кривые тока i и напряжения u_{ϕ} получились почти чисто синусоидальными.

В течение 13 ч устойчивой и непрерывной работы печи в ванне установился ровный температурный режим, обеспечивавший высокую степень ионизации и диссоциации газовой сферы тигля. При таких благоприятных условиях ток в дуге непосредственно следует за ходом напряжения и кривая силы тока имеет такую же форму, как и кривая напряжения дуги. Для проверки результатов этой осциллограммы на той же бумаге была сделана повторная запись через 40 мин. Мощность, ток и рабочий режим печи в целом остались неизменными.

Как видно из осциллограммы, кривые тока i' и напряжения u'_{ϕ} и в данном случае оказались синусоидальными.

В дальнейшем описывается другой вариант работы печи при ином составе шихты и сплава, чтобы показать, что при длительном рабочем режиме кривая силы тока печи может иметь и весьма искаженную форму.

4. Дуга при выплавке силикомарганца

А. Специфические свойства плавки силикомарганца. Теперь рассмотрим дугу при выплавке силикомарганца, так как технологический процесс производства этого сплава обладает рядом специфических свойств, резко влияющих на характер горения дуги, которые описаны ниже.

Силикомарганец содержит ~ 65% марганца, 18—20% кремния и 15—17% железа [6].

Следовательно, основным компонентом сплава является марганец, а шихты — марганцевая руда (пиролюзит).

При выплавке силикомарганца образуется значительное количество шлаков, достигающее 50—70% количества самого сплава.

Уже при 400—500° С идет восстановление MnO_2 до Mn_3O_4 , а так как температура такого порядка господствует в высоких зонах ванны,

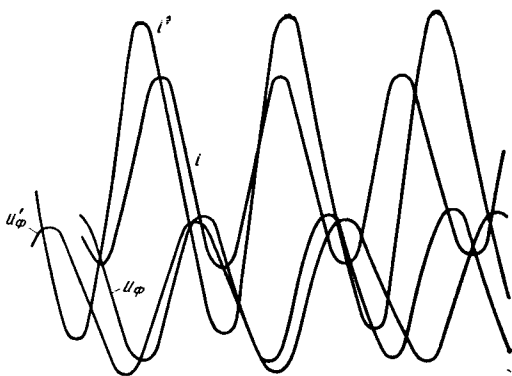


Рис. 140. Осциллограммы токов и напряжений при выплавке 45%-ного ферросилиция через 13 ч после пуска печи и еще через 40 мин

Довольно далеко отстоящих от зоны дуги, то, следовательно, *часть химических процессов протекает в самой толще шихты.*

Вследствие этого на значительном расстоянии от газовой зоны тигля часть шихты плавится и в нижние зоны поступает уже расплавленная масса.

Наконец, процесс получения силикомарганца характеризуется высокой скоростью схода шихты, достигающей для рассматриваемых печей 4—5 т/ч.

Эти особенности влияют и на электрические характеристики печи как в период установившегося, так и в период неустойчивого режима ее работы.

При нормальном установившемся режиме работы печи и номинальной электрической мощности на под тигля стекает значительное количество сплава и шлака, поэтому для поддержания мощности и длины дуги необходимо частое регулирование электродов. При большой скорости схода шихты деформации тиглей происходят гораздо чаще, чем при выплавке ферросилиция. Вследствие этих же причин стойкость и прочность стенок тигля значительно меньше. Наконец, вследствие значительного количества сплава и шлака требуется большая длительность вскрытия летки.

Все эти обстоятельства приводят к тому, что *температурный режим тигля при выплавке силикомарганца нарушается чаще и дуга горит при менее благоприятных условиях, чем при выплавке ферросилиция.*

Еще резче меняются условия работы печи при простоях. Во время простоя силикомарганцевой печи жидкая и полужидкая магма с верхних горизонтов печи стекает вниз и начинает заполнять газовую сферу тигля.

После длительного простоя исчезает почти вся газовая сфера и электрод оказывается погруженным в полужидкую магму.

Если электроды оставить глубоко погруженными в ванну, то магма, пристав плотно к электродам, может создать настолько значительную проводимость от фазы к фазе, что режим работы печи приблизится к короткому замыканию.

Во избежание этого обычно при остановке печи электроды поднимают вверх и прикрывают колошник свежей шихтой.

Поэтому при включении после длительного простоя печь обычно забирает значительную мощность по шихтовой проводимости при неподвижных электродах. Но магма, окружающая электрод, начинает быстро проплаиваться и на торце электрода возникают перемещающиеся дуги.

Таким образом, синусоидальная кривая силы тока, обусловленная шихтовой проводимостью, должна очень быстро искажаться.

По мере проплавления магмы и образования тигля ток дуговой проводимости, конечно, нарастает, но все время остается искаженным. Для установления более или менее нормального электрического режима и образования нормального тигля требуется значительно больше времени, чем при выплавке ферросилиция.

Б. Исследование дуги при различных режимах. Условия длительной эксплуатации, предшествовавшей испытаниям, были для этой печи примерно те же, что и для рассмотренной выше ферросилициевой. Ее также часто переводили в режим потребителя-регулятора и отключали на 4—5 ч в сутки. Поэтому не будем останавливаться на этом вопросе так подробно, как это было сделано в предыдущем случае, но отметим, что испытания, проведенные на этой печи, особенно интересны тем, что им предшествовало исключительное для эксплуатации печей явление.

Электрод первой фазы ниже контактных плит сначала получил трещину, а затем и совсем оборвался. Оборванный торец был удален, и электрод перепущен; чтобы дать закоксоваться последующей части электрода, нагрузку на первую фазу уменьшили от нормальной (36 кА) до 15 кА. В течение последующих 2 ч нагрузка фазы была повышена до 22 кА, но через 3 ч после повторного пуска печь как регулятор системы была отключена на 10 ч.

Этот исключительный случай был использован для фиксации ненормального режима работы печи.

Таким образом, описываемым ниже испытаниям предшествовали обрыв электрода первой фазы и длительный простой.

Испытания были начаты с первой поврежденной фазы печи.

В момент включения при неподвижных электродах печь забрала 4200 кВт, затем мощность ее начала быстро нарастать и в течение 1 мин достигла 6000 кВт при фазовых токах 22—25—26 кА. При этих испытаниях регистрировали не только силу тока и фазовые напряжения печи, но и напряжения дуги и падение напряжения в короткой сети печи. Схема подключения вибраторов осциллографа была показана на рис. 112. Вибратор 1 регистрирует ток, вибратор 2 — падение напряжения в короткой сети, а вибратор 3 — падение напряжения в ванне или (если пренебречь падением напряжения на участке электрода от контактной плиты до торца электрода) напряжение самой дуги.

Первая осциллограмма (рис. 141, а) была записана через 5 мин после включения печи при мощности 6000 кВт и токе первой фазы 20 кА (режим нормальный).

Электрод первой фазы, на которой проводили испытание, был погружен в шихту всего на 25—30 см, тигель почти целиком был заполнен полужидкой магмой и довольно плотно облегал электрод.

С момента пуска печь начала работать как печь сопротивления, так как под электродами не было достаточно газовых промежутков, которые создали бы возможность горения дуги.

По мере прогрева шихты проводимость последней и вместе с тем мощность печи начали возрастать. Но уже через 2—3 мин шихта вокруг электродов начала оплавляться, появились газы и между электродом и шихтой начали проскакивать перемежающиеся дуги.

К моменту записи осциллограммы эти перемежающиеся дуги на первом электроде горели со значительным световым эффектом.

При записи были включены только два вибратора: силы тока и падения напряжения в короткой сети от зажимов трансформатора

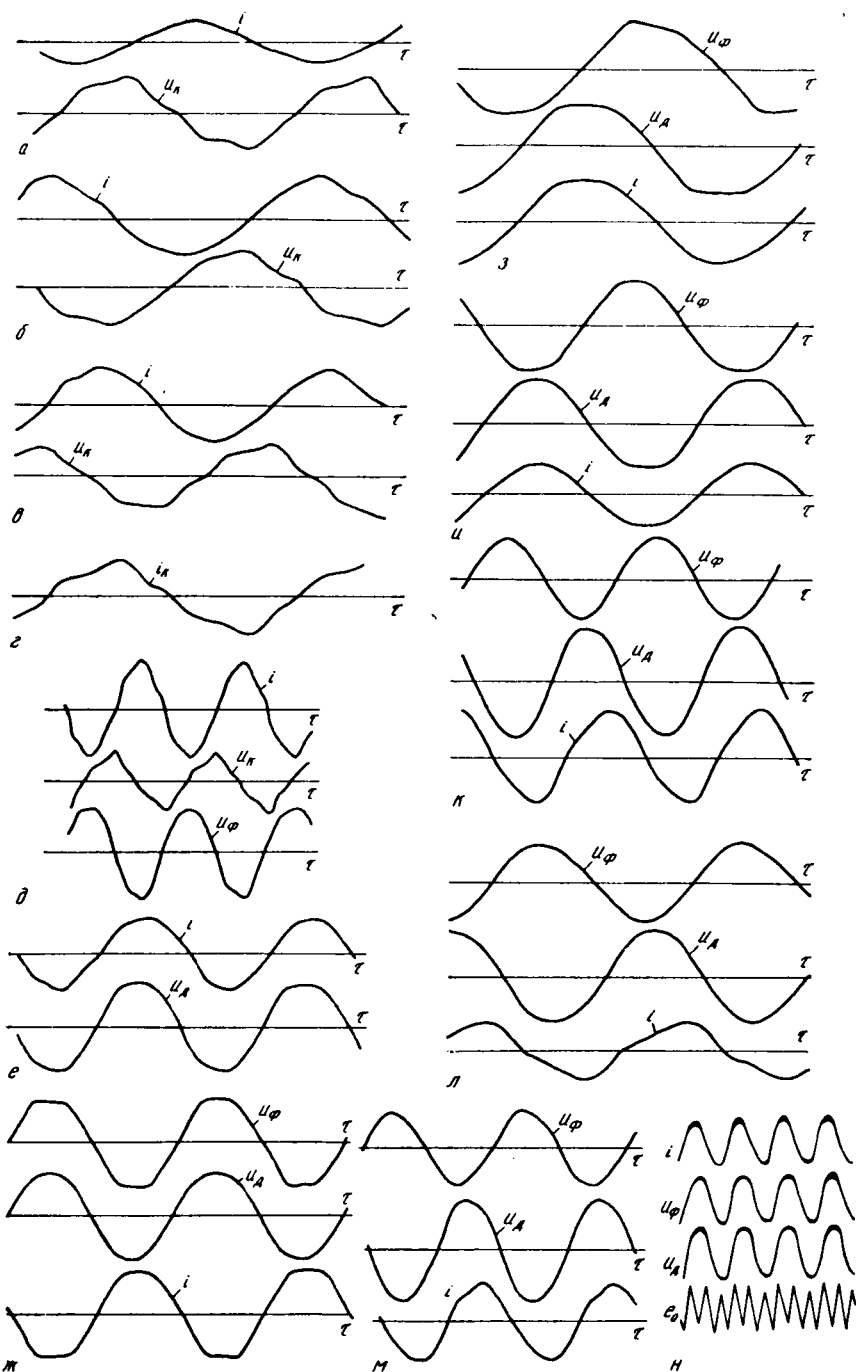


Рис. 141. Осциллограммы, снятые при выплавке силикомарганца:

i — сила тока; u_K — напряжение на короткой сети; u_d — напряжение дуги; u_ϕ — напряжение фазы; e_0 — напряжение смещения нулевой точки

до контактных плит электрода. Силу тока измеряли по принципу падения напряжения.

Обе кривые — и силы тока и напряжения короткой сети — искажены.

Искажение кривой силы тока невелико и объясняется наложением тока перемещающихся дуг на основную гармонику тока шихтовой проводимости.

Кривая напряжения короткой сети искажена значительно больше. Это и понятно, так как напряжение короткой сети обусловлено в основном индуктивностью.

Следующая осциллограмма (рис. 141, б) была снята через 15 мин после пуска печи.

К этому времени печь достаточно прогрелась и ее мощность повысилась до 6200 кВт при фазовых токах 22—27—30 кА.

Электроды в течение всего этого периода оставались неподвижными.

Форма кривых силы тока и напряжения короткой сети за 10 мин работы печи мало изменилась. Кривые рис. 141, б по своему строению весьма близки к кривым рис. 141, а.

Через 30 мин после пуска (рис. 141, в) приступили к регулированию печи (режим ненормальный); электроды второй и третьей фаз начали медленно углублять в шихту, посадка же электрода первой фазы была оставлена без изменения. Мощность печи повысилась до 6500 кВт со значительным перекосом фазовых токов: 22—30—35 кА.

Так как режим работы первой фазы остался без изменения, то и кривые силы тока и напряжения короткой сети сохранили свою форму.

Через 2 ч после пуска (рис. 141, г) снова была проведена регистрация падения напряжения в короткой сети. Во время записи мощность печи составляла 6700 кВт при фазовых токах 20—30—37 кА.

Как видно из рис. 141, г, в этом случае не отмечено существенных изменений в форме кривой по сравнению с первой осциллограммой (см. рис. 141, а).

Таким образом, в течение первых 2 ч первая фаза печи работала при почти постоянной величине тока 22 кА. Все это время электрод был незначительно погружен в шихту. Под электродом не создалось условий для нормального горения дуги. Ток в фазе был обусловлен в основном шихтовой проводимостью. Искажения, наблюдаемые на кривых тока, объясняются теми перемещающимися дугами, которые возникают между телом электрода и кусками оплавливающейся шихты.

В течение последующих 1,5 ч печь проработала без перерывов при средней мощности 7100 кВт и фазовых токах 22—35—35 кА. Фазовые напряжения за этот период также оставались крайне неравномерными, средние значения напряжений колебались около 105—60—110 В.

Через 3 ч 30 мин после пуска резко изменили режим (рис. 141, д). Печь остановили и были перепущены электроды на первой и второй

фазах. Перепуск длился 8 мин. Нагрузка печи после перепуска была снижена до 6200 кВт, на фазах поддерживались токи 20—30—30 кА и напряжения 100—70—110 В.

Запись кривых проводили через 22 мин после повторного включения печи (перепуска электродов). Помимо силы тока ($i = 22$ кА) и напряжения короткой сети, было зарегистрировано также фазовое напряжение ($u_{\phi} = 100$ В) (рис. 141, д).

Кривые силы тока и напряжения получили характерную для горения дуги форму. Особенно сильно искажена кривая падения напряжения в короткой сети. Кривая фазового напряжения имеет характерные затупления, приближаясь к трапецеидальной форме.

В момент записи осциллограммы мощность печи составляла 6100 кВт при токах 22—25—27 кА.

Следующая осциллограмма (рис. 141, е) была записана через 50 мин. В течение этого времени печь работала нормально без перерыва, но при пониженной мощности. Вычисленная по показаниям счетчика средняя часовая мощность составила 6400 кВт.

Несмотря на постепенную посадку электродов, мощность печи не давала заметного прироста.

В схему осциллографа было внесено некоторое изменение: контур падения напряжения был отключен и вместо него был подключен контур напряжения дуги. Кривые этой осциллограммы показывают явное улучшение теплового режима печи и вместе с тем режима горения дуги. Кривая тока на рис. 141, е, так же как и на рис. 141, д, имеет два максимума, но они здесь значительно сглажены.

Кривая напряжения дуги по форме весьма близко подходит к кривой силы тока; сдвиг фазы между кривыми силы тока и напряжения составляет всего несколько градусов, что указывает на незначительную индуктивность части контура от контактных плит до пода печи.

Через 6 ч после пуска печи была снята осциллограмма (рис. 141, ж). В течение всего промежутка времени между двумя последними записями печь работала нормально, без перерывов и ее среднечасовая мощность была доведена до 6800 кВт.

Ввиду того, что электрод первой фазы достаточно закоксувался, ток на ней был повышен до 24 кА при $u_{\phi} = 100$ В.

К моменту записи кривых мощность печи составила 7000 кВт при токах 24—35—35 кА и фазовых напряжениях 100—60—110 В.

Соотношения в сдвигах фаз между силой токов и напряжениями и здесь сохранились прежние. Кривые силы тока, напряжения дуги и напряжения фазы сохранили по две горбинки, но они настолько малы, что участки кривых около максимума без значительных погрешностей можно принять за прямые линии; у кривых силы тока и фазового напряжения прямолинейный участок почти параллелен оси абсцисс; у кривой напряжения дуги все еще заметен некоторый наклон, характеризующий изменение сопротивления дуги.

Затем печь была переведена на режим регулятора и простояла около 3 ч.

Повторное охлаждение привело к ухудшению режима работы печи и снижению ее мощности.

В течение 17 ч с момента окончания второго цикла испытания печь претерпела значительные тепловые колебания, обусловленные повторным обрывом торца электрода первой фазы. Но к концу этого периода ток первой фазы был доведен до 24—25 кА и следовало ожидать, что дуга под первой фазой будет гореть с той же характеристикой, какую она имела на рис. 141, ж. Для проверки этого случая была записана осциллограмма, приведенная на рис. 141, з (режим, близкий к нормальному).

В момент записи мощность печи составляла 7000 кВт при токах 25—33—35 кА. К осциллографу были приключены вибраторы тока, напряжения дуги и фазового напряжения.

Как и на осциллограмме 141, ж, кривые имеют почти трапецидальную форму. Отличие состоит только в том, что на осциллограмме рис. 141, ж еще наблюдались небольшие горбинки около углов — моменты повышения сопротивления дуги, здесь эти горбинки исчезли. Максимумы кривых на длительном промежутке почти постоянны и почти параллельны оси абсцисс. Только у кривой фазового напряжения заметен некоторый уклон.

Через 15 мин ток на первой фазе был повышен до 27 кА и была сделана новая запись (рис. 141, и). Мощность печи при записи составляла 7200 кВт при токах 27—35—35 кА. В кривых тока и напряжения дуги на этой осциллограмме не только не видно горбинок, которые характеризовали осциллограммы на рис. 141, ж и 141, з, но, наоборот, замечена тенденция появления выпуклости вверх, и форма этих кривых больше приближается к синусоидальной, чем предыдущих. Это объясняется тем, что тигель первой фазы начал работать в условиях, приближающихся к нормальному режиму, и условия ионизации газовой сферы тигля улучшились.

Дальнейшие наблюдения были перенесены с первой фазы на третью.

Так как третья фаза в течение всего предшествующего периода работала с полной нагрузкой, составлявшей 30—35 кА, то режим этой фазы можно рассматривать как нормальный для печи при плавке силикомарганца.

На осциллографе были оставлены те же вибраторы, которые использовали при испытаниях на первой фазе, т. е. силы тока, напряжения дуги и фазового напряжения.

Чтобы приблизиться к дуге, точку измерения от контактных плит перенесли непосредственно на тело электрода — на уровень поверхности шихты.

Осциллограмма на рис. 141, к была записана после 10 ч непрерывной работы печи (режим, близкий к нормальному).

В момент записи осциллограммы мощность печи составляла 7000 кВт при токах 25—35—35 кА и фазовых напряжениях 100—60—98 В.

Из рис. 141, к видно, что кривая силы тока и здесь несколько искажена. Так же как и на рис. 141, з, мы наблюдаем почти прямолинейный участок, параллельный оси абсцисс, но тут эта кривая

несколько искажена вблизи точки перехода через нуль. В целом же кривая, несомненно, ближе к синусоиде, чем на рис. 141, з.

Еще большая разница существует в кривых напряжения. Кривая напряжения дуги — почти чистая синусоида с незначительными искажениями у максимумов.

Для проверки формы кривых предыдущей осциллограммы через 25 мин были повторно записаны те же кривые (рис. 141, л). Во время записей мощность печи составляла 7200 кВт при токах 27—33—35 кА и фазных напряжениях 100—72—90 В (режим, близкий к нормальному).

Кривая силы тока, так же как и в предыдущем случае, незначительно искажена недалеко от точки перехода через нуль, прямолинейный же участок здесь меньше. Кривые напряжения тоже меньше искажены, чем кривая силы тока.

Последняя осциллограмма (рис. 141, м) была записана после того, как печь проработала непрерывно в течение 11 ч (режим, близкий к нормальному, $i = 35$ кА).

Этот срок следует считать достаточным для того, чтобы в тигле печи установился устойчивый тепловой режим. Поэтому режим, наблюдавшийся в это время, можно считать нормальным и типичным для работы печи при выплавке силикомарганца.

Как видно, кривые силы тока и напряжения в этой осциллограмме искажены гораздо меньше, чем в предыдущем случае.

Значительно позднее на этой же печи (после ее реконструкции) было проведено осциллографирование в процессе снятия материальных и энергетических балансов. На рис. 141, н приведена осциллограмма, снятая за 10 мин до слива сплава. Перед осциллографированием печь длительно работала в устойчивом тепловом режиме. Кроме силы тока, напряжения фазы и напряжения дуги, была зарегистрирована третья гармоника смещения нулевой точки. Как видно, кривые тока и напряжения дуги, показанные на рис. 141, м и н, почти идентичны и близки к синусоиде, но наличие третьей гармоники показывает, что в печи дуга существует. Однако по своей величине третья гармоника незначительна; при амплитуде фазового напряжения 130 В ее амплитуда составляет всего 3 В.

Проследив за ходом кривых тока и напряжения дуги, видим, что с улучшением теплового режима работы печи кривые силы тока и напряжения дуги сглаживаются и приближаются к синусоидальной форме. Наоборот, с ухудшением теплового режима форма кривых искажается и чем хуже тепловое состояние печи, тем сильнее искажение кривых.

При оценке кривых силы тока следует иметь в виду, что приведенные осциллограммы характеризуют суммарный ток, состоящий из тока шихтовой проводимости и тока дуги. Но ток шихтовой проводимости по форме подобен напряжению дуги. Сравнивая форму кривых i и u_d , видим, что они довольно близко подходят друг к другу и, следовательно, кривая силы тока не имеет существенных искажений. При всех опытах дуга горела непрерывно и без значительных пауз.

Дуга в карбидных печах

1. Параметры исследованных печей

Исследование дуги при выплавке карбида кальция было проведено на печах трех типов. Номинальная мощность трансформатора одних печей составляет 5000, мощность других 7500 и третьих 40 000 кВА. Номинальное напряжение печей первых двух типов с высокой стороны равно 6,3 кВ. Ванны печей обоих типов четырехугольные, электроды расположены в ряд. Для выпуска карбида в печах предусмотрено по три летки. Печи работают на самоспекающихся электродах. У печей мощностью 7500 кВА диаметр электродов может меняться в пределах 100—110, а у малых печей — 75—80 см.

Трансформаторы печей средней мощности имеют пять ступеней напряжения, что позволяет регулировать напряжение с низкой стороны печи от 100 до 132 В. Напряжение каждой фазы регулируется независимо от других фаз. Схема соединения трансформатора: треугольник — звезда. В табл. 15 приведены номинальные данные ступеней напряжения трансформаторов.

ТАБЛИЦА 15

**ХАРАКТЕРИСТИКА СТУПЕНЕЙ
НАПЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ПЕЧЕЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

Номер ступени напряжения	Сила тока на высокой сторо- не А	Мощность, кВА	На низкой стороне	
			напря- жение, В	сила то- ка, кА
1	630	6800	100	39,8
2	687	7500	109	39,8
3	687	7500	116	37,4
4	687	7500	124	34,9
5	687	7500	132	32,8

ТАБЛИЦА 16

**ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУПЕНЕЙ
НАПЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ
МАЛЫХ ПЕЧЕЙ**

Номер ступени напряжения	Сила тока на высокой сторо- не, А	Мощность, кВА	На низкой стороне	
			напря- жение, В	сила то- ка, кА
1	302	3300	77,7	24,6
2	302	3300	82,1	23,2
3	458	5000	86,9	33,2
4	458	5000	92,5	31,3
5	458	5000	98,7	29,3
6	458	5000	103,4	27,9
7	458	5000	108,6	26,6
8	458	5000	114,3	25,8

На трансформаторах малых печей предусматривают восемь ступеней напряжения с диапазоном регулирования напряжения от 77,7 до 114,3 В. Эти трансформаторы соединены по схеме треугольник — звезда. В табл. 16 приведены характеристики ступеней напряжения этих трансформаторов.

Конструктивно короткие сети печей обоих типов выполнены различно и их электрические параметры достаточно сильно отличаются друг от друга (табл. 17, 18).

У печей средней мощности индуктивное сопротивление приблизительно на 20% больше, чем у малых, активные же сопротивления печей этих обоих типов примерно равны.

Футеровка ванны и тепловые условия ее работы приблизительно такие же, как в рассмотренных выше ферросплавных печах.

По электрическим параметрам, приведенным в табл. 17 и 18, можно построить нагрузочные характеристики печей.

ТАБЛИЦА 17

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ПЕЧЕЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

Наименование участка	Реактивное сопротивление		Активное сопротивление	
	мОм	%	мОм	%
Трансформатор	0,247	21,0	0,034	17,3
Ошинка	0,702	59,8	0,080	40,6
Контакт электрод—плита	—	—	0,036	18,4
Электрод	0,226	19,2	0,046	23,7
Всего	1,175	100,0	0,196	100,0

ТАБЛИЦА 18

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
МАЛЫХ ПЕЧЕЙ**

Наименование участка	Реактивное сопротивление		Активное сопротивление	
	мОм	%	мОм	%
Трансформатор	0,059	6,13	0,026	12,70
Ошинка	0,698	72,47	0,097	47,35
Контакт электрод—плита	—	—	0,036	17,55
Электрод	0,206	21,40	0,046	22,40
Всего	0,963	100,00	0,205	100,00

На рис. 142, а—е даны характеристики печи средней мощности. Первые пять диаграмм относятся к пяти ступеням печи (100—132 В) при номинальном напряжении с высокой стороны трансформатора 6300 В, последняя диаграмма характеризует пятую ступень при повышении напряжения на 5% (с высокой стороны — 6600, а с низкой — 138 В).

На диаграммах построены кривые подведенной мощности P , мощности электрических потерь в контуре P_k , полезной электрической мощности, или мощности нагрузки P_n , электрического к. п. д. η_z . Наряду с этими электрическими характеристиками построены также тепловые и технологические характеристики (тепловые потери ванны $P_{п.т}$, мощность, расходуемая непосредственно на технологические цели, P_T , производительность печи G , полный энергетический к. п. д. печи η_T и, наконец, удельный расход электроэнергии A). При построении этих кривых тепловые потери ванны и технологический удельный расход электроэнергии приняты постоянными ($P_{п.т} = 1250$ кВт, $A_T = 2000$ кВт·ч/т).

Из этих кривых видно, что на первых трех ступенях напряжения печь не может быть использована ни по току, ни по мощности, ни по расходу электроэнергии.

ТАБЛИЦА 19

ПОКАЗАТЕЛИ КАРБИДНОЙ ПЕЧИ
СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ
ПРИ НОМИНАЛЬНЫХ ТОКАХ

Номер ступени	Напряжение ступени, В	Номинальный ток, кА	Подведенная мощность, кВт	Полезная мощность, кВт	К. п. д.	cos φ
I	100	39,8	4000	3000	0,75	0,56
II	109	39,8	5000	4200	0,84	0,63
III	116	37,4	5700	4800	0,85	0,75
IV	124	34,9	6200	5500	0,89	0,76
V	132	32,8	6300	5700	0,91	0,87
	138	32,8	6700	6100	0,92	0,90

ТАБЛИЦА 20

МАКСИМАЛЬНЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ
МОЩНОСТИ СТУПЕНЕЙ
НАПРЯЖЕНИЯ КАРБИДНОЙ ПЕЧИ
СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Номер ступени	Напряжение ступени, В	Ток на низкой стороне при максимальной полезной мощности, кА	Максимальная полезная мощность, кВт	Соответствующая подведенная мощность, кВт
I	100	31,8	3612	4200
II	109	34,7	4280	5000
III	116	36,7	4860	5652
IV	124	39,4	5540	6450
V	132	42,1	6290	7325
	138	43,8	6860	7975

В табл. 19 приведены показатели работы печи при номинальном токе. Из таблицы видно, что при номинальном токе номинальную мощность можно получить только на четвертой и пятой ступенях напряжения. Еще более эффективной является работа на пятой ступени при повышении напряжения на 5%, т. е. до 138 В.

В табл. 20 приведены максимальные мощности отдельных ступеней печи. Эта таблица также показывает, что номинальная подведенная мощность достижима только на четвертой ступени и то при перегрузке по току. Поэтому с электротехнической точки зрения наиболее подходящей является пятая ступень при номинальном напряжении сети или, еще лучше, при повышении напряжения на 5%.

Рассмотрим теперь малую карбидную печь.

Невыгодность работы печи на первых двух ступенях настолько очевидна, что их характеристики не приведены.

На рис. 143, а—г даны характеристики третьей, шестой, седьмой и восьмой ступеней. При построении этих характеристик принято $P_{п.т} = 1000$ кВт, $A_t = 2000$ кВт·ч/т, так же как и в предыдущем случае.

На рис. 143, а видно, что при напряжении ступени 86,9 В подведенная мощность при номинальном токе 33,2 кА лежит на точке перегиба, а полезная мощность — за точкой перегиба; следовательно, и эта ступень не может обеспечить нормальной работы печи при номинальной мощности. В табл. 21 приведены показатели работы печи при номинальных токах, а в табл. 22 максимальные мощности отдельных ступеней.

Помимо параметров короткой сети, номинальная мощность печи определяется еще такими факторами, как мощность трансформатора, сечение шин, размеры ванны и т. д.

На рис. 143, д приведены нагрузочные характеристики малой печи на последней ступени при повышении напряжения сети на 5%.

Из этих кривых видно, что с электротехнической точки зрения короткая сеть этой печи обладает большим запасом и может быть использована на более высоких мощностях.

Электрическое обследование одной из крупнейших карбидных печей с трансформатором мощностью 40 000 кВА проведено группой сотрудников одной из лабораторий электротехники карбидного производства Б. М. Струнским, Я. Б. Данцисом и др.

Ванна печи прямоугольной формы футерована шамотом; на подине, кроме этого, имеются слой сажи и угольные блоки. Внутрен-

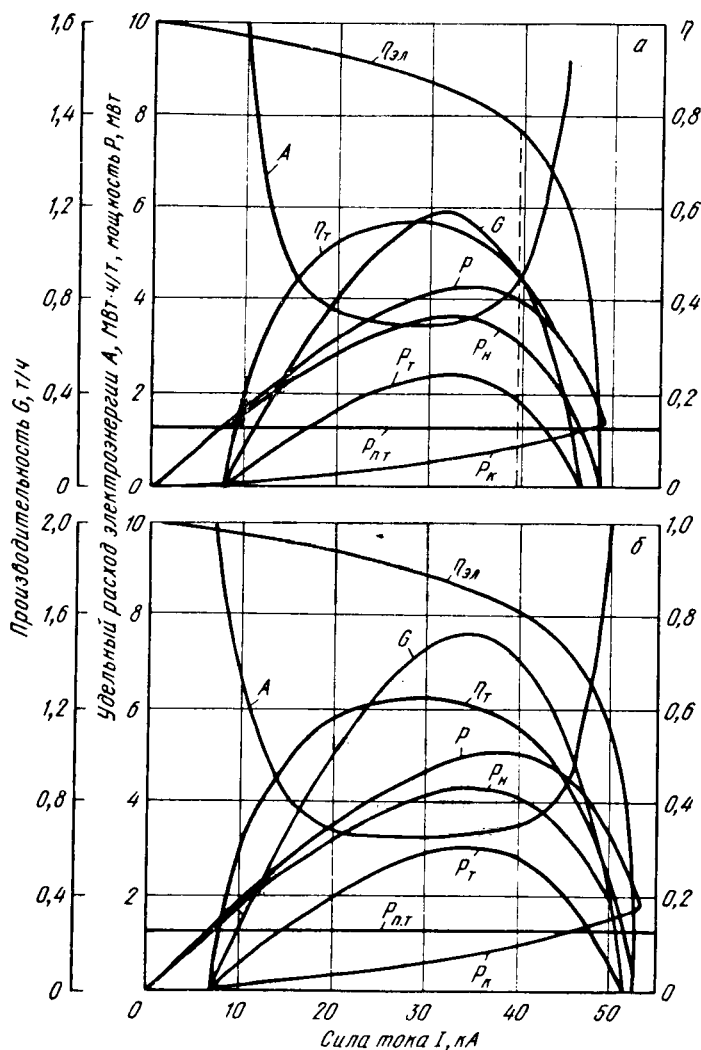


Рис. 142. Нагрузочные характеристики карбидной печи мощностью 7500 кВА при различных ступенях напряжения, В:
а — 100; б — 109;

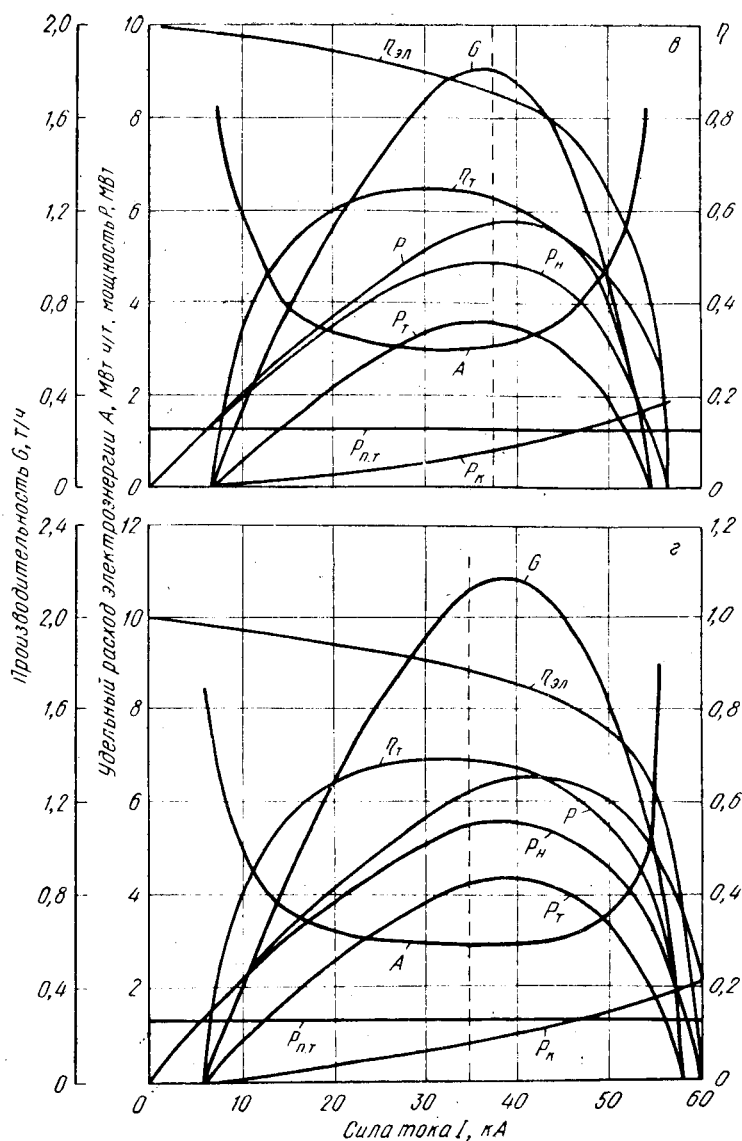


Рис. 142. Продолжение
б — 116; г — 124;

ние размеры печи 8800×6800 мм. В печи установлены три самоспекающихся электрода овальной формы, которые расположены в ряд с расстоянием между осями 2400 мм.

Питание печи осуществляется от специального печного трансформатора фирмы «Сименс—Шуккерт», состоящего из трех отдельных трехфазных трансформаторов, заключенных в общий кожух.

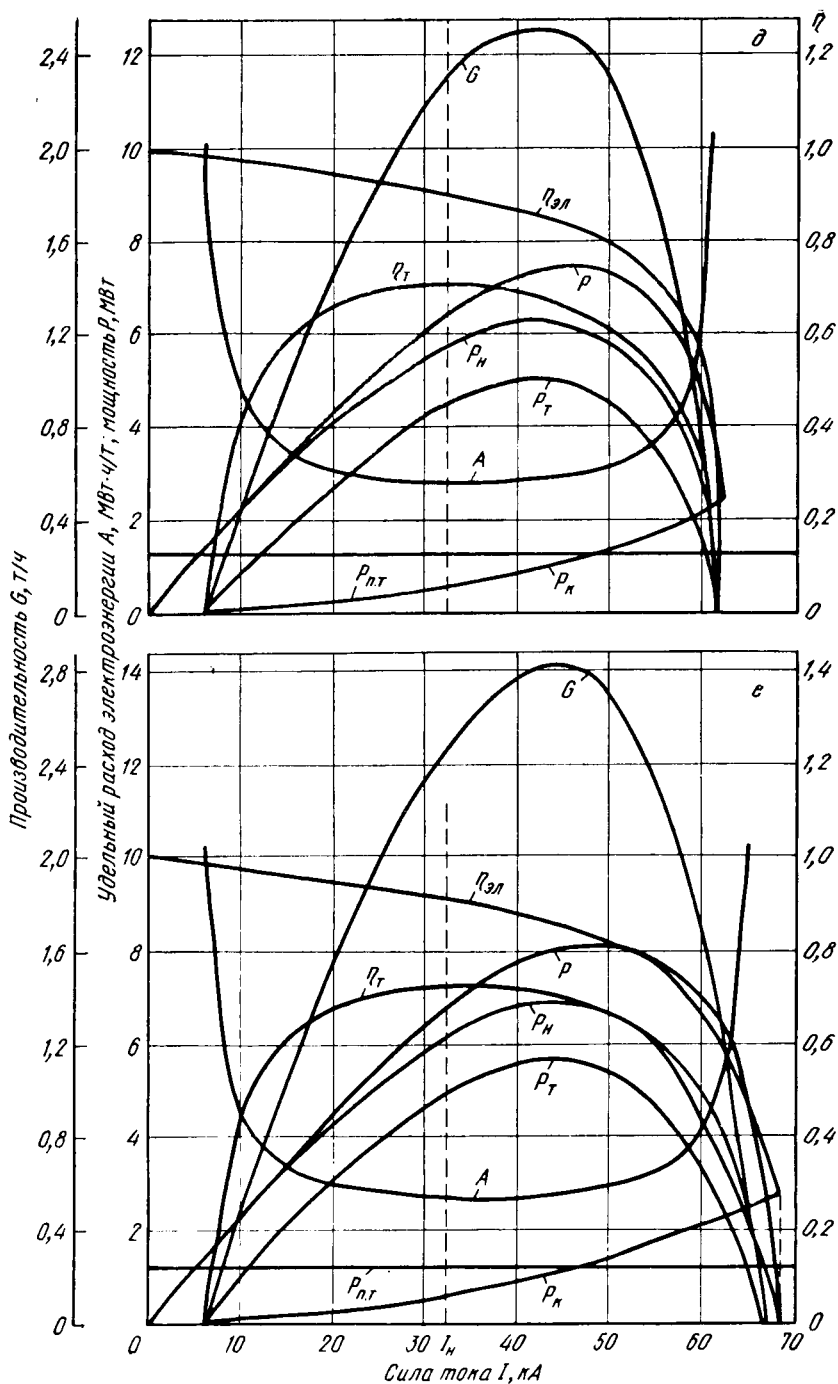


Рис. 142. Продолжение:
 д — 132; е — 138

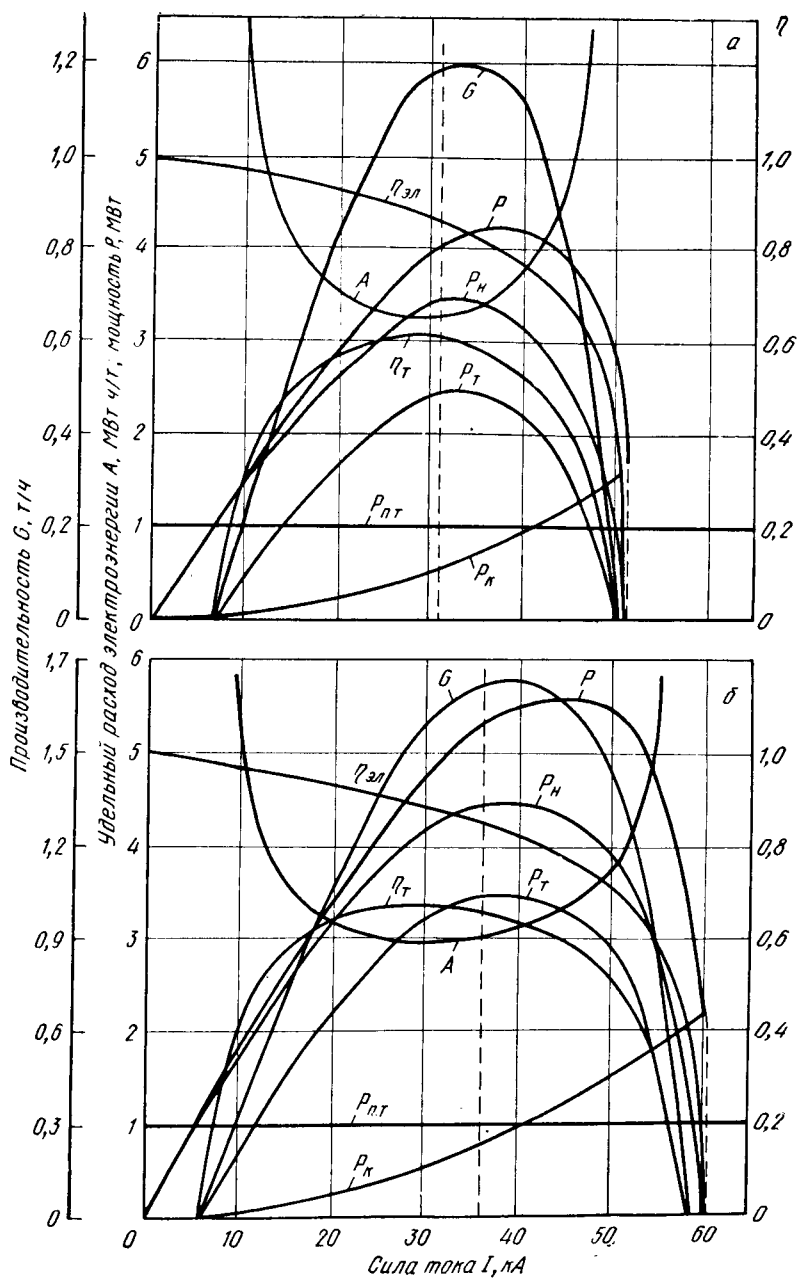


Рис. 143. Нагрузочные характеристики карбидной печи мощностью 500 кВА при разных ступенях напряжения, В:
 а — 86,9; б — 103,4;

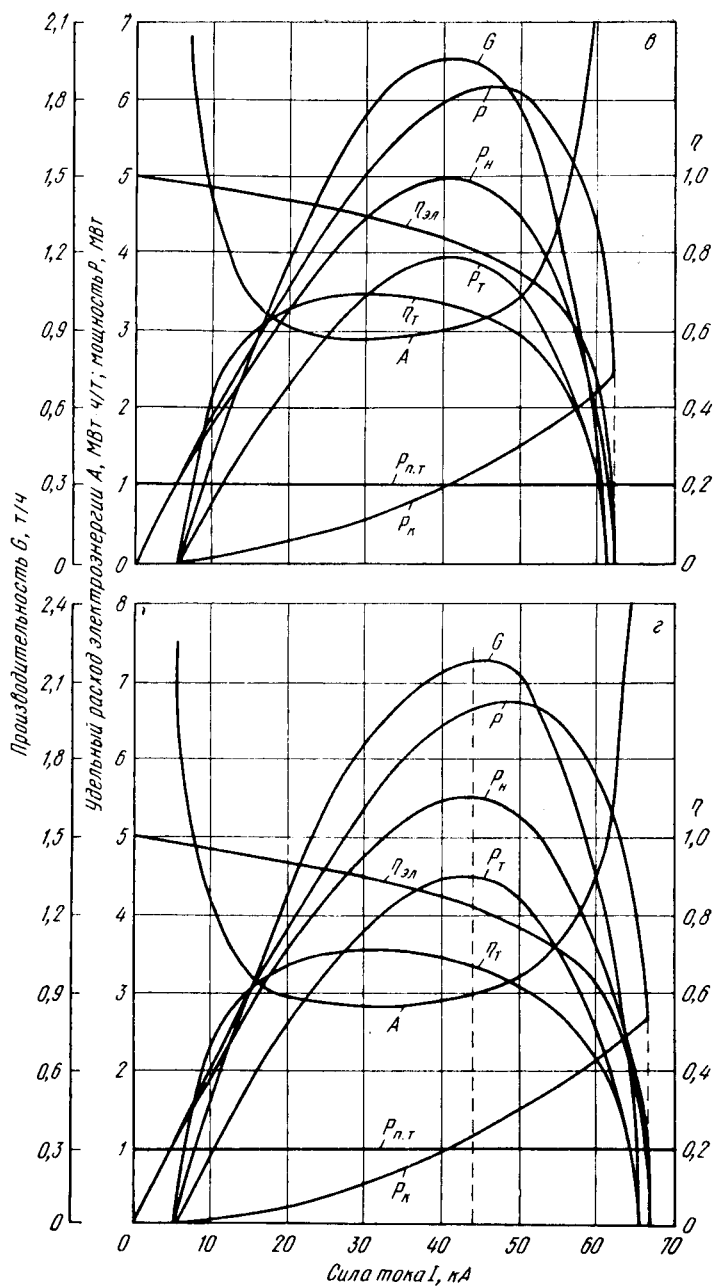


Рис. 143. Продолжение
 б — 108,6; г — 114,3;

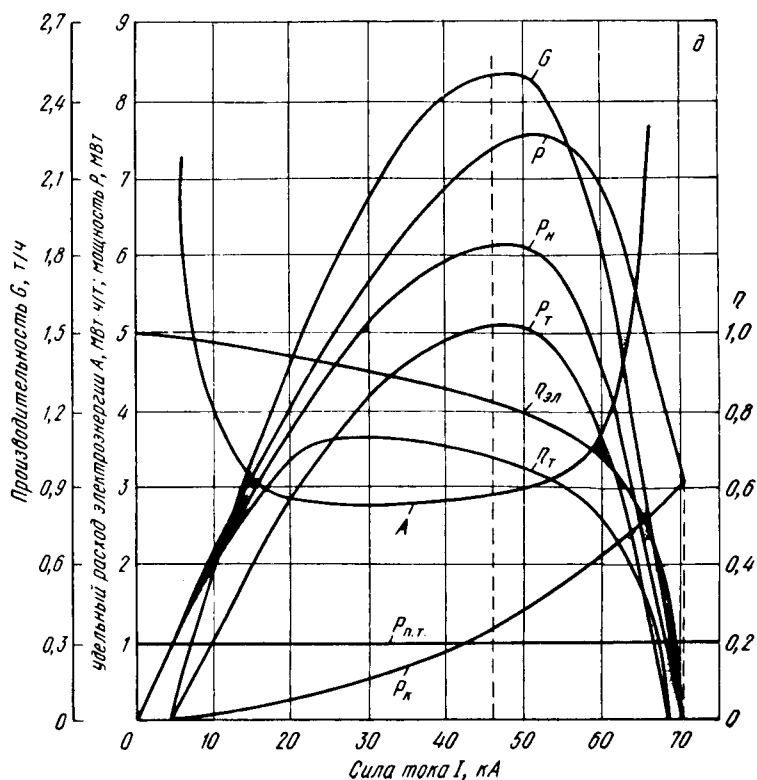


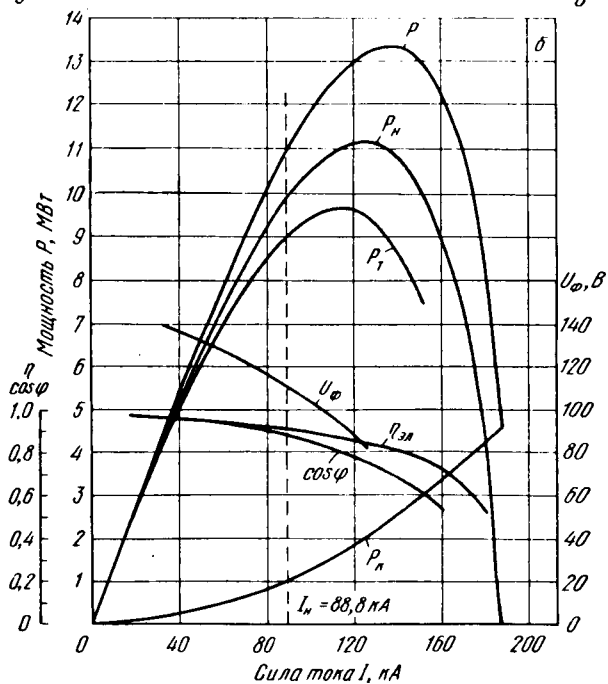
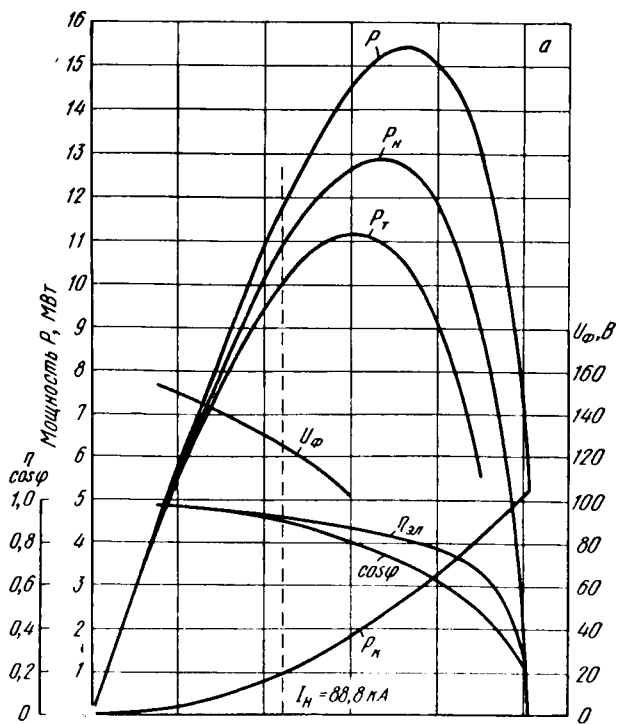
Рис. 143. Продолжение:
 а — 120

ТАБЛИЦА 21
 ПОКАЗАТЕЛИ МАЛОЙ КАРБИДНОЙ
 ПЕЧИ ПРИ НОМИНАЛЬНЫХ ТОКАХ

Напряжение ступени, В	Номинальный ток, кА	Подведенная мощность, кВт	Полезная мощность, кВт	К. п. д.	cos φ
86,9	33,2	4320	3550	0,83	0,78
103,4	27,9	4650	4190	0,88	0,86
108,6	26,6	4940	4540	0,92	0,90
114,3	25,8	5000	4660	0,93	0,93
120,0	24,0	5250	4920	0,94	0,95

ТАБЛИЦА 22
 МАКСИМАЛЬНЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ
 МОЩНОСТИ СТУПЕНЕЙ
 НАПРЯЖЕНИЯ МАЛОЙ КАРБИДНОЙ
 ПЕЧИ

Напряжение ступени, В	Ток на низкой ступени при максимальной полезной мощности, кА	Максимальная полезная мощность, кВт	Соответствующая подведенная мощность, кВт
86,9	31,0	3540	4200
103,4	36,0	4840	5700
108,6	40,0	5440	6550
114,3	44,0	6120	7300
120,0	45,0	6800	8100



Напряжение на высшей стороне трансформатора 31,5 кВ, сила тока 733 А. Трансформатор позволяет проводить плавную регулировку напряжения с низшей стороны 48 ступенями от 260 до 130 В. Номинальный вторичный ток составляет 8800 А.

Электрические параметры большой карбидной печи приведены в табл. 23 для одной из фаз.

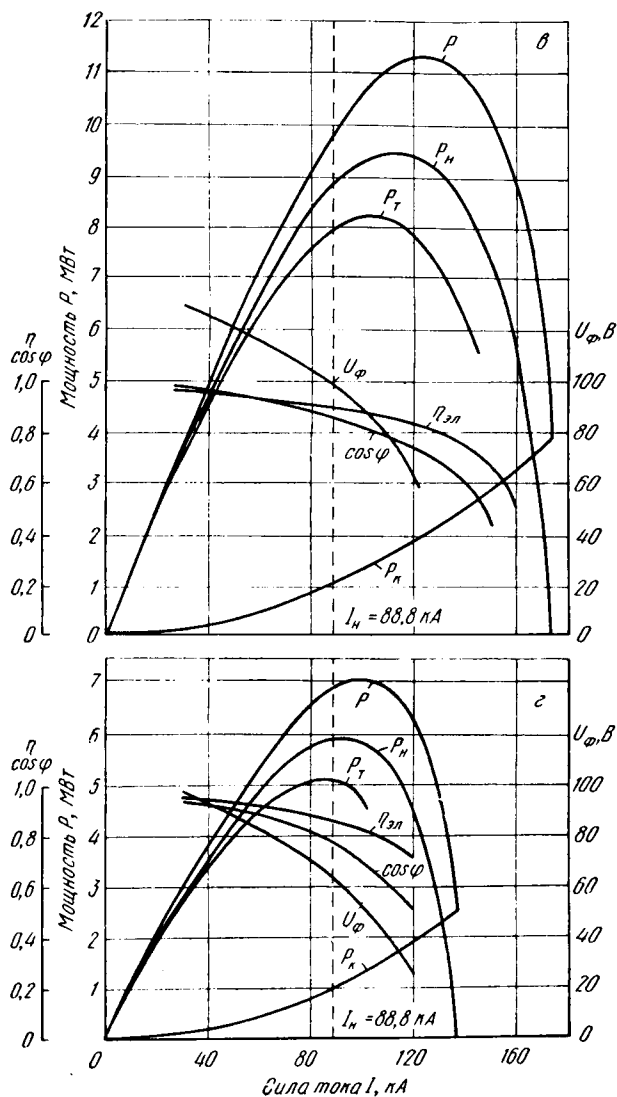


Рис. 144. Электрические характеристики одной фазы печи:

Ступень	а	б	в	г
$U_{л}/U_\phi$, В	260/150	271,5/139,4	222/128,7	176,4—101,8

ТАБЛИЦА 23

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОДНОЙ ФАЗЫ БОЛЬШОЙ
КАРБИДНОЙ ПЕЧИ

Наименование участка	Реактивное сопротивление		Активное сопротивление	
	МОм	%	МОм	%
Трансформатор	0,100	13,5	0,026	20,1
Ошиновка	0,210	28,4	0,015	11,6
Контакт щетка—электрод } Электрод }	0,430 *	58,1	0,024 0,064	18,6 49,7
В с е г о	0,74	100	0,129	100

* Вместе с ванной.

Изучение электрических параметров позволило построить электрические характеристики для каждой фазы печи на всех ступенях напряжения трансформатора.

На рис. 144, а—г показаны характеристики для фазы II (U_{ϕ}) на различных ступенях при соответствующих значениях вторичных линейных напряжений $U_{\text{л}}$. Аналогичные характеристики построены для других фаз и других значений напряжения.

Анализ электрических характеристик показал, что для работы печи с максимальной полезной мощностью, максимальным использованием трансформатора с высоким коэффициентом мощности и к. п. д. подходят следующие ступени трансформатора:

Фаза	I	II	III
Ступень трансформатора	1—13	1—6	1—14
Линейное напряжение $U_{\text{л}}$, В	260—220	260—245	260—220

При этом наименьший коэффициент мощности равен 0,85, а электрический к. п. д.—0,9.

Выбор ступеней напряжения выполняют с учетом следующих соображений: а) нагрузка фаз по току должна быть одинаковой и равной максимальному току трансформатора 8800 А; б) полезная мощность фаз печи должна быть примерно одинаковой. Учитывая повышенные тепловые потери крайних фаз, а также перенос мощности, напряжение должно обеспечивать примерно одинаковую мощность I и III фаз и мощность II фазы на 200—500 кВт ниже их уровня.

2. Специфические особенности производства карбида кальция

Расход сырья на 1 т карбида кальция составляет около 1,6 т, а расход электроэнергии примерно 2600—2800 кВт·ч/т сплава. Оборачиваемость шихты в печи высокая: в течение 1 ч в печи мощ-

ностью 7500 кВа перерабатывается около 3,5 т шихты, а в малой печи 2 т.

Температура плавления основного компонента шихты — окиси кальция равна 2600°C , температура испарения 2800°C . Технический карбид кальция содержит $\sim 15\%$ окиси кальция и имеет довольно высокую точку плавления.

При выпуске из печи температура карбида кальция составляет около $1900\text{—}2000^{\circ}\text{C}$. Вязкость карбидного сплава также высока, поэтому при понижении температуры сплав быстро застывает и выпуск задерживается.

Все это показывает, что температура в тигле карбидной печи всегда должна быть высокой.

При понижении температуры резко сокращается производительность печи.

Так как карбиду свойственна высокая вязкость, то стенки тигля печи должны обладать достаточно высокой устойчивостью.

3. Дуга в карбидной печи в установившемся режиме

А. Общие замечания

В период, предшествовавший испытаниям, печь с трансформатором мощностью 7500 кВА работала неудовлетворительно. При номинальной мощности печи 6500—6800 кВт средняя мощность печи за календарное время составляла ~ 4600 , а за рабочее время ~ 5500 кВт.

Так как мощность печи регулируется смещением электродов, то при ее уменьшении электроды располагают высоко; вследствие этого увеличивается длина дуги и тигель ванны вытягивается в высоту. Уменьшение мощности (при заданном напряжении) приводит к удлинению дуги и к снижению силы тока, что весьма неблагоприятно отражается на тепловом режиме тигля ванны и на устойчивости горения дуги.

Еще более неблагоприятное влияние на режим горения дуги оказывают остановки печи. При выключении печи дуга гаснет, температура газовой сферы тигля резко падает, а сам тигель деформируется. Чтобы восстановить режим нормального горения дуги, необходимо восстановить нормальные температурные условия в тигле и его форму.

В первый день наблюдений печь работала почти без перебоев при средней мощности 6170 кВт.

Несмотря на такую высокую среднюю мощность, удельный расход электроэнергии получился весьма высоким из-за плохого качества шихты. Известь, подаваемая в печь, содержала большое количество мелочи и пыли, что, естественно, привело также к увеличению диссоциации карбида и уносу шихты.

На следующий день режим работы печи ухудшился. За сутки было три простоя печи общей длительностью 50 мин. Кроме того, в течение 8,5 ч печь работала в режиме потребителя-регулятора при средней мощности 4600—5500 кВт. В результате этого средняя

мощность печи составила 5830 кВт. Соответственно возрос и удельный расход электроэнергии. Качество шихты за эти сутки также было низким.

На третий день показатели печи несколько улучшились. Мощность печи была повышена до 6300 кВт. Но за эти сутки увеличились простои печи. Всего было четыре простоя общей длительностью 2 ч 50 мин. Вследствие этих простоев суточный расход энергии уменьшился и средняя рабочая мощность печи составила 6250 кВт. Несмотря на значительные простои и низкое качество извести, благодаря высокой рабочей мощности и, следовательно, глубокой посадке электродов, удельный расход энергии по сравнению с предшествующими сутками уменьшился.

В дальнейшем показатели работы печи также были достаточно высокими. Средняя мощность печи была 6100 кВт, а простои составили всего 40 мин. В этот день печь была переведена со ступеней 4—4—5 на ступени 3—3—4, т. е. с линейных напряжений 124—124—132 В на напряжение 116—116—124 В.

После окончания испытаний печь была остановлена для обратного перевода на высокие ступени.

Б. Первый цикл испытаний

Печь к моменту испытаний характеризуется следующим тепловым режимом.

В течение почти 9 ч печь работала бесперебойно и мощность ее составляла ~ 6300 кВт; следовательно, печь находилась в довольно устойчивом тепловом режиме. Затем, в течение почти 2,5 ч она была отключена, и режим ее несколько ухудшился. Через час она еще раз была включена на 40 мин. До начала испытаний в течение 3,5 ч печь работала бесперебойно, и режим ее постепенно начал восстанавливаться. Перед снятием первой осциллограммы мощность печи была снижена на 10 мин до 4500—5000 кВт.

В целом тепловой режим печи перед испытаниями следует характеризовать как неустановившийся. Поэтому в кривых силы тока и напряжения печи следовало ожидать значительных искажений.

Испытания были начаты с фиксации токов и напряжений с высокой стороны трансформатора (рис. 145, *a—ж*).

Как видим, кривые силы тока с высшей стороны трансформатора незначительно искажены и весьма близко подходят к синусоиде. Кривые линейных напряжений, наоборот, значительно искажены.

После этого одновременно были зафиксированы линейные и фазные напряжения с низшей стороны трансформатора. На рис. 145, *б* приведена одна из нескольких снятых подряд осциллограмм.

Как видно из рис. 145, *б* все шесть кривых искажены. Но искажения фазовых напряжений гораздо больше, чем линейных. Кривые фаз *б* и *с* искажены больше, чем кривая фаза *а*. Это показывает, что фаза *а* в тепловом отношении находилась в лучшем положении, чем две остальные фазы.

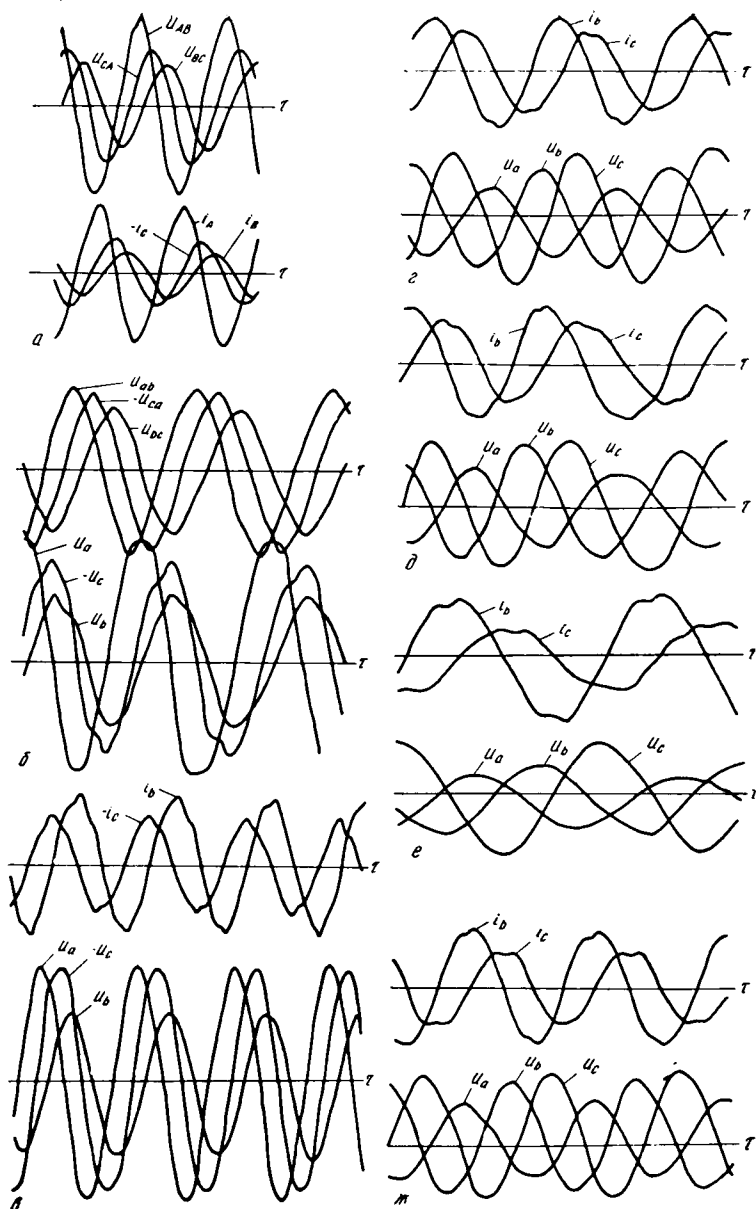


Рис. 145. Осциллограммы, карбидной печи мощностью 7500 кВА (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} — линейные напряжения $U_{л}$ с высшей стороны трансформатора; u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} — то же, с низшей стороны трансформатора; i_A , i_B , i_C — фазовые напряжения $U_{ф}$ с высшей стороны трансформатора; i_a , i_b , i_c — то же, с низшей стороны трансформатора):

а — токи и напряжения на высшей стороне трансформатора; *б* — то же, на низшей стороне трансформатора; *в* — фазные токи и напряжения через 7 мин после включения печи; *г* — то же, через 1 ч после включения печи; *д* — то же, через 20 ч после включения печи; *е* — то же после перепуска электрода фазы *с*; *ж* — то же после подачи под электроды извести

После снятия еще нескольких осциллограмм напряжений, давших идентичные результаты, линейные напряжения были отключены и вместо них на осциллограф были поданы токи с низкой стороны трансформатора II и III фаз.

Таким образом, на осциллограммах следующей серии зафиксированы фазовые напряжения всех трех фаз и фазовые токи фаз *b* и *c* с низкой стороны.

На рис. 145, *в* представлена первая осциллограмма этой серии.

Как видим, кривые фазовых напряжений и на этой осциллограмме имеют примерно такую же конфигурацию, как и на предыдущем рисунке.

Кривые фазовых токов также искажены. Обе кривые силы тока имеют по два пика. Кроме того, на кривых можно заметить еще одну горбинку на восходящей части кривой. Все это показывает наличие у кривой тока значительных высших гармоник.

Если примем во внимание, что эти кривые представляют суммарный ток дуги и шихтовой проводимости, то приходим к выводу, что кривая силы тока дуги должна быть искажена довольно сильно.

Следующая осциллограмма (рис. 145, *г*) была снята через 1 ч 17 мин после пуска печи.

В течение всего этого промежутка времени на печи поддерживалась мощность порядка 6300—6400 кВт.

Осциллограмма была снята сейчас же после слива со второй фазы. Слив был затруднен, карбид шел медленно и плохо, а колошник печи был беспокоен.

При этих условиях кривые силы тока и напряжения сохранили приблизительно ту же форму, которую они имели в предыдущем случае.

Повторные осциллограммы показали постепенное выравнивание режима работы печи.

На рис. 145, *г* показана осциллограмма, снятая после пуска печи и по окончании слива с «мертвой» фазы.

Режим работы печи в это время был неблагоприятным, так как шихтовой материал был недоброкачественным (известь содержала много мелочи и пыли).

Несмотря на эти неблагоприятные факторы, кривые силы тока и напряжения к этому времени несколько сгладились.

У кривых силы тока заметны по два пика за полпериода, но они выражены менее резко. Кривые фазных напряжений также значительно сглажены и в меньшей степени отступают от синусоиды; особенно это относится к фазе *a*.

Через 20 ч после пуска мощность печи была повышена до 6600 кВт. Осциллограмма рис. 145, *д* была снята сейчас же после повышения мощности печи. Шихта оставалась недоброкачественной, известь содержала много пыли, особенно у фазы *c*.

Несмотря на это, из осциллограммы видно, что увеличение мощности благоприятно отразилось на форме кривых токов и напряжений. Действительно, кривые рис. 145, *д* ближе к синусоиде, чем кривые рис. 145, *г*.

Следующая осциллограмма (рис. 145, *е*) была снята через 25 мин во время перепуска электрода на фазе *с*.

Отметим тут же значительный перекося фазовых напряжений. При линейных напряжениях ~ 120 В напряжение фаз было следующим: «мертвой» (с пониженной мощностью) — 60, средней — 66 и «дикой» (с повышенной мощностью) — 90 В.

Как видно из рис. 145, *е*, кривые силы токов и напряжений по форме довольно близко подходят к кривым рис. 145, *д*.

После этого было несколько ухудшено обслуживание печи; на фазу *б* уменьшили подачу шихты, но на фазу *а* для корректировки было подано около двадцати лопаток извести.

Неблагополучное состояние на фазе *б* отразилось и на ходе кривых. Это видно из осциллограмм рис. 145, *ж*, снятых в момент перепуска.

Кривые тока фазы *б* на рис. 145, *ж* искажены больше, чем на предыдущих осциллограммах.

В. Второй цикл испытаний

После первого цикла испытаний печь работала без простоев, но мощность ее подвергалась частым изменениям.

К 12 ч следующего дня на печи установился более или менее ровный режим при мощности 6300 кВт и были проведены последующие записи осциллограмм.

Сначала были сняты только фазные токи — все три тока с высшей стороны трансформатора и токи фаз *б* и *с* с низшей стороны. На рис. 146, *а* представлена одна из этих осциллограмм. Кривые силы токов с высшей стороны трансформатора имеют довольно гладкую форму. Более или менее заметные искажения наблюдаются только на одной фазе.

Затем на осциллографе были записаны кривые силы токов i_a, i_b и напряжений u_b, u_c с низкой стороны и тока i_B с высокой стороны.

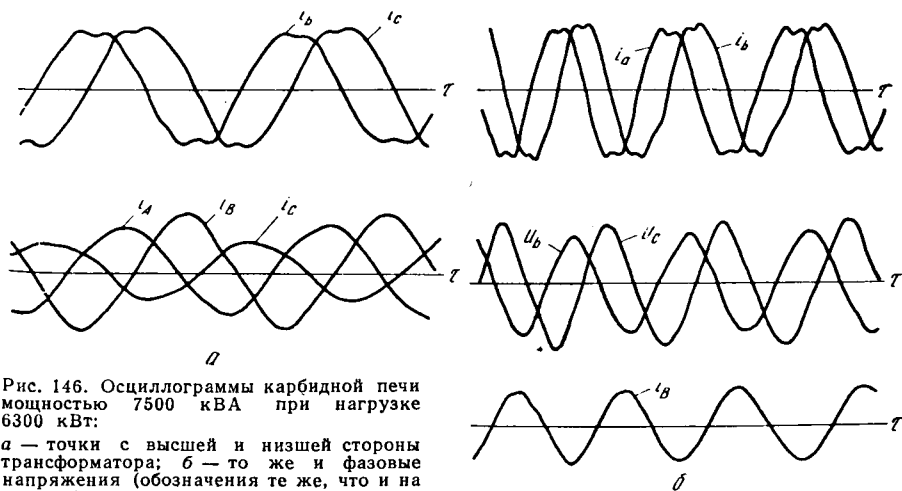


Рис. 146. Осциллограммы карбидной печи мощностью 7500 кВА при нагрузке 6300 кВт:

а — точки с высшей и низшей стороны трансформатора; *б* — то же и фазовые напряжения (обозначения те же, что и на рис. 145)

Таким образом, была получена возможность одновременно регистрировать токи с высшей и низшей сторон и напряжение с низшей стороны для фазы b .

На рис. 146, b представлена одна из осциллограмм, снятых по этой схеме. Как видно, кривые силы токов с низкой стороны трансформатора имеют довольно сильное искажение и близко подходят к кривым рис. 146, a . Ток с высокой стороны трансформатора, как и следует, искажен меньше. На кривой напряжения фазы b явно заметны искажения, между тем как кривая напряжения «дикой» фазы очень близка к синусоиде. Это указывает на то, что условия горения дуги на «дикой» фазе в момент снятия осциллограммы были благоприятнее, чем на средней фазе. Отметим, что эта осциллограмма была снята перед сливом с фазы c и, следовательно, тигель этой фазы был заполнен жидким сплавом, что, несомненно, создало благоприятные температурные условия для горения дуги.

Все предыдущие осциллограммы были сняты при ступенях напряжения 124—124—132 В. После снятия осциллограммы рис. 46, b печь была остановлена и переведена на ступени напряжения 116—116—124 В.

Сейчас же после включения печи была снята осциллограмма рис. 147.

Сравнение ее с рис. 146, b приводит к выводу, что при переходе на более низкие ступени напряжения не вносятся существенных изменений в форму кривых силы тока и напряжения.

Следующая группа осциллограммы была снята для проверки поведения печи во время слива карбида кальция.

Цепи измерения токов с высокой стороны были отключены и вместо них включены цепи измерения фазных напряжений и токов всех трех фаз с низкой стороны.

На рис. 148 показана одна из осциллограмм этой серии. Как видно, процесс слива оказывает очень сильное влияние на форму

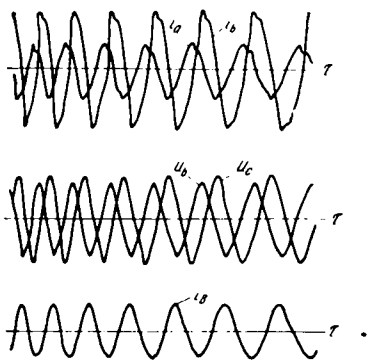


Рис. 147. Осциллограммы карбидной печи мощностью 7500 кВА при линейных напряжениях 116 В, 116 В и 124 В (обозначения те же, что на рис. 145)

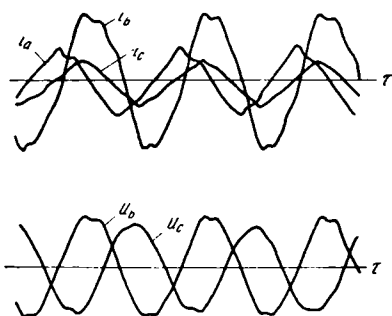


Рис. 148. Осциллограмма карбидной печи мощностью 7500 кВА во время слива (обозначения те же, что на рис. 145)

кривых тока и напряжения. Особенно велико влияние слива на кривые напряжения. Кривая напряжения фазы b , с которой выполняли слив, получила почти трапецеидальную форму, но и кривая напряжения соседней фазы искажена значительно больше, чем на рис. 147.

Целью следующей серии осциллограмм было выяснение формы кривых отдельных компонентов фазного напряжения с низкой стороны.

Первая часть этих испытаний была проведена на «дикий» фазе, а вторая — на «мертвой».

К двум вибраторам осциллографа были подключены контуры токов средней и «дикий» фаз, а к третьему — фазное напряжение «дикий» фазы.

К четвертому вибратору было подведено напряжение между нулевой точкой печи и электродом у поверхности шихты. Напряжение между этими точками незначительно отличается от напряжения дуги, так как падение напряжения в самом электроде от поверхности шихты до его торца невелико. Таким образом, этим вибратором измерялось напряжение дуги фазы c .

Пятый вибратор был подключен между компенсатором на выводе трансформатора и электродом у поверхности шихты, и, следовательно, он измерял напряжение на всей короткой сети фазы c .

На рис. 149, a приведена одна из осциллограмм этой группы.

Мощность печи в момент ее снятия составляла 6200 кВт, фазное напряжение 84 В, напряжение дуги — 77,5 В, падение напряжения на короткой сети — 25 В.

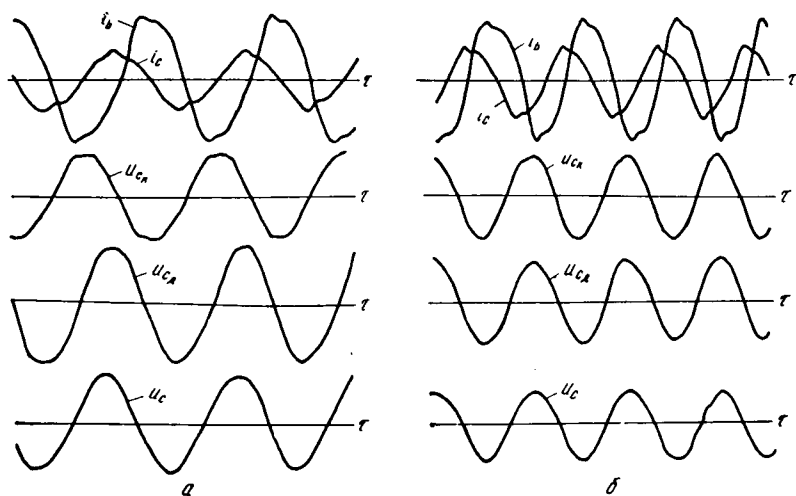


Рис. 149. Осциллограммы силы токов и напряжений карбидной печи мощностью 7500 кВА, снятые на «дикий» фазе:

a — в момент начала исследования; b — через 45 мин u_{c_k} — напряжение короткой сети фазы c ; u_{c_d} — напряжение дуги фазы c . (Остальные обозначения те же, что на рис. 145)

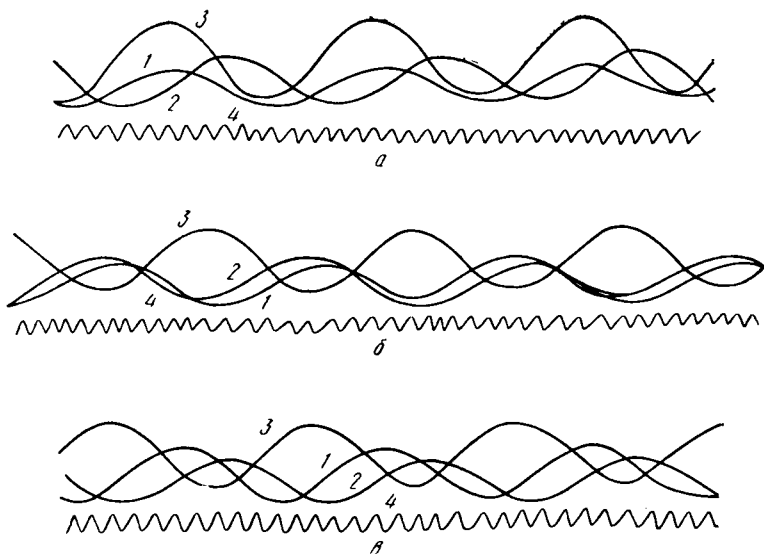


Рис. 150. Осциллограммы, снятые на большой карбидной печи через 10 мин после слива карбида:

а — фаза I; *б* — фаза II; *в* — фаза III; 1 — ток на стороне низшего напряжения трансформатора; 2 — рабочий ток (снято с пояса Роговского), 3 — напряжение; 4 — отметка времени ($f = 500$ Гц)

До снятия этой осциллограммы печь в течение 3 ч работала бесперебойно при средней мощности ~ 6300 кВт, и поэтому следовало ожидать незначительного искажения кривых. Действительно, все кривые на этой осциллограмме имеют более гладкую форму, чем кривые на рис. 148. Наибольшее искажение имеет кривая напряжения короткой сети; это объясняется тем, что ее индуктивное сопротивление почти в 10 раз больше активного сопротивления.

Весьма интересно отметить отсутствие подобия между кривыми силы тока и напряжения дуги. В то время как кривая силы тока имеет три ясно выраженных пика, что указывает на наличие гармоник 5-го и 7-го порядков, кривая напряжения дуги значительно менее искажена.

Через 45 мин при тех же вибраторах были записаны еще две осциллограммы; они получились с теми же искажениями, что и предыдущие кривые. Одна из них приведена на рис. 149, б.

После окончания испытаний на «дикий» фазе аппаратура была переключена с «дикий» фазы на «мертвую» и снят ряд осциллограмм на этой фазе.

Сравнение полученных осциллограмм с предыдущими показало, что искажение кривых на «мертвой» фазе несколько меньше, чем на «дикий». Это объясняется тем, что электрод «мертвой» фазы сидит глубже, благодаря чему тепловые условия под ним лучше, чем у «дикий» фазы.

В установившемся режиме большая карбидная электропечь работает спокойно. Кривая мощности, однако, отличается от плав-

ной линии, характерной для таких процессов, где выделение тепла протекает за счет сопротивления шихты. Это означает, что в печи есть дуги, но толчки и колебания мощности, обусловленные дугами, незначительны.

Проведено осциллографирование тока и напряжения на всех фазах печи (рис. 150, *а—в*). На основании осциллограмм можно сделать вывод, что на обследованной печи и, очевидно, вообще на мощных карбидных печах кривые силы тока в фазах и напряжения на ванне имеют синусоидальный характер.

4. Дуга в карбидной печи в переходном режиме

Выше была рассмотрена дуга карбидной печи при установившемся режиме. Однако понятие об установившемся режиме рудно-термических печей довольно условно. Эффективные значения силы тока и напряжения печи, а следовательно, и среднее значение ее мощности все время колеблются.

Диапазон этих колебаний зависит от характера технологического процесса, условий эксплуатации и вида регулирования печи.

С точки зрения технологического процесса наибольшим диапазоном колебаний силы тока и мощности характеризуются сталеплавильные печи. Карбидные печи имеют значительно более спокойный ход, а ферросплавные занимают среднее положение между ними. На рис. 151 приведены характерные кривые колебания силы тока и мощности печи при выплавке среднеуглеродистого ферромарганца, а на рис. 152, *а* кривая мощности карбидной печи, показывающая эту разницу.

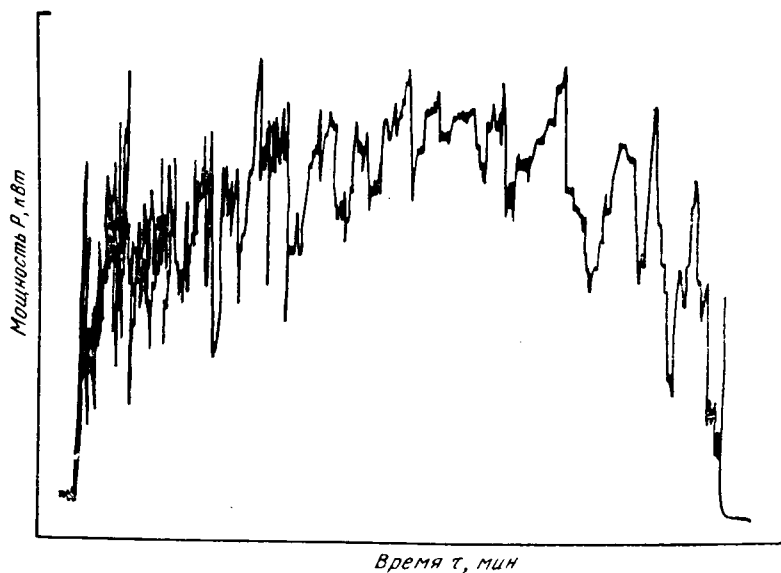


Рис. 151. График мощности при выплавке среднеуглеродистого ферромарганца

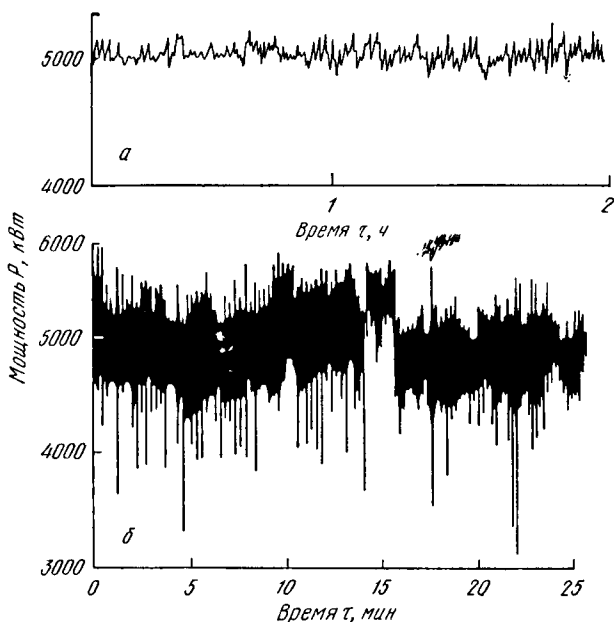


Рис. 152. График мощности карбидной печи:
 а — при нормальном режиме; б — при ненормальном режиме

Однако при неблагоприятных условиях эксплуатации и на карбидных печах диапазон колебаний мощности может достигать значительной величины. На рис. 152, б приведена кривая мощности карбидной печи 5000 кВА при ее ненормальном ходе. Как видим, мощность изменяется в довольно широких пределах. Мощность печей этого типа обычно регулируют перемещением электродов. При резких изменениях мощности торец электрода в ванне совершает колебания вверх и вниз. Вследствие этого систематически меняется длина дуги и ухудшаются условия горения последней.

Но если при колебаниях нагрузки средняя мощность за длительный период остается постоянной, то в тигле устанавливается благоприятный тепловой режим и создаются условия для более или менее устойчивого горения дуги.

Как было отмечено, тепловая инерция тигля ванны настолько велика, что даже после длительных перерывов в подаче энергии печь довольно быстро набирает мощность.

Совершенно иначе действуют на характер горения дуги такие отключения печи или снижения мощности, которые могут вызвать значительные изменения температуры стенок тигля. В этих случаях меняется положение в ванне, снижается температура газовой сферы тигля и условия горения дуги резко ухудшаются.

Таким образом возникает необходимость изучения формы кривых при переходных режимах работы печи.

Ниже приведены результаты двух исследований переходных процессов в печи. В первом случае рассмотрены процессы включения

и отключения печи, а во втором — процессы резкого изменения мощности печи без ее отключения.

Приводимые ниже осциллограммы включения и отключения записаны на карбидной печи мощностью 5000 кВА, электрические характеристики которой были даны выше.

На рис. 153 приведена осциллограмма трех фазовых токов с высокой стороны при номинальной нагрузке печи. Перед этой записью печь длительно работала без остановок. Как видим из осциллограммы, нагрузка всех фаз достаточно равномерна и колебания тока не превосходят нескольких процентов. Эффективное значение линейного тока составило 470 А, а линейное напряжение с высокой стороны трансформатора 6,3 кВ.

При таком ровном режиме печь была отключена и простояла 3 ч. После отключения электроды были подняты вверх, но концы их все же оставили в ванне и вокруг них насыпали свежую шихту.

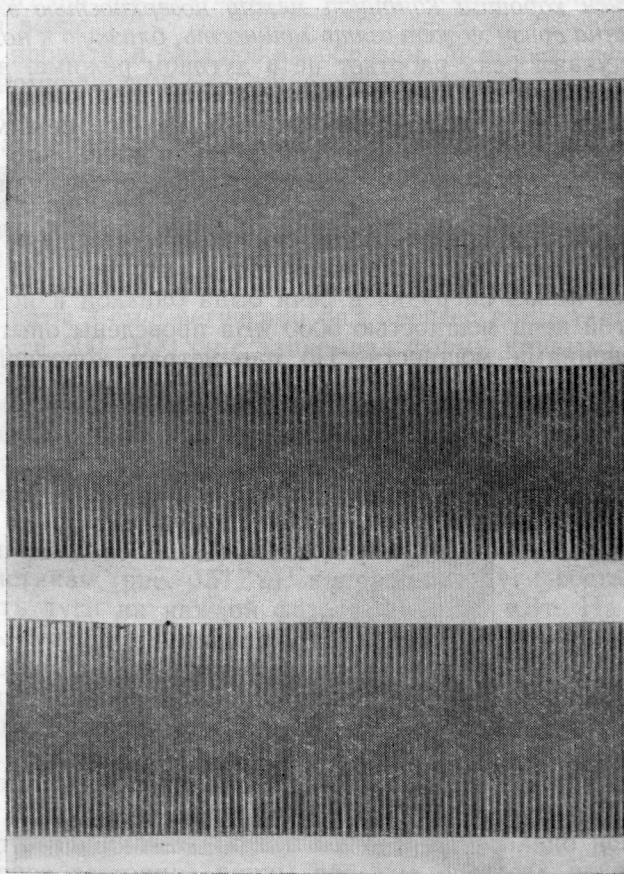
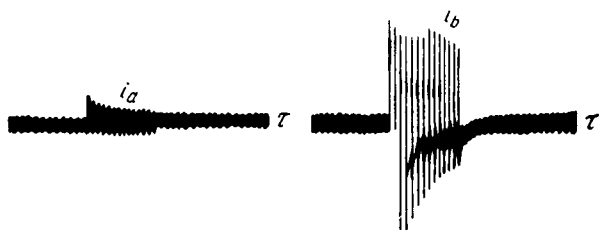


Рис. 153. Осциллограмма фазовых токов карбидной печи при нормальном режиме

Рис. 154. Осциллограмма силы токов при включении и отключении карбидной печи (обозначения см. на рис. 145)



При таком положении электродов печь была включена, но ток включения оказался очень высоким, и через 15 периодов, т. е. около 0,3 с, защита отключила печь (рис. 154). Повторная попытка такого же включения печи не дала положительного результата. После этого электроды были подняты выше и печь была включена (рис. 155). Эта осциллограмма показывает, что и по истечении нескольких часов ванна печи сохраняет достаточно высокую проводимость и, если обеспечен хороший контакт между поверхностью электрода и шихтой, ванна сразу может взять мощность, близкую к номинальной. В таких случаях печь работает не в дуговом режиме, а в режиме печи сопротивления. Только после углубления торца электрода в тигель и создания соответствующего теплового режима в ванне возникает дуговой режим. Следует иметь в виду, что такую же высокую электропроводность сохраняют после отключения и ферросплавные печи.

На рис. 156 приведена осциллограмма включения печи при выплавке углеродистого силикомарганца. Сразу же после включения на всех трех фазах нагрузка в печи была близкой к номинальной.

На другой печи мощностью 5000 кВа проведены опыты с глубокими изменениями мощности. По параметрам короткой сети эта

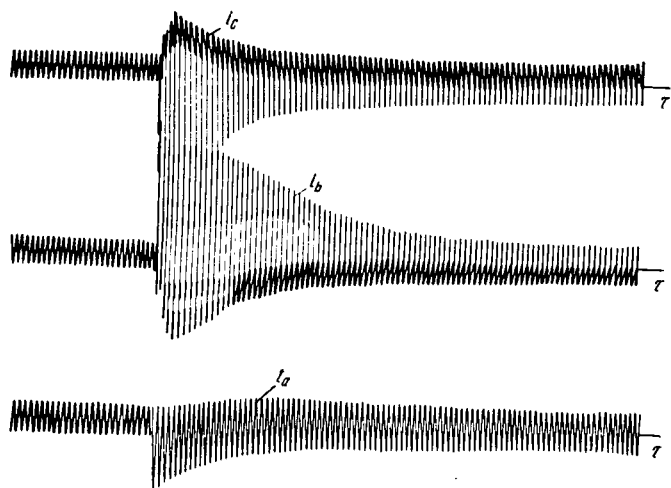


Рис. 155. Осциллограмма силы токов при включении карбидной печи (обозначения см. на рис. 145)

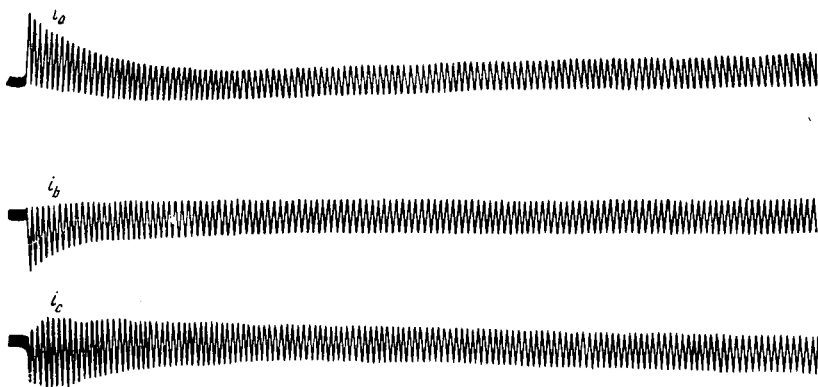


Рис. 156. Осциллограмма силы токов трех фаз при включении печи при выплавке углеродистого силикомарганца

печь аналогична предыдущей, и электрические характеристики ее приведены выше.

Опыты проводили следующим образом. Мощность печи, работавшей при номинальном режиме, вручную снижали на 70—80% и в течение небольшого промежутка времени поддерживали на таком уровне. Затем включали автоматику и последняя доводила режим печи до заданных номинальных величин. Каждый из процессов коммутации занимал около 40—50 с.

Так как одновременно нужно было регистрировать и процесс изменения нагрузки и форму кривых токов и напряжений, в схему испытаний пришлось включить два осциллографа. Один из них при скорости ленты 3 см/с регистрировал процесс коммутации, а второй при скорости 500—600 см/с записывал форму кривых.

Следует отметить, что перед испытаниями печь находилась в неустойчивом тепловом режиме, так как происходили частые отключения. Поэтому даже при номинальной мощности печи кривые силы токов и напряжений были значительно искажены.

К началу испытаний мощность печи была близка к номинальному значению и составляла 3800—3900 кВт при силе тока 22 кА и напряжении фазы 65 В. При таком режиме, согласно нагрузочным характеристикам (рис. 157, а), напряжение дуги составляет 56 В, а мощность дуги на каждой фазе 1220—1250 кВт. На рис. 157, а приведены осциллограммы силы токов и напряжений двух фаз печи, записанные в начале испытания. Как видим, кривые силы токов и напряжений значительно отступают от синусоиды. Через 0,5 ч записана осциллограмма (рис. 157, б) напряжения двух фаз и токи трех фаз.

Мощность печи поднялась до 4400 кВт при фазных напряжениях 64—68 В и токах 24—25 кА. Кривые силы токов и напряжений несколько выровнялись, но все же они еще сильно искажены, так как тепловое состояние ванны все еще осталось неустойчивым.

После записи этой осциллограммы печь в течение 20 ч работала со значительными перебоями, поэтому тепловой режим ванны печи

остался почти неизменным. При таком состоянии печи был проведен первый опыт изменения мощности печи.

На рис. 158 приведена огибающая кривая положительной полу-волны тока для всего процесса изменения нагрузки, согласно записи первого осциллографа.

Сначала мощность печи была снижена с 3900 до 1600 кВт при ручном регулировании печи. При этом ток с низкой стороны с 22 кА снизился до 8,6 кА. Соответственно с этим напряжение на дуге повысилось до 61 В, а мощность на каждой фазе дуги снизилась с 1200 до 525 кВт.

Процесс снижения мощности занял всего 6,7 с. При таком глубоком спаде тока и мощности дуги смещение (подъем) электродов составило всего около 40—50 мм.

Следует иметь в виду, что испытываемая печь имеет несимметричную подводящую сеть и прямоугольную ванну, и явление «дикой» и «мертвой» фаз у нее выражено довольно ясно. Поэтому мощности отдельных фаз не равны друг другу. Приводимые же здесь данные фазных мощностей относятся к средней фазе печи. Далее, как видно из рис. 158, в течение 16,3 с ток и мощность печи оставались неизменными. Затем была включена автоматика и начался подъем тока и мощности печи. Через 8,4 с регулирование закончилось, и печь получила заданный регулятором режим: ток фазы достиг 22 кА, а мощность была равна 3900 кВт. Смещение электродов вниз составило опять 40—50 мм.

В течение всего процесса коммутации вторым осциллографом несколько раз была записана форма кривых силы токов и напряжений. На рис. 159, а показана осциллограмма, снятая при номинальной нагрузке перед процессом коммутации. На ней показаны напряжение фазы А и ток фазы С. Осциллограмма записана при мощности печи 4000 кВт и токе 23 кА. По форме кривая тока довольно близко подходит к синусоиде, кривая напряжения искажена сильнее; у нее все еще сохранились два пика.

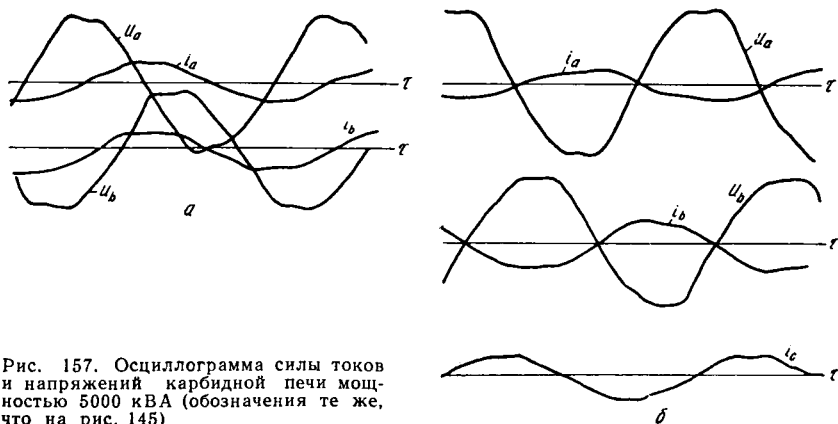
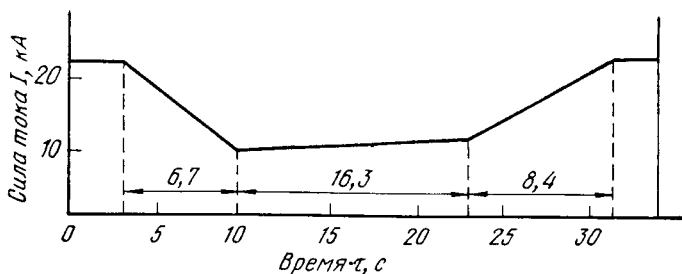


Рис. 157. Осциллограмма силы токов и напряжений карбидной печи мощностью 5000 кВА (обозначения те же, что на рис. 145)

Рис. 158. Осциллограмма изменения нагрузки карбидной печи мощностью 5000 кВА



Следующая запись (рис. 159, б) была сделана после начала снижения мощности; к моменту этой записи ток печи снизился до 10,5 кА. Несмотря на такое существенное снижение тока, форма кривых силы тока и напряжения почти не изменилась.

На осциллограмме (рис. 159, в) зафиксирована форма кривых в момент прохождения тока через минимум (8,6 кА). На кривой напряжения имеются два пика и они выражены резче, чем на рис. 159, а. Но мы не замечаем существенных изменений ни в кривой силы тока, ни в кривой напряжения по сравнению с кривыми, соответствующими номинальному режиму печи.

На рис. 159, г приведена осциллограмма, записанная в момент, когда сила тока повысилась до 20 кА. И тут форма кривых почти такая же, как и на предыдущих осциллограммах.

Для проверки влияния нагрузки печи на форму кривых тока и напряжения через несколько минут после окончания процесса коммутации мощность печи была повышена до 4500 кВт, при этом ток с низкой стороны трансформатора повысился до 24—25 кА.

На рис. 159, д приведена осциллограмма, записанная при перегрузке печи. Как видно, кривая очень близка к синусоиде. Кривая напряжения также сгладилась, но и в этом случае она сохраняет два небольших пика.

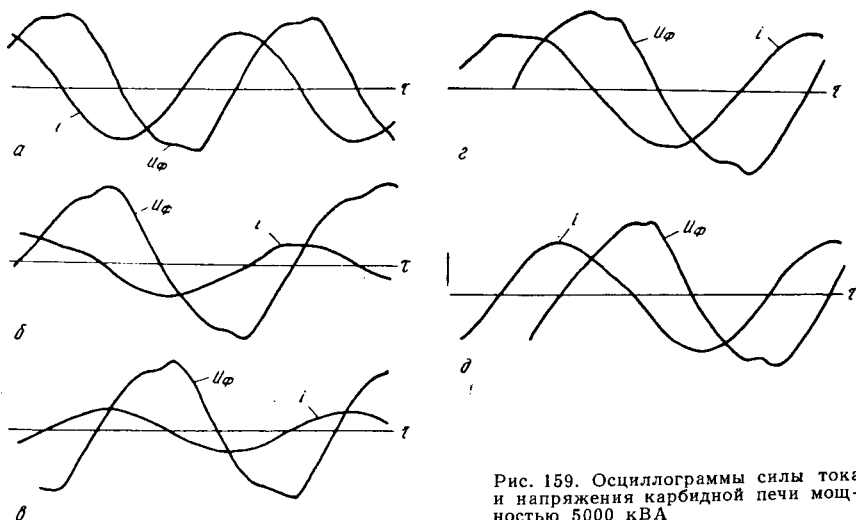


Рис. 159. Осциллограммы силы тока и напряжения карбидной печи мощностью 5000 кВА

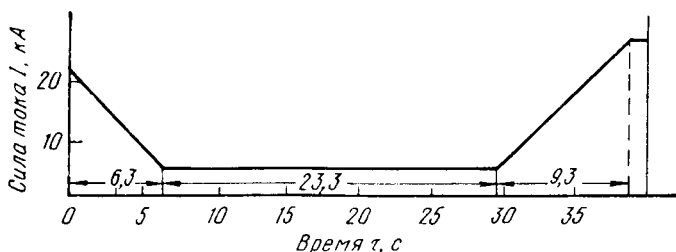


Рис. 160. Осциллограмма изменения нагрузки карбидной печи мощностью 5000 кВА

Описанный выше процесс коммутации длился всего около 32 с. За это время ток и мощность печи потерпели глубокие изменения. Несмотря на это, форма кривых силы токов и напряжений изменилась очень незначительно. Это объясняется тем, что в промежутки времени, измеряемые несколькими десятками секунд, тепловой режим ванны не претерпевает существенных изменений.

На рис. 160 приведен другой пример такой же коммутации нагрузки. На осциллограмме записана только часть процесса снижения нагрузки длительностью 6,3 с. При пониженной нагрузке печь работала 23,3 с. Затем в течение 9,3 с нагрузка печи автоматическим регулятором была доведена до номинального значения. И во время этого опыта второй осциллограф записывал форму кривых токов и напряжений. На рис. 161, а приведены кривые силы тока в период снижения нагрузки; зафиксирован момент, когда мощность снизилась до 4000 кВт, а ток до 22 кА. На рис. 161, б показан момент минимального режима, когда ток упал до 5 кА. Наконец, рис. 161, в показывает момент вхождения печи в нормальный режим — ток фазы увеличился до 27 кА.

На всех этих осциллограммах зафиксированы фазные напряжения и токи. Сравнение осциллограмм еще раз показывает, что тигель ванны печи обладает весьма высокой тепловой инерцией и колебания силы тока и мощности в течение долей минуты не оказывают существенного влияния на форму кривых силы тока и напряжения мощной печной дуги.

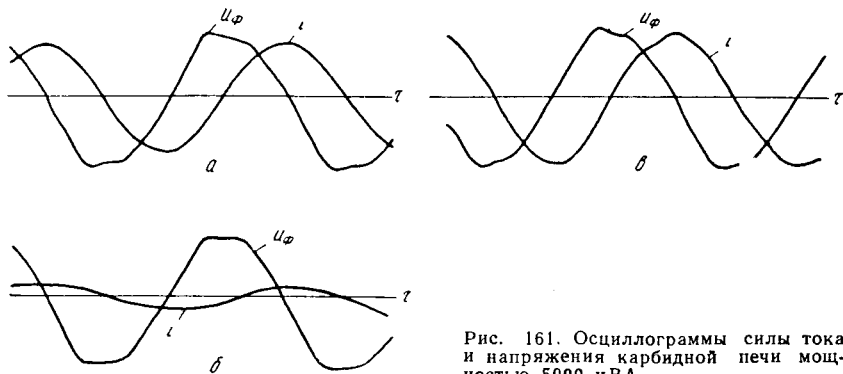


Рис. 161. Осциллограммы силы тока и напряжения карбидной печи мощностью 5000 кВА

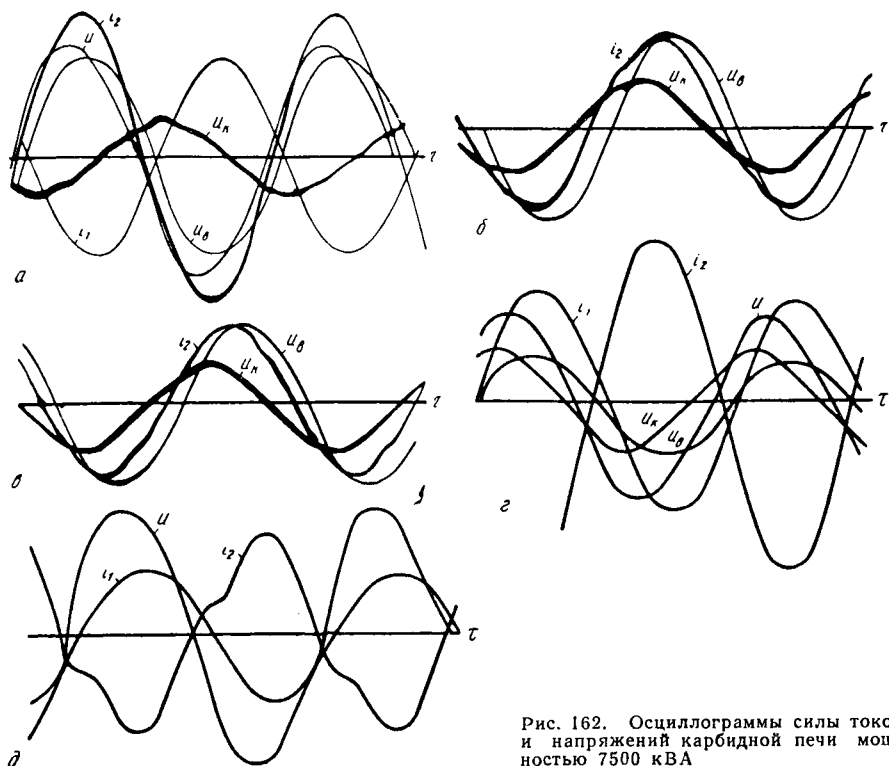


Рис. 162. Осциллограммы силы токов и напряжений карбидной печи мощностью 7500 кВА

В заключение приведем несколько осциллограмм из разных циклов испытаний, проведенных О. С. Арутюновым на печах средней мощности.

На рис. 162, а приведены кривые напряжения фазы u , напряжения короткой сети u_{κ} , напряжения ванны $u_{\text{в}}$ и токи двух фаз i_1, i_2 при нормальном режиме работы карбидной печи мощностью 7500 кВА. Кривая u_{κ} смещена на полпериода. Все приведенные кривые весьма близки к синусоиде. Наибольшие искажения, как и следует ожидать, имеет кривая u . Но и она близка к синусоиде; как показывает анализ, проведенный автором, амплитуда третьей гармоники составляет всего 1,7%, а пятой — 2,3% амплитуды основной гармоники.

На рис. 162, б приведены кривые u_{κ} , $u_{\text{в}}$ и i_2 той же печи перед сливом карбида кальция, а на рис. 162, в — после слива. Мы видим, что при нормальном режиме работы печи кривые тока близки к синусоиде и даже такой существенный фактор деформации тигля, как слив, не оказывает существенного влияния на форму кривых.

Большого внимания заслуживает рис. 162, г. На нем записаны те же кривые u , u_{κ} , $u_{\text{в}}$, i_1 и i_2 , но при ненормальном режиме печи. Электроды были подняты вверх и печь работала с открытой дугой, которая наблюдалась визуально с колошника. Несмотря на такое резкое нарушение режима, тепловые условия горения дуги оказались

достаточно благоприятными, и в кривых не наблюдается значительных искажений. Существенные изменения в форме кривой силы тока второй фазы были зарегистрированы только после того, как под эту фазу в реакционное пространство была загружена свежая известь (рис. 162, *д*). В кривой тока появился характерный изгиб и небольшой повторный пик.

Электрическое поле в ванне печи

1. Введение

Почти во всех руднотермических печах протекают токи, ответвляющиеся от одного электрода к другому, и энергия, выделяющаяся в шихте, является частью общей энергии, выделяемой электрическим током в ванне печи.

В однофазной печи вторым электродом обычно служит под и дуга горит между концом подвижного электрода и расплавом (или шлаком), находящимся на поду. Так как вокруг дуги находится шихта, характеризующаяся определенной электропроводностью, то параллельно дуге между электродом и подом протекает ток при той же суммарной разности потенциалов, которая приходится на дугу. Таким образом, дуга шунтирована некоторым сопротивлением. С учетом этого сопротивления схема замещения контура примет вид, показанный на рис. 163.

Ток стекает в шихту с боковой поверхности подвижного электрода. В случае, если печь работает в бездуговом режиме, ток стекает также с торца электрода в жидкий расплав или твердую шихту.

Величина силы тока шихтовой проводимости зависит от большого числа факторов. Основными из них являются распределение электрического и теплового полей в шихте, электропроводность и теплопроводность шихты. Так как эти величины неоднородны, то и плотность тока в шихте неоднородна. Вследствие этого неоднородна и плотность энергии, выделяющейся в различных областях шихты.

В трехфазных печах токораспределение еще сложнее. Помимо дуговых токов, текущих от электродов на под по схеме «звезда», токи могут течь также через шихту от электрода на под по схеме «звезда» и от электрода к электроду по схеме «треугольник». В этом случае электрическая цепь трехфазной печи от зажимов трансформатора

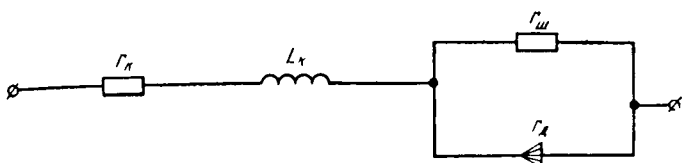


Рис. 163. Эквивалентная схема однофазной шунтированной дуги: r_k , x_k — параметры подводящей сети; $r_{ш}$ — эквивалентное сопротивление шихты, шунтирующей дугу; r_d — сопротивление дуги

до пода как нулевой точки может быть изображена в виде схемы замещения, приведенной на рис. 164. И здесь электрическое и тепловое поля, плотности тока и плотность энергии в различных частях шихты неодинаковы. Поэтому для печей обоих типов основная задача заключается в определении электрических и тепловых полей, плотности тока и энергии в шихте, а также в определении доли энергии, выделяющейся в шихте, в общем энергетическом балансе ванны печи. Наконец, существенно важно уяснение этих вопросов для установления взаимозависимости между токами дуги и шихты.

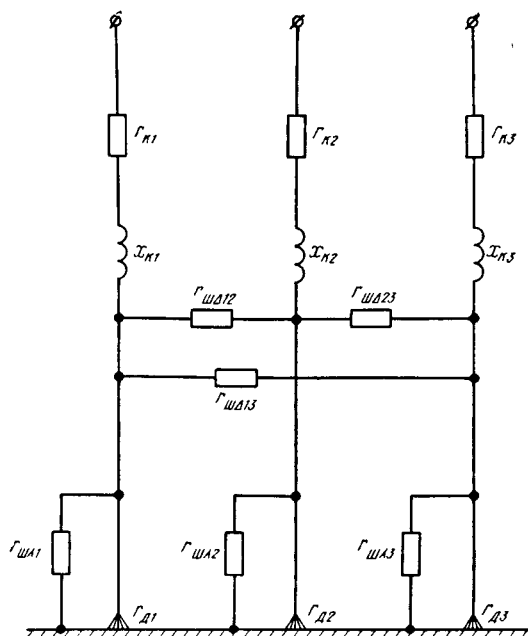


Рис. 164. Эквивалентная схема трехфазной шунтированной дуги

Так как аналитическое решение этих вопросов получается весьма сложным и не всегда дает удовлетворительные результаты, то сначала рассмотрим аналитические методы, а потом приведем результаты экспериментальных исследований.

2. Аналитический расчет электрического поля однофазной печи при постоянстве электропроводности шихты

На рис. 165 приведена схема однофазной печи. Подвижному электроду приписываем потенциал u , неподвижному — 0.

Если отобразить это поле в плоскости подового электрода, то получим симметричное поле между двумя цилиндрами с общей осью (рис. 166). Конфигурация такого поля будет одинаковой в любых меридианных плоскостях, проведенных через ось цилиндров, т. е. поле будет плоскомеридианным.

Уравнение Лапласа для потенциальной функции плоскомеридианного поля в цилиндрических координатах записывается как

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0. \quad (X-1)$$

Решение этого уравнения в общем виде получается сложным и на нем мы остановимся позже. Можно было бы упростить решение, применив функции комплексных переменных, если бы уравнение не содержало члена с производной первого порядка.

Чтобы исключить этот член, заменим плоскомеридианное поле плоскопараллельным, т. е. будем рассматривать поле не между цилиндром и диском, а между двугранным углом и пластиной бесконечной протяженности. Таким образом, цилиндр с конечным радиусом кривизны заменяется цилиндром, у которого радиус кривизны равен бесконечности. Такая замена при малых радиусах цилиндра может внести в расчеты существенные погрешности. Но в электропечах, в которых диаметр электродов достигает нескольких десятков сантиметров, погрешности становятся незначительными.

При такой замене поле становится двумерным, и уравнение Лапласа в прямоугольной системе координат запишется как

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0. \quad (X-2)$$

Плоскопараллельное поле при наличии электродов с ломаными ограничивающими поверхностями может быть определено преобразованием Шварца, сущность которого заключается в следующем. Если в некоторой комплексной плоскости z (рис. 167) задана область, ограниченная ломаной линией $z_0; z_1; z_2 \dots$, то эту область можно отобразить в верхней полуплоскости комплексной плоскости w при помощи уравнения

$$dz = \bar{A} (\bar{w} - \bar{w}_1)^{\alpha_1} (\bar{w} - \bar{w}_2)^{\alpha_2} (\bar{w} - \bar{w}_3)^{\alpha_3} \dots (\bar{w} - \bar{w}_n)^{\alpha_n} d\bar{w}, \quad (X-3)$$

где $\bar{A}$ — комплексная постоянная;

$\bar{w}$ — комплексная координата какой-либо точки в плоскости;
 $\bar{w}_1 \bar{w}_2$ — координаты точек в плоскости $\bar{w}$, соответствующие вершинам ломаной линии в плоскости $\bar{z}$;

$\alpha_1 \alpha_2$ — углы между соседними отрезками ломаной линии в долях π .

Если в этом случае совместить след подового электрода с осью x , то след верхнего электрода изобразится прямым углом, и линия, ограничивающая поле, будет иметь две точки преломления (рис. 168, а): одну $\bar{z}_1$ с углом π (рис. 168, б), а другую $\bar{z}_2$ с углом $\pi/2$. Отображение $\bar{z}_1$ дано на рис. 168, б.

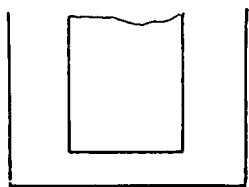


Рис. 165. Схема однофазной печи

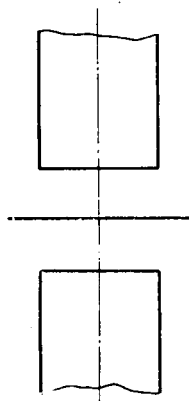


Рис. 166. Симметричное поле между торцами двух цилиндров

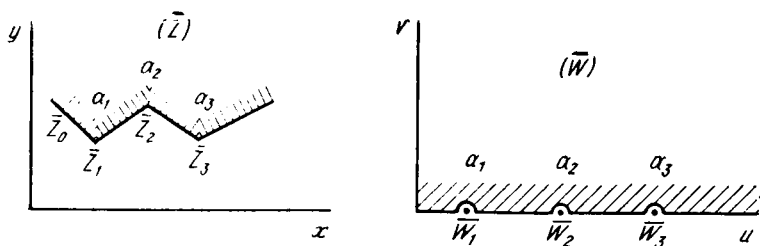


Рис. 167. Преобразование Шварца

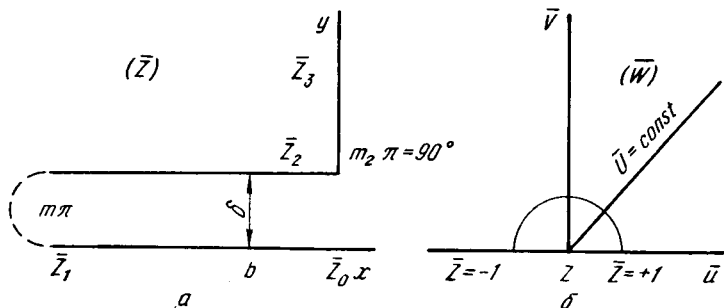


Рис. 168. Отображение прямой угол—плоскость:
а — след поля электрод-под; б — отображение z в полуплоскости w

Уравнение Шварца примет вид

$$d\bar{z} = \bar{A} \frac{V\bar{w}+1}{\bar{w}} d\bar{w}. \quad (\text{X-4})$$

Проинтегрировав dz и выбрав соответствующим образом начало координат, получим

$$\bar{z} = \frac{d_{\text{м.э}}}{\pi} \left(2 \sqrt{\bar{w}+1} + \ln \frac{V\bar{w}+1-1}{V\bar{w}+1+1} \right). \quad (\text{X-5})$$

Положив комплекс

$$\sqrt{\bar{w}+1} = c + jd \quad (\text{X-6})$$

и имея в виду, что

$$\bar{z} = x + jy \text{ и } \bar{w} = u + jv, \quad (\text{X-7})$$

находим выражения для c и d :

$$\left. \begin{aligned} c &= \sqrt{\frac{1}{2} V(u+1)^2 + v^2 + u + 1}; \\ d &= \sqrt{\frac{1}{2} V(u+1)^2 + v^2 - u - 1}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{X-8})$$

Так как

$$(c + jd)^2 = \bar{w} + 1 = u + jv + 1, \quad (X-9)$$

то

$$u = c^2 + d^2 - 1 \text{ и } v = 2cd.$$

Пользуясь формулой (X-9), можно $\bar{z}$ выразить через c и d :

$$\bar{z} = x + jy = \frac{d_{м.э}}{\pi} \left[2c + \frac{1}{2} \ln \frac{(c-1)^2 + d^2}{(c+1)^2 + d^2} + j \left(2d + \operatorname{arctg} \frac{2d}{c^2 + d^2 + 1} \right) \right]. \quad (X-10)$$

Можно показать, что напряженность поля определится уравнением

$$\bar{E} = E_x + jE_y = \frac{U}{d_{м.э}} \frac{c}{c^2 + d^2} - j \frac{U}{d_{м.э}} \frac{d}{c^2 + d^2}, \quad (X-11)$$

где U — разность потенциалов;

$d_{м.э}$ — расстояние между электродами.

По формулам (X-8) и (X-10) можно построить как эквипотенциальные поверхности, так и силовые линии или линии вектора плотности тока.

Действительно, в комплексной полуплоскости эквипотенциальные линии представляют радиальные прямые. Задаваясь координатами u и v ряда точек на такой прямой, по уравнениям (X-8) находим значения коэффициентов c и d , а затем по уравнению (X-10) значения координат x и y соответствующей точки в заданной плоскости z . Зная c и d , находим действительную и мнимую часть напряженности поля в данной точке и вектора плоскости тока. Расчеты эти довольно кропотливы, но приводят к удовлетворительным результатам.

На рис. 169 приведены кривые, построенные по этому методу, при $d_{м.э} = 9,5$.

Построенные таким образом поля были проверены графо-аналитическим методом с учетом того, что поле в действительности плоско-меридианное, а не плоскопараллельное. Но разница между этими полями получилась такой незначительной, что в приближенных расчетах можно одно поле заменить другим. Однако дальнейшая проверка на модели показала существенную разницу между расчетными и экспериментальными полями. Причина заключается в том, что в печах поле ограничено, а при решении задачи это не было принято во внимание. Действительно, в электропечи между электродами находится электропроводная шихта, которая ограничивается изо-

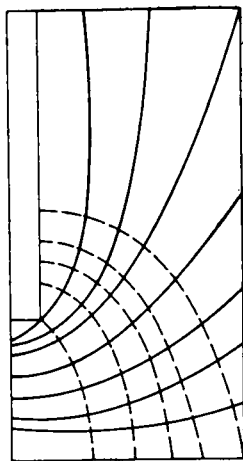


Рис. 169. Кривые поля однофазной печи

ляционным слоем футеровки ванны. Следовательно, поле в печи можно рассматривать как электрическое поле в двухслойном проводнике. Так как удельные проводимости этих слоев различны, то силовые линии при переходе из одной среды в другую должны преломляться.

Нормальная составляющая вектора плотности тока на границе двух сред с различными проводимостями остается постоянной:

$$j_{n_1} = j_{n_2}. \quad (X-12)$$

Тангенциальные составляющие векторов плотности тока пропорциональны проводимости сред:

$$\frac{j_{tg_1}}{j_{tg_2}} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}. \quad (X-13)$$

Отсюда вытекает правило, гласящее, что тангенсы углов вектора плотности тока пропорциональны проводимостям соответствующих сред:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}. \quad (X-14)$$

С увеличением отношения проводимостей угол падения α_1 растет, а угол α_2 уменьшается. Поэтому линии тока переходят из среды с весьма высокой проводимостью в среду с весьма низкой проводимостью почти перпендикулярно плоскости раздела.

При этом, что существенно важно, уменьшается нормальная составляющая вектора плотности тока. В пределе, когда проводимость второй среды стремится к нулю, ток уже не проникает в нее, и вектор плотности тока, имея только тангенциальную составляющую, становится параллельным поверхности раздела двух сред. Вследствие этого и эквипотенциальные поверхности, будучи перпендикулярными вектору плотности тока, искривляются так, чтобы расположиться перпендикулярно плоскости раздела двух сред. Деформация поля, обусловленная наличием пограничного слоя диэлектрика, не находит отражения в приведенном выше теоретическом расчете. Из вышеизложенного вытекает, что задача определения полей электрических печей сводится к расчету не однослойной, а двухслойной среды. А если учесть, что во время работы печи в дуговом режиме торец электрода погружен в газовую сферу тигля, то фактически надо вести расчет для трехслойной среды. При этом основными параметрами, определяющими конфигурацию поля и токораспределение, являются зазор между электродами $d_{м.э.}$, зазор между верхним электродом и футеровкой ванны $d_{э.с.}$, высота слоя шихты h , диаметр электрода $D_э$ и диаметр тигля $D_т$.

Теоретически трудно учесть искажения, вносимые в поле всеми этими факторами. Поэтому экспериментальное исследование поля на модели дает более эффективные результаты.

3. Экспериментальное исследование электрического поля однофазной печи

А. Модель однофазной печи

Электрическое поле в однофазной печи является плоскомеридианным и, следовательно, в любом вертикальном сечении, проходящем через ось электрода, имеет одинаковое строение. Поэтому для изучения поля достаточно знать его строение в одном таком сечении.

Этим положением определяется и основное требование к модели ванны печи.

Построим ее в виде полуцилиндрического ящика радиусом 23 и высотой 38 см (рис. 170). Подовый электрод представлял полу диск такого же радиуса.

Для имитации верхнего электрода были изготовлены полуцилиндры различных диаметров.

Ящик засыпали просеянным коксом крупностью 0,5 мм. Схема питалась от источника постоянного тока. Эквипотенциальные линии отыскивали при помощи вольтметра со щупом. Отсчет разности потенциалов вели от подового электрода, которому приписывали нулевой потенциал.

Опыты были разделены на несколько серий.

В первой серии опытов коксом заполняли весь ящик так, что цилиндрический электрод был окружен коксом со всех сторон. Таким образом, определили строение поля для цилиндрического электрода, целиком погруженного в проводящую среду.

В этой серии опытов изменяли диаметр цилиндрического электрода D_3 и расстояние между его торцом и подовым электродом $d_{3,п}$.

Во второй серии опытов определяли распределение тока по отдельным зонам цилиндрического электрода.

Для этой цели всю боковую поверхность электрода вплоть до торца разбили на отдельные участки. Все участки были изолированы от коксовой засыпки так, что ток мог стекать только с торца электрода. Затем постепенно по участкам удаляли изоляцию и определяли ток, стекающей с каждого участка.

В третьей серии опытов была установлена зависимость тока от размеров тигля. Для этого электрод погружали в кокс, как и в первой серии опытов, и измеряли ток, затем под торцом постепенно удаляли засыпку, расширяли объем тигля и измеряли ток для каждого размера тигля.

Б. Конфигурация электрического поля

На рис. 171, а—г приведены четыре наиболее типичных из полученных полей. Эти образцы выбраны так, чтобы пока-

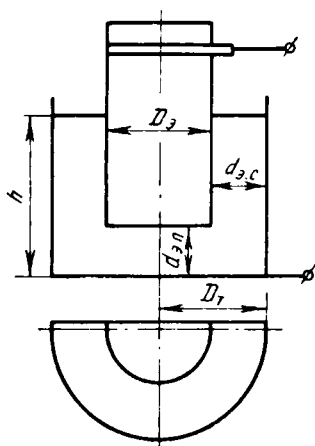


Рис. 170. Эскиз модели ванны печи

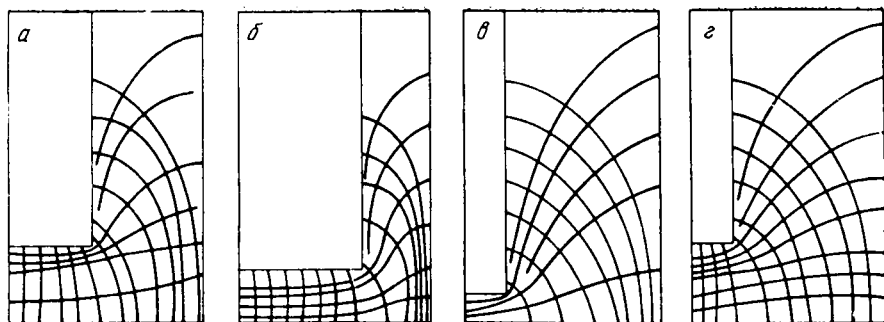


Рис. 171. Поле однофазной ванны при различных значениях $D_{\text{э}}$ и $d_{\text{э}}$, мм:

	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>		<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>
$D_{\text{э}}$	10	10	20	30	$d_{\text{э}}, \text{ мм}$	3	9	9	6

затем ход изменения поля в зависимости как от диаметра электрода $D_{\text{э}}$, так и от зазора между торцом электрода и подом $d_{\text{э}}$.

Во всех экспериментальных полях эквипотенциальные поверхности перпендикулярны пограничной непроводящей поверхности. Линии плотности тока также везде перпендикулярны поверхности электрода. Конфигурация их зависит от местоположения. Под торцом электрода они представляют собой почти параллельные прямые линии.

По мере приближения к краю торца они начинают искривляться, но в известной мере сохраняют свою параллельность. Поблизости же от ограничивающей поверхности футеровки они идут параллельно последней.

Чем больше зазор между электродом и футеровкой, тем кривизна линий тока равномернее. Наоборот, с уменьшением этого зазора линии тока, выйдя из верхнего электрода, тут же довольно резко поворачивают вниз и затем почти параллельно зазору прямолинейно направляются вниз к подовому электроду.

Таким образом, характерной особенностью всех эквипотенциальных поверхностей является наличие выпуклостей вверх. В целом все поверхности имеют чашеобразную форму.

Характерная особенность линий плотности тока — наличие почти прямолинейных параллельных участков и участков с более или менее резко выраженными выпуклостями, опять-таки вверх.

Увеличение зазора между электродами и зазора между электродом и футеровкой влияет на конфигурацию линий примерно одинаково, смягчая выпуклости как эквипотенциальных поверхностей, так и линий тока.

Без учета влияния ограничивающей среды (футеровки) различие между теоретическими и экспериментальными полями заключается в том, что в последних линии тока исходят со всей поверхности электрода, независимо от величины зазора между электродом и футеровкой.

В. Распределение тока вдоль вертикальной оси печи

Из рассмотрения вышеприведенных кривых видно, что ток стекает в шихту со всей поверхности цилиндрического электрода. Однако плотность тока вдоль оси электрода меняется; у торца электрода она достигает максимального значения, а затем постепенно уменьшается до нуля у поверхности колошника.

На рис. 172, а показан ход изменения тока для случая, когда диаметр электрода составляет 30, высота ванны 33, зазор 3, а зазор между электродом и футеровкой 8 см. Часть электрода, погруженная в шихту, была разделена на шесть участков длиной 5 см каждый. На чертеже по оси абсцисс отделены участки электрода, начиная с его торца, а по оси ординат — ток, стекающий с данного участка.

Для удобства сравнения токи выражены в процентах тока первого участка, принятого за 100%. Как было указано выше, перед испытанием вся боковая поверхность электрода была изолирована, так что в начале опыта была получена возможность измерить ток, стекающий с торца электрода.

Ряд измерений показал, что ток, стекающий с торца, составляет ~ 100—150% тока, стекающего с боковой поверхности электрода.

При данных параметрах ванны ток торца обратно пропорционален длине зазора.

В дальнейшем, чтобы исключить из рассмотрения ток торца под электродом, вынимали часть кокса по диаметру торца.

На том же рисунке показана кривая изменения сопротивления и кривая нарастания суммарного тока.

Эти кривые показывают, что ток трубки тем меньше, чем дальше она отстоит от торца электрода. Они же являются кривыми плотности тока вдоль поверхности верхнего электрода, так как основания трубок тока на нем имеют одинаковые сечения.

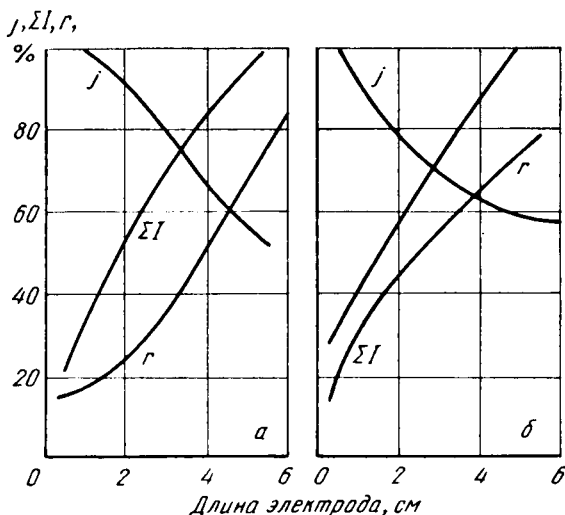


Рис. 172. Изменение плотности тока j , суммарного тока ΣI и сопротивления r вдоль оси электрода

На рис. 172, б показан другой образец полученных кривых. Для этого опыта были сохранены все параметры, которые были приняты в предыдущем случае, только зазор между электродами увеличен в три раза.

Как видно, кривая сопротивления трубок тока выпрямилась и нарастание сопротивления от трубки к трубке идет почти прямолинейно. Вследствие этого в кривой плотности тока исчезла верхняя выпуклость и она подчиняется гиперболическому закону.

Однако вся серия опытов показала, что скорость затухания плотности тока зависит от параметров ванны. В одних случаях она больше, а в других меньше. Ток, стекающий по электроду по крайней трубке тока, не ниже 40—45% тока первой трубки, расположенной непосредственно у торца электрода.

Следовательно, передача тока происходит по всей длине электрода, погруженного в шихту, причем участие крайних слоев шихты примерно вдвое меньше, чем слоев, расположенных непосредственно у стенок тигля.

Г. Зависимость тока печи от размеров тигля

В каждом варианте после снятия кривых поля определяли влияние размеров тигля на суммарный ток, стекающий с верхнего электрода на подовый электрод. Сначала регистрировали ток, стекающий с электрода при его полном погружении в шихту. Затем, под торцом электрода делали выемку в шихте цилиндрической формы диаметром, равным диаметру электрода, и определяли ток, стекающий со всей боковой поверхности электрода. В дальнейшем под электродом расширяли зону тигля и измеряли ток при различных диаметрах электрода. Так как с изменением D_z и $d_{м.з}$ изменяется форма тигля, нами приведено испытание при различных значениях этих параметров. Электроды брали диаметром 10; 20 и 30, зазор — 3; 6 и 9 см. С увеличением $d_{м.з}$ диаметр тигля уменьшается, а высота его свода увеличивается. Для создания единообразия при изменении формы тигля было принято, что при $d_{м.з}$, равном 3; 6 и 9 см, высота свода h составляла соответственно 4; 7,5 и 11 см. Эти значения и h были сохранены при всех диаметрах электродов.

На рис. 173, а—в приведены графики, построенные по результатам измерений. Для удобства сравнения ток, стекающий с боковой поверхности электрода при $D_z = 10$ см и $d_{м.з} = 3$ см, принят за 100% (см. рис. 173, а). Следует иметь в виду, что радиус ванны при всех вариантах остается постоянным.

В первом варианте толщина слоя шихты вдоль радиуса ванны составляла 18, во втором — 13, а в третьем — 8 см.

Как видно из кривых, во всех случаях с увеличением радиуса тигля ток шихты уменьшается. Однако тенденция изменения тока на различных участках различна. Если радиус тигля мал, то при его изменении ток изменяется мало; когда толщина проводящей шихты резко уменьшается, ток начинает сильно падать и в пределе приближается к нулю.

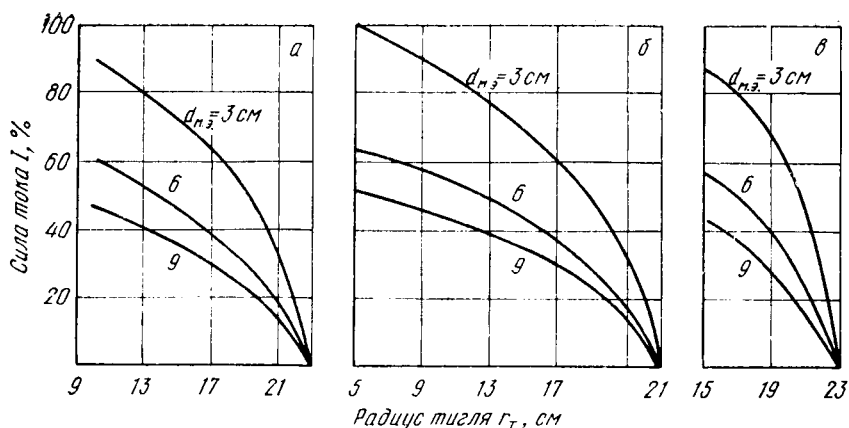


Рис. 173. Зависимость силы тока от радиуса тигля при различных значениях $D_{э}$, см: а — 10; б — 20; в — 30

Чем больше диаметр электрода и, следовательно, меньше толщина шихтового слоя, тем резче изменение диаметра тигля отражается на величине тока.

Например, при сравнении рис. 173, а и 173, б видно, что при $d_{м.з} = 3$ см и радиусе электрода 5 см увеличение радиуса тигля на 2 см вызывает уменьшение тока всего на 4—5%, а при том же зазоре и радиусе электрода 15 см увеличение радиуса тигля на 2 см вызывает уменьшение тока на 8—9%.

В печи мощностью 10 МВА при диаметре электрода 385 см зазор между электродом и футеровкой составляет ~ 75 см. Поэтому в этих печах небольшие изменения радиуса тигля должны вызвать значительное изменение тока шихтовой проводимости.

Д. Зависимость полного тока и сопротивления ванны от зазора между электродом и подом

Эта зависимость весьма важна, так как позволяет выяснить, каково влияние смещения электрода на режим работы печи.

Чтобы исключить из рассмотрения ток, текущий с торца электрода на под, во всех опытах под торцом делали цилиндрические выемки и благодаря этому рассматривали ток, текущий только с боковой поверхности электрода.

Была проведена серия опытов при различных положениях и различных диаметрах электрода.

Во всех вариантах с увеличением зазора $d_{м.з}$ ток уменьшается. На рис. 174, а представлены три кривые изменения силы тока в зависимости от зазора при трех различных диаметрах электрода (без учета деформации тигля).

Сравнение этих кривых показывает, что с увеличением диаметра электрода зависимость силы тока от величины зазора становится резче.

Значительно больший интерес представляет другая серия опытов (с учетом деформации тигля), результаты которых представлены на рис. 174, б.

С изменением посадки электрода меняются радиус и высота свода тигля. Поэтому при определении зависимости силы тока от величины зазора должны быть учтены и изменения размеров тигля. Эти изменения учтены в последней серии опытов. Опыты проведены с электродами тех же трех размеров. Для каждого значения зазора $d_{м.э.}$ мы принимали определенную высоту погружения торца электрода в тигель Δh и определенное значение разности между радиусами электрода и тигля Δr_T . Значения величин, при которых проводили опыты, следующие:

$d_{м.э.}$	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0
Δh	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
Δr_T	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0

При выборе этих параметров исходили из тех соображений, что с увеличением зазора $d_{м.э.}$ радиус тигля уменьшается, а длина увеличивается.

И эта серия опытов показала, что с *увеличением зазора $d_{м.э.}$ ток шихтовой проводимости уменьшается.*

Однако сравнение кривых рис. 174, а и б показывает, что зависимость тока от зазора $d_{м.э.}$ во втором варианте (с учетом деформации тигля) значительно меньше, чем в первом.

Это объясняется тем, что при углублении электрода в ванну зазор уменьшается и вместе с тем уменьшается высота свода тигля и длина трубок тока. В результате этого уменьшается суммарное сопротивление ванны и ток растет. С углублением электрода увеличивается радиус тигля, что в конечном счете приводит к уменьшению сечения проводящего слоя шихты, к увеличению сопротивления ванны и уменьшению тока. В зависимости от этих факторов ток либо уменьшается, либо увеличивается. В результате уменьшения проводящего слоя шихты смягчается зависимость тока от зазоров.

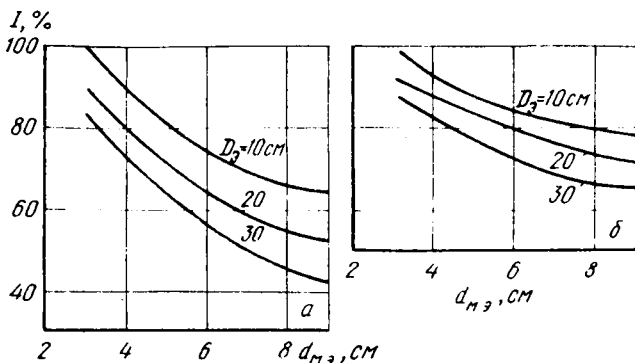


Рис. 174. Зависимость тока от величины зазора $d_{м.э.}$

Е. Зависимость силы тока от диаметра электрода

Для определения этой зависимости был проведен ряд экспериментов с электродами различных диаметров и различными зазорами при постоянном диаметре ванны.

Несмотря на широкий диапазон колебаний радиуса электрода, при заданном зазоре сила тока оставалась почти постоянной.

На рис. 174, *а* и *б* были приведены кривые зависимости силы тока от величины зазора. Эти же кривые по существу характеризуют зависимость силы тока от диаметра электрода. Из них видно, что если, например, при $d_{м.э} = 3$ см диаметр электрода меняется от 10 до 30 см, то сила тока уменьшается всего на 15%. Если при тех же значениях $d_{м.э}$ и $D_э$ учесть и размеры тигля, то это снижение силы тока еще меньше — всего 12%.

Диаметр электрода печи выбирают, исходя не только из электрических, но и из технологических соображений. Резкое уменьшение диаметра электрода в мощной печи привело бы к расстройству ее хода. Поэтому на основании полученных результатов можно сделать весьма важный вывод. *В пределах, допустимых по технологическим соображениям, изменение диаметра электрода почти не влияет на ток.* Следует иметь в виду, что в трехфазных печах дело обстоит совершенно иначе.

4. Экспериментальное исследование электрического поля трехфазной печи

А. Модель трехфазной печи

Электрическое поле в трехфазной печи имеет сложное строение и характер его зависит прежде всего от расположения электродов.

Теоретическое исследование строения поля трехфазной печи освещено в ряде работ. Оно показывает, что в трехфазных симметричных печах, в которых электроды расположены по вершинам равностороннего треугольника, на оси симметрии печи возбуждается вращающееся поле постоянной величины. По мере удаления от этой оси частота и скорость вращения поля меняются, но внутри треугольника распада оно продолжает оставаться вращающимся. Вне этого треугольника оно превращается в пульсирующее поле.

В прямоугольных печах, в которых электроды расположены в ряд, электрическое поле в любом сечении ванны имеет пульсирующий характер.

Возникающие в ванне печи электрические и магнитные поля определяют как индукционные токи, так и токи шихтовой проводимости.

При рассмотрении трехфазного поля следует отличать мгновенное распределение поля от эффективного. Первое из них в любой точке пространства меняется циклически, второе, наоборот, от времени не зависит. В круглых печах осью симметрии поля является ось печи. Поэтому характер изменения поля в любом вертикальном се-

чении идентичен. В полях печей, электроды которых расположены в ряд, такой полной симметрии нет, поэтому в них изменение поля во времени не во всех сечениях одинаково.

Для иллюстрации на рис. 175, *а*, *б*, приведено мгновенное распределение поля симметричной печи для момента времени, когда напряжение второй фазы равно нулю. Форма торца электрода принята сферической.

Точно такое же строение будет иметь поле при прохождении через нуль токов двух других фаз.

На рис. 176 приведены поля прямоугольной печи; расстояние между торцом электрода и подом принято равным 1 м. На рис. 176, *а*

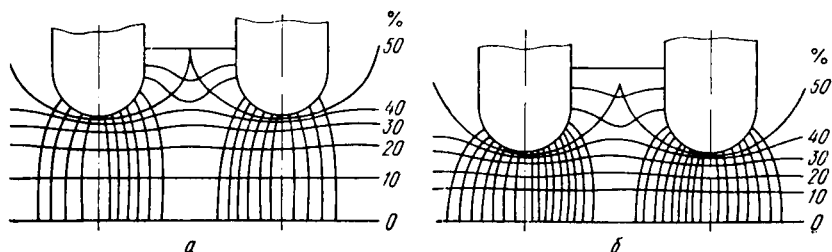


Рис. 175. Мгновенное распределение поля симметричной печи при $u_2 = 0$ и разных зазорах $d_{м.э}$, м:

а — 1,6; *б* — 1

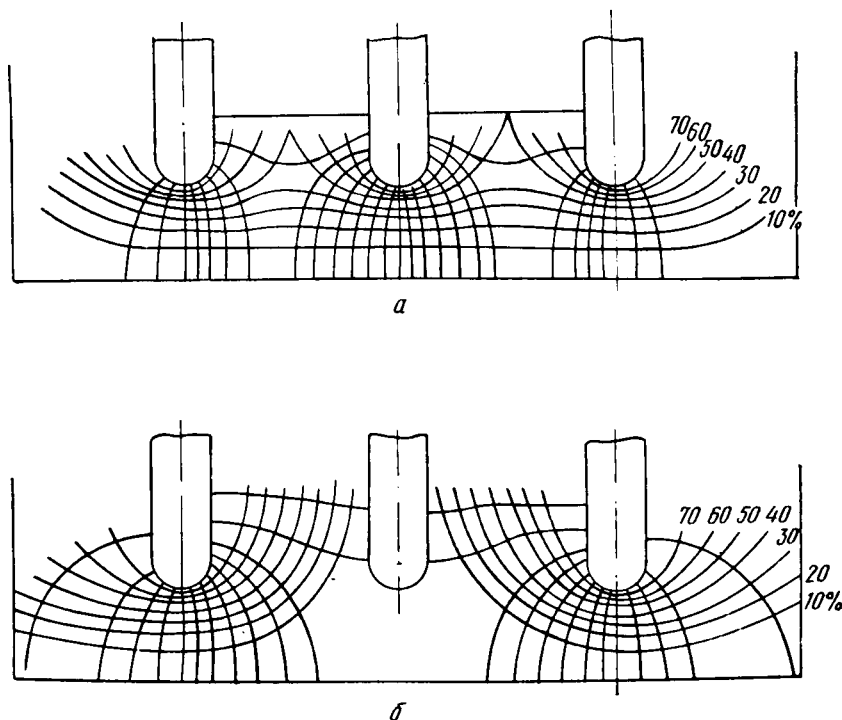


Рис. 176. Мгновенное распределение поля несимметричной печи

показан момент, когда напряжение и ток второй фазы проходят через максимум, на рис. 176, б — через ноль.

Ниже приведены результаты исследования эффективного распределения поля прямоугольной печи, выполненного на модели.

Модель ванны была построена в виде прямоугольного ящика длиной 72, шириной 30 и высотой 24 см. Electroды были изготовлены диаметром в 8, 9 и 10 см. В качестве проводящей среды в одних опытах использован дробленый кокс, а в других — слабый раствор поваренной соли. Модель питали от трехфазного воздушного трансформатора мощностью в 10 кВА, напряжением 220/11 В.

Опыты были разделены на несколько серий. В первой серии было определено строение электрического поля вокруг электрода, а в последующих — зависимость токов от различных параметров ванны.

Б. Конфигурация поля трехфазной печи

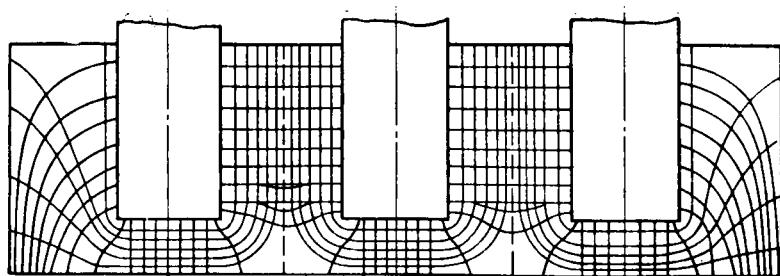
Для определения конфигурации поля были проведены две серии опытов.

В первой из них в качестве проводящей среды был использован раствор поваренной соли. Ящик, имитирующий ванну, заполняли раствором и в него опускали электроды, к которым подводили напряжение. Таким образом, ток стекал в проводящую среду со всей поверхности, погруженной в жидкость.

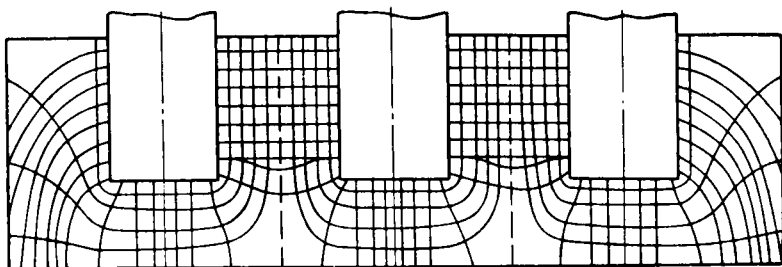
Один зажим вольтметра подключали к подовому электроду, представляющему нулевую точку системы, а второй при помощи щупа опускали в жидкость.

Строение полей в различных горизонтальных и вертикальных сечениях ванны разное. Поэтому эквипотенциальные поверхности не являются плоскими и линии тока не совпадают с горизонтальными сечениями ванны. Вследствие этого потребовался комплекс измерений. Прежде всего были проведены измерения под торцами электродов в направлении к подовому электроду. Как и следовало ожидать, градиент потенциала под торцом остается постоянным, и разность потенциалов меняется пропорционально расстоянию. Это значит, что эквипотенциальные поверхности под торцами лежат в горизонтальных плоскостях и параллельны одна другой. У краев торца эквипотенциальные поверхности загибаются и идут вверх. Между двумя соседними электродами имеются плоскости нулевого потенциала, параллельные вертикальным сечениям ванны. Наличие этих плоскостей и определяет строение поля трехфазной печи и отличие последнего от полей однофазной печи.

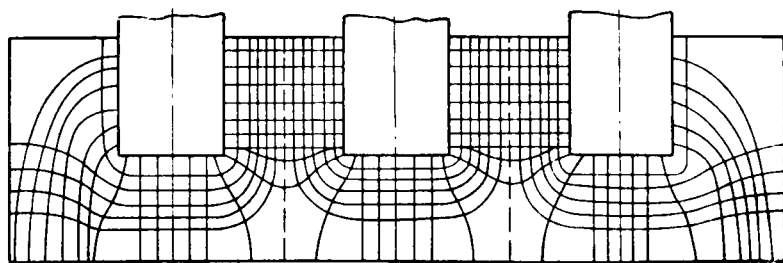
На рис. 177, а—в даны вертикальные разрезы полей при электродах диаметром 10 см соответственно при трех значениях $d_{м.з}$: 5; 7,5 и 10 см. На рис. 178 приведен горизонтальный разрез поля для электрода диаметром 10 см на глубине 3 см от поверхности колошника. Сравнение этих рисунков показывает, что линии тока от электрода к электроду (ток, текущий по схеме «треугольник») идут почти параллельно и при уменьшении диаметра электрода или межэлектродного расстояния почти никаких изменений они не претерпевают.



a



б



в

Рис. 177. Поле трехфазной печи

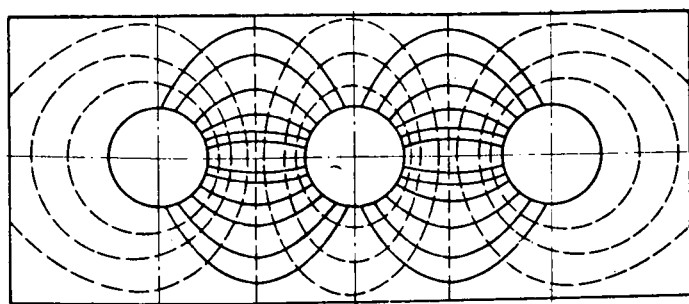


Рис. 178. Горизонтальный разрез поля трехфазной печи

Из рис. 178 видно, что в горизонтальном разрезе линии тока, шунтирующие электроды, по мере удаления от оси симметрии печи выгибаются в сторону футеровки. Однако ни одна линия тока, отходящая от крайних сторон электродов, не попадает на средний электрод. Это значит, что ток от крайних электродов к среднему течет не со всей поверхности крайних электродов, а только с половины.

С половины поверхности крайних электродов, обращенной к узкой стенке ванны, ток может течь только на под, т. е. по схеме «звезда»; соответствующие линии тока не показаны на рис. 178, так как в горизонтальный разрез они не могут попасть.

В. Распределение тока вдоль вертикальной оси трехфазной печи

Для определения распределения тока вдоль вертикальной оси печи был использован тот же метод изоляции электродов, который был применен при исследовании однофазной печи. В первой серии опытов были изолированы торцы электродов и вся внутренняя поверхность ванны. Таким образом, ток мог замыкаться только между боковыми поверхностями электродов.

Затем при одном поднятом электроде измеряли ток, протекающий между двумя другими электродами. После определения полного тока между электродами вставили изолирующую перегородку и определяли зависимость силы тока от глубины погружения перегородки в ванну.

В результате этих опытов было установлено, что *зависимость между силой тока и высотой проводящего слоя почти прямолинейна, т. е. сила тока прямо пропорциональна высоте проводящего слоя.*

На рис. 179 приведена одна из полученных кривых. Небольшой загиб вниз у концов электродов объясняется односторонним распором линии тока около торцов. Эти же опыты повторены при изоляции половины боковой поверхности электрода, обращенной к грани ванны. Введение такой изоляции не вызывает существенного изменения тока и еще раз подтверждает, что ток к среднему электроду

течет с одной половины крайнего электрода, обращенной к среднему электроду.

В следующей серии опытов было определено распределение плотности тока, текущего от электродов на под, т. е. составляющую тока по схеме «звезда».

Для этого одна половина крайнего электрода, обращенного к среднему электроду, была изолирована сплошной изоляцией, а другая половина — полосками изоляции, в результате чего длина электрода была разделена на шесть частей. Распре-

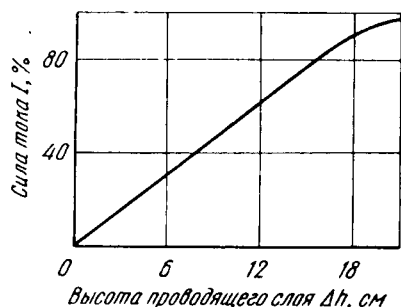


Рис. 179. Зависимость тока I , протекающего по схеме «треугольник», от высоты Δh проводящего слоя

деление плотности тока оказалось аналогичным распределению в однофазной печи, т. е. *ток стекает на под с половины боковой поверхности электрода*, но плотность тока по мере приближения к торцу электрода растет. Для среднего электрода распределение плотности тока подчиняется несколько иной закономерности. Ток стекает на под только с незначительной нижней зоны электрода, а верхняя его зона участия в передаче тока по схеме «звезда» не принимает. Это положение непосредственно вытекает из рассмотрения приведенных выше картин распределения полей. Как видно из рис. 177 и 178, нулевым потенциалом обладает проводящий под; сопротивление трубки тока определяется расстоянием от электрода до пода. Но таким же нулевым потенциалом обладают и симметричные плоскости, проходящие между электродами, и ток, текущий по схеме «треугольник», можно рассматривать как ток, текущий по схеме «звезда» между данным электродом и этой нулевой плоскостью. Так как расстояние между электродом и этой симметричной плоскостью меньше, чем между электродом и подовой плоскостью, то, естественно, токи, текущие от электрода к электроду, должны быть больше; а для верхних зон электрода токи, текущие на под, уменьшаются до нуля.

Г. Величины токов, замыкающихся по схемам «звезда» и «треугольник»

Для определения величины токов, текущих по схемам «звезда» и «треугольник», был проведен ряд опытов, при различных диаметрах электродов и различных межэлектродных расстояниях. В каждом опыте сначала регистрировали общие линейные токи, текущие по электродам. Затем между электродами вдоль нейтральных плоскостей ставили изолирующие перегородки и определяли токи, текущие только через под, следовательно, определяли только токи

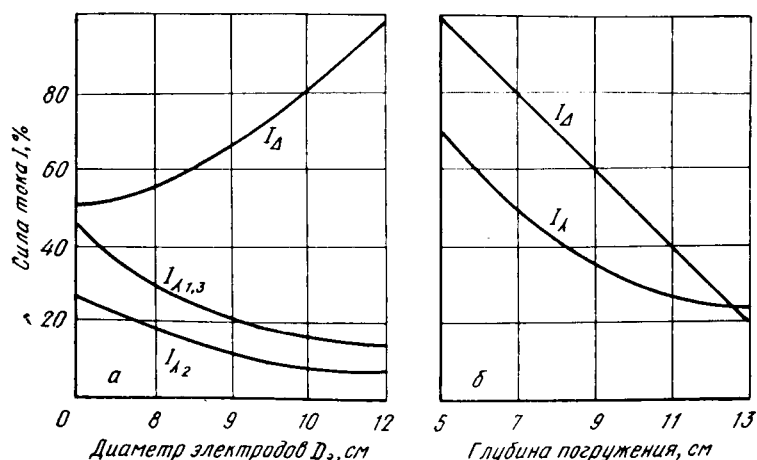


Рис. 180. Зависимость токов, протекающих по схемам «треугольник» и «звезда», от диаметра электродов и глубины погружения их в ванну

между электродами, т. е. текущие по схеме «треугольник». Во всех опытах торцы электродов были изолированы.

На рис. 180, а приведена зависимость токов от диаметра электродов, которая показывает, что с увеличением диаметра ток между электродами растет. При увеличении D_3 с 8 до 11 см ток увеличивается почти вдвое.

Ток, текущий по схеме «звезда», наоборот, с увеличением диаметра электродов уменьшается. Из этого рисунка видно, что ток, текущий по схеме «звезда» от второго электрода, значительно меньше, чем от первого и третьего.

На рис. 180, б приведена зависимость тока от глубины погружения электродов в ванну. Эта зависимость носит иной характер: с увеличением глубины погружения электродов токи обоих видов растут. Ток, текущий по схеме «треугольник», меняется по линейному закону, а кривая тока, текущего по схеме «звезда», по мере увеличения d_m , приближается к горизонтальной линии. Однако распределение токов в ванне действительной печи значительно отстает от этих закономерностей, вследствие образования под электродами газовых сфер и неоднородности электропроводности ванны.

5. Электропроводность шихтовых материалов

Основным свойством шихты, влияющим на распределение тока и мощности в ванне, является ее электропроводность. Главными компонентами шихты, определяющими состав последней, являются восстановитель, окислы и металлы.

Рассмотрим прежде всего восстановитель, так как во многих случаях общая электропроводность ванны определяется именно им.

А. Электропроводность восстановителей

В качестве восстановителя в ферросплавном и карбидном производстве используют антрациты, каменные и древесные угли и коксы (каменноугольный, нефтяной, торфяной).

Все эти группы материалов сильно отличаются друг от друга по свойствам. Но и внутри каждой группы различие восстановителей в зависимости от месторождения и способа обработки настолько велико, что трудно характеризовать группу каким-либо определенными цифровыми данными. Поэтому приходится в каждом случае устанавливать пределы, внутри которых меняются те или иные физико-химические свойства данной группы восстановителей.

Классификации и изучению физико-химических свойств восстановителей посвящена обширная литература. Рассмотрение вопроса в целом выходит за пределы данной работы. Поэтому в табл. 24 приведена только основные данные физико-химических свойств интересующих нас восстановителей.

Однако в этой таблице не учтены такие важные факторы, влияющие на электропроводность, как модификация материала и температура. Но если их не учитывать, то сопротивление углеродистых материалов является не менее колеблющейся величиной, чем сопротивление дуги. Так, сопротивление древесного угля (см. табл. 24, по данным Берля для порошка под давлением 350 ат) в 1000 раз меньше сопротивления нефтяного кокса, а между тем в электропечах при одинаковой кусковатости удельная проводимость этих материалов одна и та же.

Такое резкое различие в физико-химических свойствах углеродистых материалов современная теория объясняет их структурой.

По данным ряда авторов, антрациты состоят из мелких слабоориентированных кристаллов графита, в которых имеются включения органических веществ. Эти включения обуславливают высокое удельное электрическое сопротивление антрацита.

ТАБЛИЦА 24

СРЕДНИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВОССТАНОВИТЕЛЕЙ

Наименование материала	Углерод, %	Пористость, %	Реакционная способность	Удельное электросопротивление, МОм
Антрацит	75—93	1—3	500	$1,8 \cdot 10^{-10}$
Каменноугольные коксы	80—95	50—60	420—480	6,0
Нефтяной кокс	82—97	65	470—500	10^{11}
Древесный уголь	84—97	77	300—400	10^8
Угольный электрод	—	15—20	500—550	3,0—14,0
Графитовый электрод	—	20—30	550—650	0,8—2,0

Аналогичную структуру имеют и каменные угли. Различие в величине электропроводности, по-видимому, объясняется степенью дисперсности кристаллов и физическими свойствами углеродистых включений.

При коксовании углей образуются кристаллы значительно большей величины. Одновременно происходит разложение органических веществ, вследствие чего значительно повышается электропроводность продукта коксования. Чем выше температура коксования, тем полнее происходит карбонизация органических включений и тем, следовательно, ниже должно быть удельное сопротивление кокса. Нефтяной кокс, например, образуется при 350—400° С, а литейный при 900—1100° С, поэтому в последнем и разложение и удаление органических включений происходит полнее и его электропроводность выше.

Отказываясь от общих цифровых характеристик, можно сказать, что при низких температурах порядка 200—300° С удельное сопротивление антрацитов и каменных углей очень высокое, сопротивление древесного угля и нефтяного кокса несколько меньше, каменноугольные же коксы и графиты характеризуются значительно более высокой проводимостью.

Это различие в удельном сопротивлении между восстановителями отдельных видов сильно влияет на величину тока шихтовой проводимости и распределение мощности в ванне, но прежде, чем рассмотреть этот вопрос, остановимся на основных факторах, влияющих на удельное сопротивление восстановителя, — температуре и кусковатости.

При повышении температуры от 0° С удельное сопротивление всех углеродистых материалов уменьшается. Однако его изменение в интервале от 0 до 500—600° С незначительно. В следующем интервале

до 1000—1200° С удельное сопротивление углеродистых материалов резко падает. В этот период происходит резкое структурное изменение материала: органические соединения разлагаются и размеры кристаллов углеродистых материалов растут. При 1000—1200° С заканчивается первая стадия графитирования материалов.

В следующей, второй стадии происходит термическая рекристаллизация материала. Рост кристаллов резко замедляется и электропроводность материала не претерпевает больших изменений.

На рис. 181 приведены кривые зависимости изменения удельного сопротивления антрацита от температуры обжига по данным Арндта и Поллака.

При нормальной температуре удельные сопротивления образцов различаются довольно резко. При обжиге в диапазоне

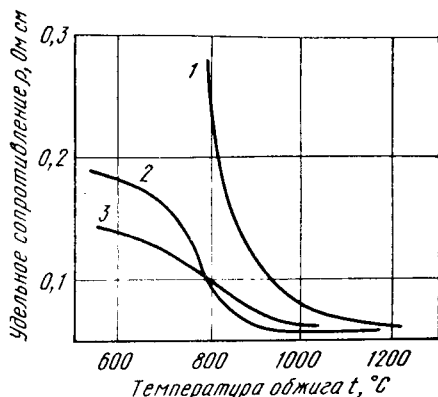


Рис. 181. Зависимость удельного сопротивления антрацита от температуры обжига при содержании летучих, %:

1 — 5,8; 2 — 1,7; 3 — 1,5

температур от 600 до 1000° С это различие настолько сглаживается, что все три кривые почти сливаются.

Как было указано выше, в диапазоне температур 500—1200° С происходит разложение органических соединений в углеродистых материалах и в связи с этим различия между их физико-химическими свойствами почти исчезают. Особенно полно выравнивание удельного сопротивления. Для иллюстрации в табл. 25 приведены результаты опытов графитирования основных углеродистых материалов.

ТАБЛИЦА 25

**УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
И ПЛОТНОСТЬ ГРАФИТИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Наименование материалов	Удельное сопротивление, мОм·см	Плотность, г/см ³	Наименование материалов	Удельное сопротивление, мОм·см	Плотность, г/см ³
Антрацит:			Кокс:		
№ 1	10,0	2,08	нефтяной . .	5,1	2,13
№ 2	8,8	2,10	литейный . .	5,2	2,14
№ 3	8,2	2,10	газовый . .	4,8	2,05

Удельное сопротивление определено для мелкозернистых порошков, опрессованных под давлением 150 кгс/см².

Мы видим, что удельное сопротивление всех этих материалов после графитирования колеблется в довольно узких пределах — от 4,8 до 10,0 мОм·см, в то время как до графитирования удельное сопротивление даже в пределах одной только группы антрацитов менялось в десятки и сотни раз.

Процесс графитирования углеродистых материалов протекает в любой рудно-термической печи. Восстановитель вместе с шихтой подается в печь при нормальной температуре, по мере опускания шихты в нижние зоны ванны температура ее повышается, достигая в зоне реакций для разных видов сплавов и режима печи 1500—2500° С.

В зависимости от скорости схода шихты процесс обжига и графитирования восстановителя может происходить в течение большего или меньшего промежутка времени, но существенно важно, что во всех случаях в зону реакций и вообще в нижние горизонты ванны восстановитель попадает при температурах второй стадии графитирования. А так как при этих температурах основные физико-химические свойства восстановителей всех видов, в том числе и химическая активность и электропроводность, нивелируются, то можно сделать вывод, что в нижних зонах вид восстановителя не может оказать существенного влияния на величину тока шихтовой проводимости. Скорость протекания реакции и величина тока шихтовой проводимости в нижних зонах ванны определяются не только реакционной способностью материала, но и физическими свойствами последнего, т. е. его пористостью и кусковатостью.

Совершенно иначе обстоит дело в верхних и средних зонах ванны. Шихта поступает на колошник в холодном состоянии и по мере углубления в ванну начинает нагреваться. К сожалению, мы не располагаем достаточно надежными данными об изменении температуры в ванне. По данным Морозенского и Вайнштейна температура отходящих газов на глубине 800 мм от поверхности шихты в печах ферросплавов колебалась от 270 до 960° С. Такая высокая температура обусловливается горением отходящих газов. Непосредственно под поверхностью шихты температура понижается, так как, во-первых, под поверхностью шихты не происходит сгорание газов, а во-вторых, там интенсивно испаряется влага шихты. По нашим наблюдениям, на глубине до 400—500 мм от поверхности колошника температура не поднимается выше 500—600° С. Следовательно, в этой зоне ванны существенно важное значение для тока шихтовой проводимости имеет не только модификация, но и вид восстановителя.

Так, например, при одинаковой кусковатости антрацита и литейного кокса ток шихтовой проводимости в верхних зонах печи при антраците будет значительно меньше, чем при литейном коксе, так как электропроводность антрацита меньше.

Дальше при заданной мощности печи с увеличением тока шихтовой проводимости должен уменьшаться ток дуговой проводимости и наоборот. Поэтому при замене одного восстановителя другим происходит перераспределение токов и мощностей в ванне. При выплавке ферросилиция, например, в качестве восстановителя обычно используют кокс, который характеризуется высокой электропроводностью. Вследствие этого в верхних зонах ванны протекают токи шихтовой проводимости значительной величины и, как говорят, колошник имеет «горящий ход». Если кокс заменить каменным углем, то благодаря высокому электрическому сопротивлению последнего, токи и мощности шихтовой проводимости уменьшатся. Чтобы поддерживать номинальную мощность печи, необходимо соответствующим образом увеличить ток дуги, углубив электроды в ванну.

Таким образом, применение восстановителя с меньшей удельной проводимостью способствует углублению электродов в ванну и увеличению концентрации тепла в нижних зонах ванны в области тигля.

Вид восстановителя имеет существенное значение и для средней зоны ванны, где господствуют температуры от 500 до 1200° С. Здесь протекают самые важные изменения свойств углеродистого материала — первая стадия графитирования. В этой стадии резко повышается его электропроводность. Следовательно, в средней зоне печи должны сильно возрасти ток и мощность шихтовой проводимости. Однако температура, при которой происходит резкое повышение электропроводности, углеродистых материалов различных видов, различна, и даже такой широкий диапазон (500—1200° С) не всегда выдерживается. На рис. 181, например, было показано, что удельное сопротивление двух сортов антрацита начинает уменьшаться при 600° С и достигает минимума при 900° С, а у третьего сорта оно начинает уменьшаться при 700—800° С и достигает минимума при 1050° С.

Естественно, что чем выше критическая температура, тем ниже расположена зона шихты с повышенной проводимостью и, следовательно, больше концентрация тока и мощности шихтовой проводимости вблизи стенок тигля.

С этой точки зрения представляет большой интерес определение электрических характеристик восстановителей тех сортов, которыми мы пользуемся на руднотермических печах.

На рис. 182 приведены четыре кривые для четырех фракций кокса, взятого непосредственно из бункера одной ферросилициевой печи. Мы видим, что резкое изменение удельного сопротивления для всех четырех кривых наступает при температуре от 600 до 900° С. Здесь не наблюдается такое многократное падение удельного сопротивления, как для антрацитов. Это объясняется тем, что в коксе в период обжига уже частично проходит первая стадия графитирования — удаление летучих.

Фактором, влияющим на электропроводность восстановителя, является его кусковатость.

Если между двумя электродами находится кусковатый материал, то ток от электрода к электроду проходит по нескольким параллельным цепям, состоящим из последовательно соединенных кусков. Сопротивление каждой параллельной цепи состоит из сопротивления самих кусков и переходного сопротивления между ними. Переходное сопротивление контакта для углеродистых материалов, так же как для металлов, значительно больше, чем сопротивление самого материала, поэтому в основном проблема сводится к изучению контактного сопротивления. С уменьшением размеров кусков одновременно с увеличением числа контактов в каждой цепи растет и число параллельных путей тока, причем увеличение числа цепей значительно

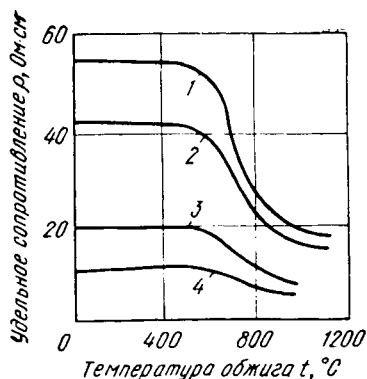


Рис. 182. Зависимость удельного сопротивления кокса от температуры при размерах кусков кокса, мм:

1 — 1; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 20

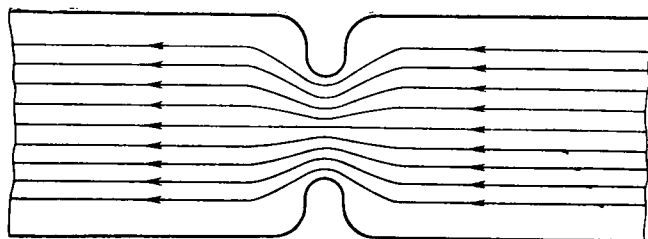


Рис. 183. Прохождение линий тока в точке действительного контакта

обгоняет рост числа контактов в отдельной цепи. Отсюда напрашивается вывод, что с уменьшением кусковатости должно уменьшаться и общее сопротивление. Однако это не так. Увеличение числа контактных сопротивлений имеет гораздо большее значение, поэтому с уменьшением кусковатости общее сопротивление растет, а не понижается.

Как бы тщательно ни были обработаны поверхности двух материалов, при наложении их друг на друга идеальный контакт не получается. Это объясняется тем, что при обработке поверхность материала остается шероховатой. Давление обычно воспринимают микроскопические выступы на соприкасающихся поверхностях и передают его толще пластинок. В местах сопротивления двух таких микроскопических бугорков образуется небольшая площадка действительного касания (контакта) материалов. Очевидно, что ток между двумя контактирующими поверхностями будет проходить через эти площадки. На рис. 183 представлена примерная картина протекания тока для этого случая. Из нее видно, что линии тока подходят к грани одного контакта, собираются у площадок действительного касания и переходят во вторую среду. Очевидно, чем меньше будет поверхность упругого касания, тем ближе (при данном давлении) будут расположены поверхности действительного касания и, значит, ближе друг к другу расположатся линии тока. Иначе говоря, плотность тока в поверхностях действительного контакта должна быть в сотни и тысячи раз больше, чем в свободном сечении контактирующего тела. Точнее, плотность тока в площадках действительного контакта во столько раз превысит плотность тока в свободном сечении контактирующих тел, во сколько раз последнее больше первого.

Если обозначить через j_d и j_c плотности токов, а через S_d и S_c соответствующие поперечные сечения, то плотность тока на площадке действительного касания выразится формулой

$$j_d = j_c \frac{S_c}{S_d}. \quad (X-15)$$

Контактное сопротивление каждого бугорка можно определить как сопротивление проводника по формуле

$$r_{\text{кон}} = \rho \frac{\lambda_6}{S_d}, \quad (X-16)$$

где λ_6 — высота двух соприкасающихся бугорков;

ρ — удельное сопротивление материала;

S_d — площадка действительного касания данных бугорков.

Общее сопротивление контактов можно определить, если рассматривать все элементарные площадки касания как параллельные соединения.

Подробное исследование вопроса показывает, что существенную роль в работе контактов играет не только абсолютная величина контактного сопротивления, но и распределение площадок действительного касания. Если эти площадки расположены очень близко друг к другу, то взаимное их влияние как в электрическом, так и в тепловом отношении велико. Контактное сопротивление увеличивается и работа контактов протекает при более высоких температурных градиентах. При неблагоприятных условиях температура контактирующей площадки поднимается до точки плавления материалов, последние оплавляются, и в точке касания зажигается дуга, которая приводит к образованию раковин и разрушению контактов.

Теория контактов приводит к выводу, что два соприкасающихся куска восстановителя в крайнем случае могут иметь три устойчивые точки касания, а следовательно, и три физических контакта для перехода тока от одного куска к другому. Однако ввиду высокой пористости восстановителей всех видов, и особенно кокса (по сравнению с металлическими проводниками), поверхность их очень шероховатая и поэтому возникновение трех точек контакта не всегда вероятно, особенно если учесть, что шихта постоянно находится в движении и возникающие контакты при этом движении будут часто нарушаться.

Величина площадки действительного контакта прямо пропорциональна давлению на контакт и обратно пропорциональна разрушающему усилию материала. Площади контакта восстановителей больше, чем металлических проводников. Например, разрушающее усилие для меди равно 5200, а для графита — 1320 кгс/см², следовательно, при одинаковых давлениях у графитовых контактов площадь действительного контакта будет почти в четыре раза больше, чем у медных контактов.

По-видимому, у остальных восстановителей разрушающее усилие будет еще меньше и, следовательно, площадь действительного контакта еще больше.

Но малое разрушающее усилие является источником другого отрицательного явления. При движении кусков восстановителя и трении их друг о друга будет происходить обламывание контактирующих площадок и нарушение контактов. Естественно, что в точках нарушения контактов будут обрываться токи и возникать перемежающиеся дуги. Такие дуги можно наблюдать на поверхности колошника даже при сравнительно спокойном ходе печи. Особенно хорошо можно их наблюдать в период пуска печи после капитального ремонта ванны. В таких случаях обычно под электроды закладывают кокс и опускают электроды до соприкосновения с последним. Таким образом, ток от электродов течет на под черз куски кокса. По мере сгорания последних нарушаются контакты и между кусками кокса проскакивают перемежающиеся дуги.

С увеличением кусковатости число промежуточных контактов и вместе с тем сопротивление последовательной цепи уменьшается. Если считать, что куски имеют форму шаров, то сопротивление цепи меняется обратно пропорционально диаметру кусков (рис. 184).

С уменьшением кусковатости связано и другое явление. Как видно, величина поверхности действительного контакта при уменьшении давления на каждый кусок уменьшается. Из теории сыпучих тел известно, что при уменьшении размеров зерна рыхлость материала растет. При этом общее и удельное давления, приходящиеся на каждое зерно, уменьшаются; уменьшается, следо-

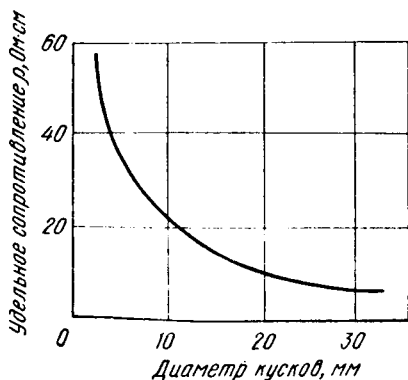


Рис. 184. Зависимость удельного сопротивления кокса от крупности кусков

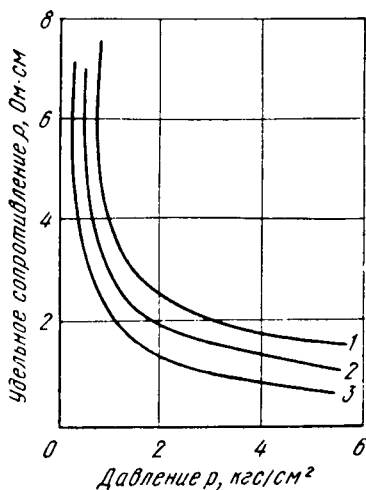


Рис. 185. Зависимость удельного сопротивления кокса от давления при размерах кусков, мм:

1 — 5; 2 — 15; 3 — 30

вательно, и давление на каждую точку действительного контакта, что обуславливает сокращение его площади и рост контактного сопротивления.

Если к свободно насыпанному восстановителю приложить внешнюю силу, то с увеличением общего давления возрастет и давление в точках действительного контакта, что повлечет за собой уменьшение общего электрического сопротивления материалов. При очень высоких давлениях происходит смятие шероховатостей на гранях соприкосновения кусков, материал прессуется и сопротивление кускового материала приближается к сопротивлению массивного однородного материала. На рис. 185 приведены три кривые зависимости удельного сопротивления кокса различной кусковатости от давления. Из кривых видно, что в довольно узких пределах давлений (от 0 до 2 кгс/см²) удельное сопротивление кокса резко падает.

В ваннах руднотермических печей давление создается только собственным весом шихты. Удельный вес последней зависит от ее состава. Для 45%- и 75%-ного ферросилиция он составляет соответственно ~2,0 и 1,0 кгс/см³. Примерно в таких же пределах лежит удельный вес и остальных сплавов. При таких удельных весах и небольшой глубине ванны давление, создаваемое собственным весом шихты, будет незначительным. Например, на глубине ~1 м это давление составит ~0,15 — 0,20 кгс/см³ и на этой глубине благодаря давлению, создаваемому собственным весом шихты, электрическое сопротивление последней уменьшится примерно в полтора раза.

В средней и нижней зонах печи проявляется еще и другой фактор. Здесь шихта начинает размягчаться, спекаться и приобретает большую пластичность. Поэтому для этих зон теория контактных сопротивлений теряет силу. Отдельные микроскопические площадки соприкосновения, даже при малых давлениях, резко увеличиваются и соответственно падает контактное сопротивление.

Б. Электропроводность окислов

Сопротивление шихты в целом определяется свойствами не только восстановителя, но и остальных ее компонентов, т. е. различных окислов железа в виде руды и металлической стружки.

Все окислы характеризуются весьма высоким удельным электрическим сопротивлением и падающей характеристикой. С увеличением температуры удельное сопротивление падает. Однако, даже при весьма высоких температурах, приближающихся к точке их плавления, удельное сопротивление большинства шихтовых материалов сохраняется весьма высоким. В качестве примера укажем, что удельное сопротивление одного из образцов кварцита при 20° С составляет $2,4 \cdot 10^{16}$ Ом·см, а при 830° С оно падает до $5,6 \cdot 10^3$ Ом·см.

Еще более резко падающую характеристику имеет окись кальция. При 20° С ее удельное сопротивление очень велико, при 500° С оно падает до $7 \cdot 10^8$ Ом·см, а при 1200° С — до 960 Ом·см. При более высоких температурах удельное сопротивление окиси кальция еще меньше. Поэтому в верхней зоне ванны основные шихтовые материалы можно рассматривать как непроводящие включения между кусками восстановителя, в средних и нижних зонах они начинают проводить токи, но и тут их электропроводность весьма мала.

В. Электропроводность металлов

Совершенно иной характер носит электропроводность металлов и особенно железа, которое является одним из основных компонентов шихты ферросплавов.

Удельное сопротивление железа при 20° С составляет $\sim 9,9 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. Железо характеризуется положительным температурным коэффициентом и его удельное сопротивление с повышением температуры растет. На рис. 186, а приведена примерная кривая зависимости удельного сопротивления железа для температур от 20 до 1000° С. Она показывает, что при росте температуры от 20 до 1000° С удельное сопротивление железа возрастает почти в шесть раз.

Вообще для металлов зависимость удельного сопротивления от температуры можно выразить формулой

$$\rho_t = \rho_{t_1} [1 + \alpha_t (t - t_1)], \quad (X-17)$$

где ρ_t — удельное сопротивление при температуре t ;

ρ_{t_1} — то же, при температуре t_1 ;

α_t — температурный коэффициент.

Для различных металлов и различных диапазонов температур α_t имеет различные значения.

Согласно данным Н. П. Мокровского и А. Р. Ригеля, удельное сопротивление меди, никеля, кобальта, железа и марганца характеризуется уравнениями, приведенными в табл. 26. Кроме уравнений, в таблице приведены пределы температур, для которых годны эти уравнения, и отношение удельных сопротивлений жидкого металла к твердому при температуре плавления.

ТАБЛИЦА 26

УРАВНЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Вещество	Уравнения удельного сопротивления ρ_t , мкОм·см	$t_1 \leq t \leq t_2$, °C	$\left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{т}}\right)_{T.пл}$
Медь:			
твердая	$1,73 [1 + 4,2 \cdot 10^{-3} (t - 20^\circ \text{C})]$	$20 \leq t \leq 1080$	2,1
жидкая	$20 [1 + 5 \cdot 10^{-3} (t - 1080^\circ \text{C})]$	$1100 \leq t \leq 1600$	
Никель:			
твердый	$38 [1 + 6,5 \cdot 10^{-4} (t - 400^\circ \text{C})]$	$400 \leq t \leq 1450$	1,3
жидкий	$85 [1 + 1,5 \cdot 10^{-4} (t - 1450^\circ \text{C})]$	$1450 \leq t \leq 1700$	
Кобальт:			
твердый	$86 [1 + 4 \cdot 10^{-4} (t - 1150^\circ \text{C})]$	$1150 \leq t \leq 1490$	1,05
жидкий	$102 [1 + 6 \cdot 10^{-4} (t - 1490^\circ \text{C})]$	$1490 \leq t \leq 1700$	
γ -железо	$115 [1 + 2 \cdot 10^{-4} (t - 900^\circ \text{C})]$	$900 \leq t \leq 1400$	0,9
β -железо	$126 [1 - 2 \cdot 10^{-4} (t - 1400^\circ \text{C})]$	$1400 \leq t \leq 1535$	
Железо жидкое	$110 [1 + 3 \cdot 10^{-4} (t - 1535^\circ \text{C})]$	$1535 \leq t \leq 1700$	
α -марганец	$260 [1 + 3 \cdot 10^{-4} (t - 20^\circ \text{C})]$	$20 \leq t \leq 740$	0,6
β -марганец	$164 [1 - 1,3 \cdot 10^{-3} (t - 745^\circ \text{C})]$	$745 \leq t \leq 1070$	
γ -марганец	$80 [1 - 9 \cdot 10^{-4} (t - 1070^\circ \text{C})]$	$1070 \leq t \leq 1150$	
δ -марганец	$69 [1 - 4,3 \cdot 10^{-4} (t - 1150^\circ \text{C})]$	$1150 \leq t \leq 1150$	

Для иллюстрации на рис. 186, б приведены графики этих закономерностей для меди, никеля, железа и марганца.

Из кривых видно, что удельное сопротивление железа при достижении температуры плавления составляет ~ 120 мкОм·см и при плавлении падает до 110 мкОм·см. Правда, в литературе приводятся и значения, несколько отличные от этих данных; на-

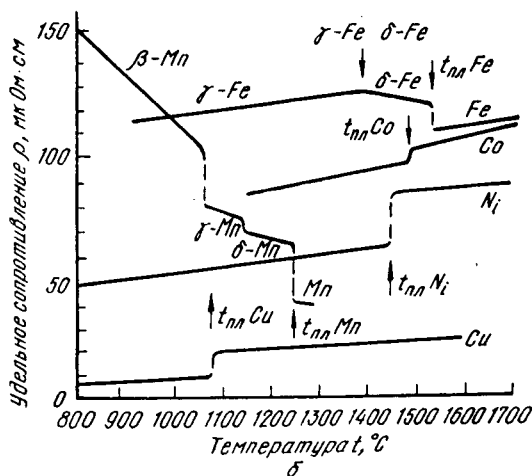
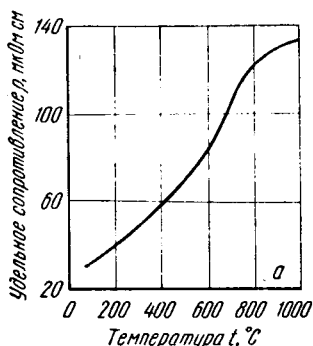


Рис. 186. Зависимость удельного сопротивления от температуры

пример, удельное сопротивление марганца при температуре плавления составляет 65 мкОм·см и при плавлении оно падает до 40 мкОм·см.

Следует еще остановиться на кусковатости железа, подаваемого в печь. Когда размеры кусков железа достаточно велики, переходное сопротивление в контакте между кусками не играет существенной роли. Но при подаче мелких кусков и, особенно, стружки дело меняется. В этом случае общее сопротивление стружки определяется не только удельным сопротивлением. Оно весьма зависит от величины стружки и окисления ее поверхности (ржавчины). В верхних зонах ванны, где температура и давление малы, стружка слабо уплотнена; вследствие этого контактные сопротивления между отдельными кусками стружки и восстановителя велики, в результате чего увеличивается ее общее сопротивление. В средних и нижних зонах, благодаря повышению давления и размягчению стружки, контакты между отдельными кусками улучшаются и величина контактных сопротивлений падает. Таким образом, разница в общем сопротивлении стружки в верхних и нижних зонах ванны несколько уменьшается, но все же сопротивление стружки в нижних зонах в несколько раз больше, чем в верхних. Особенно резко эта разница заметна при выплавке сплавов с высоким содержанием железа. В период пуска, когда температура ванны еще низка, в печи находится большое количество железной стружки; благодаря ее высокой электропроводности общее сопротивление шихты невелико и ток шихтовой проводимости достигает большой величины. Мы видели, например, что при выплавке 45%-ного ферросилиция в момент пуска печи, когда дуга еще отсутствует, печь забирала до 6—7 МВт, т. е. номинальную мощность. С течением времени при разогреве шихты и повышении ее температуры ток шихтовой проводимости начинает уменьшаться.

Г. Электропроводность шихтовой смеси

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что основным элементом шихты, определяющим ее электропроводность, является восстановитель. Остальные элементы шихты могут в той или иной степени исказить основную электропроводность, определяемую восстановителем. Но так как каждый восстановитель имеет свою электрическую характеристику, то для каждого сплава вопрос электропроводности должен быть изучен индивидуально, применительно к конкретным компонентам шихты.

Надо иметь в виду, что интегральная электропроводность шихтовой смеси зависит не только от соотношения между количествами компонентов смеси, но и от соотношения между размерами их кусков.

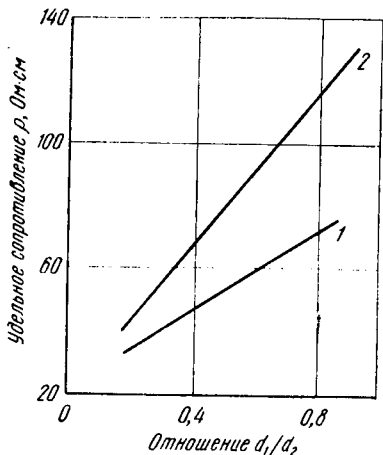


Рис. 187. Зависимость удельного сопротивления смеси кокса и кварца от d_1/d_2 : 1 — 50% кварца; 2 — 63% кварца (d_1 — диаметр кусков кокса; d_2 — диаметр кусков кварца)

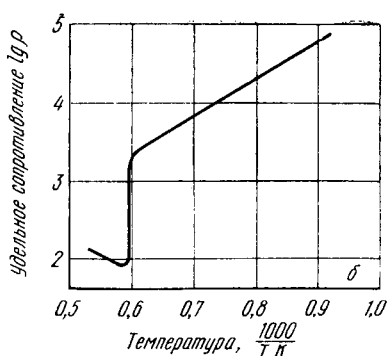
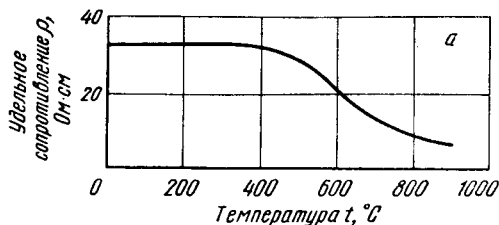
Для иллюстрации на рис. 187 приведены кривые зависимости удельного сопротивления шихтовой смеси для производства ферросилиция. Из кривых видно, что при данной кусковатости кокса с уменьшением диаметра кусков кварца удельное сопротивление шихты растет. Диаметр кусков кокса для первой кривой больше, чем для второй. Это объясняется тем, что при уменьшении размеров куски кварца лучше заполняют промежутки между кусками кокса, и поэтому они чаще нарушают контакты между кусками восстановителя.

Электропроводность шихтовой смеси зависит также от температуры. На рис. 188, а приведена такая зависимость для 45%-ного ферросилиция. Эта кривая весьма похожа на аналогичную кривую для чистого кокса. И тут более или менее резкое падение удельного сопротивления происходит в интервале температур 500—1000° С.

Остановимся теперь на скорости протекания реакции и ее влиянии на электрическое сопротивление ванны.

Рис. 188. Зависимость удельного сопротивления от температуры:

а — 45%-ный ферросилиций; *б* — логарифм удельного сопротивления Si



Как известно из геометрии, поверхности и объемы тел находятся в определенной зависимости друг от друга. Для шаров, например, отношение величины поверхности к объему выражается формулой $K_{п.о} = \frac{S}{V} = \frac{6\pi d^2}{\pi d^3} = \frac{6}{d}$.

Следовательно, чем меньше кусковатость, тем больше удельная поверхность восстановителя и тем энергичнее протекает реакция восстановления. При слишком мелкой фракции восстановитель в значительной части реагирует в верхней и средней зонах ванны, частично выносится газами и меньшее его количество попадает в нижнюю зону. Вследствие этого в ферросилициевых печах происходит заваривание и общее сопротивление ванны растет. Если же размеры кусков восстановителя слишком велики, а удельная поверхность мала, то значительное количество их попадает в нижнюю зону печи и благодаря их высокой электропроводности уменьшается суммарное сопротивление ванны. Это в свою очередь влечет за собой повышение тока шихтовой проводимости. Во избежание перегрузки печи в этом случае приходится поднимать электроды и уменьшать ток дуговой проводимости.

Оба крайних случая (как слишком мелкая, так и слишком крупная фракция восстановителя) приводят к колебаниям сопротивления печи и расстройству ее нормального хода. Поэтому кусковатость компонентов шихты должна быть такой, чтобы результирующее сопротивление ванны было оптимальным, соответствующим выбранным уровням номинальных токов и напряжений.

К сожалению, вопрос этот изучен недостаточно и кусковатость компонентов шихты выбирают обычно, исходя из данных практики.

6. Электропроводность расплавов

Расплав — продукт реакции — находится на поду печи и является одним из участков пути тока. В расплаве выделяется часть полезной энергии. В зависимости от размеров ванны и удельного сопротивления расплава эта энергия может составлять большую или меньшую часть общего энергетического баланса печи.

Удельное же сопротивление расплава может меняться в весьма широких пределах зависимости от его химического состава и температуры.

Рассмотрим наиболее типичные примеры.

А. Расплав в сталеплавильной печи

В сталеплавильной печи расплавом является жидкое железо. Выше было указано, что его удельное сопротивление, по данным ряда авторов, колеблется в пределах 100—140 мкОм·см. При таком низком удельном сопротивлении и номинальных токах в печи нельзя получить достаточную мощность. Например, в печи емкостью 3 т при номинальных токах, равных ~4000 А, мощность на фазу составляет ~400—450 кВт. Если принять диаметр проводящего слоя равным 45 см (полтора диаметра электрода) и считать, что под каждой фазой находится 1 т металла, то высота проводящего слоя составит ~70—80 см. При таких размерах проводящего слоя общее сопротивление фазы будет составлять около 5 мкОм. Между тем, при принятых

мощностях и токе сопротивление фазы должно быть ~ 9 мОм, т. е. почти в 500—600 раз больше. Ясно, что в этих условиях соприкосновение торца электрода с расплавом приводит к короткому замыканию фазы, и, чтобы ограничить ток короткого замыкания, в контур печи вводят большую индуктивность в виде дросселя или же повышают индуктивность самого трансформатора.

Б. Расплав ферросилиция

В рассматриваемых печах расплавом является жидкий ферросилиций, содержащий значительное количество железа. Для 45%-ного FeSi содержание железа, например, составляет $\sim 50\%$. Для 90%-ного сплава оно падает до 10%. Это уже указывает на то, что удельное сопротивление жидкого ферросилиция в значительной степени определяется железом. К сожалению, удельное сопротивление жидкого ферросилиция исследовано мало. По нашим данным, удельное сопротивление ферросилиция в жидком состоянии составляет ~ 100 мкОм·см.

Другой основной компонент этого сплава — силиций — также характеризуется довольно высокой электропроводностью. Согласно данным Н. П. Мокровского и А. Р. Ригеля, удельное сопротивление жидкого кремния в зависимости от температуры меняется в весьма широких пределах.

На рис. 188, б приведена кривая зависимости логарифма удельного сопротивления кремния от температуры. Она показывает, что при 1250°C удельное сопротивление кремния составляет 15 800 мкОм·см и при повышении температуры до 1670°C падает до 2500 мкОм·см, т. е. уменьшается в шесть раз. После расплавления оно снижается в 29 раз и падает до 86 мкОм·см. Мы видим, что удельное сопротивление жидкого кремния составляет примерно величину такого же порядка, как и удельное сопротивление жидкого железа.

Отсюда следует вывод, что сопротивление жидкого расплава ванны ферросилициевой печи очень мало. Поэтому соприкосновение электрода с расплавом, а тем более погружение его в расплав, приводит к короткому замыканию ванны. Проиллюстрируем это примером. Для печи мощность фазы составляет ~ 2000 кВт и при токе 30 кА эффективное сопротивление фазы будет равно 2,22 мОм. Предположим, что под фазой находится расплав высотой 80 см. Примем, что диаметр проводящего слоя в полтора раза больше диаметра электрода и удельное сопротивление расплава равно 100 мкОм·см. При этих условиях сопротивление расплава составляет ~ 1 мОм, т. е. оно в 2000 раз меньше эффективного сопротивления ванны при номинальной мощности последней. Отсюда делаем вывод, что сопротивление расплава, включенное последовательно сопротивлению дуги и шихты, настолько мало, что при расчетах им можно пренебречь.

Остается открытым вопрос о соотношении сопротивлений дуги и шихты и выделяющихся в них мощностей.

Сопротивление шихты меняется в широком диапазоне, так же изменяется диапазон ее температур. В шихтовой массе всегда найдутся слои, сопротивление которых соизмеримо с сопротивлением дуги. Поэтому ванна печи обладает определенной способностью саморегулирования и перераспределения мощностей между дугой и шихтой. Подробнее вопрос этот будет освещен при рассмотрении шунтирующих токов.

В. Расплав карбида кальция

Удельное сопротивление карбида кальция исследовалось многими авторами. Несмотря на это, о нем нет исчерпывающих данных, так как результаты этих исследований значительно отличаются друг от друга.

Первые работы в этой области были проведены Ханекопом. Согласно его данным, удельное сопротивление жидкого карбида кальция колеблется в пределах 0,04—0,05 Ом·см. Позднее исследования удельного сопротивления карбида кальция были проведены П. В. Гельдом. По его данным удельное сопротивление жидкого карбида колеблется в пределах 1,2—1,5 Ом·см. Наши исследования показали более широкий диапазон колебаний: 1,0—2,0 Ом·см. В последнее время исследования удельного сопротивления карбида кальция для широкого диапазона температур были проведены Р. Чугуряном. На рис. 189 приведена одна из полученных им зависимостей между удельным сопротивлением карбида кальция и температурой. Из кривой этой зависимости видно, что более или менее резкое понижение удельного сопротивления

наступает при температурах выше 1600—1700° С. При 1750° С оно колеблется в пределах 0,22—0,28, а при 1900° С падает до 0,08 Ом·см.

Обычно из печи карбид выдается при 1900—2000° С. Надо полагать, что температура расплава под электродом несколько выше. Действительно, картина температурного поля (рис. 190) показывает, что в этой области должны господствовать температуры порядка 2000—2100° С.

Сопоставление этих кривых с данными Чугуряна приводит к выводу, что удельное сопротивление расплава карбида кальция в печи должно быть порядка 0,08—0,25 Ом·см.

Исследования зоны плавления карбидной печи и удельного сопротивления шихты и расплава были проведены А. С. Микулинским и Л. В. Юмановой [23], которые определили, что удельное сопротивление шихты карбидной печи и верхних зонах печи при 1000° С составляет 10—12 Ом·см, а вблизи торца электрода при 1800° С — 0,2—0,3 Ом·см; удельное сопротивление расплава карбида кальция, по их данным, равно 0,11 Ом·см. Несколько неопределенно вводимое ими понятие об удельном сопротивлении «подэлектродного пространства». По подсчетам авторов, оно составит 0,67—2,50 Ом·см. По-видимому, эта величина характеризует эффективное сопротивление дугового промежутка и всего объема, занятого газами под электродом. Интересна еще величина удельного сопротивления «участка стенок горна карбидной печи». Ее величина определена равной 0,065—0,095 Ом·см. К сожалению, в работе не освещено, как авторы брали пробу и измеряли эту величину. Видно, этот слой является основной зоной реакций, понятие о которой было введено нами выше, т. е., это зона, в которой протекают основные реакции карбидообразования.

Сравнивая результаты отдельных исследователей, можно сделать вывод, что удельное сопротивление расплава карбида кальция при 1800—1900° С должно колебаться около 0,08—0,10 Ом·см.

В карбидной печи мощностью 7500 кВА между двумя выпусками под каждой фазой накапливается 0,5—0,6 т расплава. Если принять его удельное сопротивление в указанных выше пределах, то в расплаве должно выделяться ~10% энергии, подводимой к ванне. В этом случае при соприкосновении электрода с расплавом или погружении его в расплав уже не происходит короткое замыкание, как в сталеплавильных или ферросилициевых печах.

Следует отметить, что анализ распределения мощности в ванне карбидной печи приведен в упомянутой статье А. С. Микулинского и Л. В. Юмашевой. В ней показано, что энергия, выделяющаяся в расплаве, по данным, полученным этими авторами, составляет ~10% всей энергии, выделяющейся в ванне, т. е. по величине совпадает с цифрами, приведенными выше. Следует заметить, что меняя режим печи, можно в определенных пределах добиться перераспределения энергии. Как было отмечено, за последнее время в практике эксплуатации карбидных печей применяют слив с одной летки. Это значит, что тигли всех трех фаз сливаются в один общий тигель и в ванне печи образуется расплав с одним общим для всех трех фаз зеркалом. В этом случае наиболее горячие зоны расплава будут находиться под электродами и в достаточно узких зонах между ними. Эти же зоны будут характеризоваться наибольшей проводимостью; в этом случае ток не проникает глубоко в расплав. Он будет перетекать от фазы к фазе по сравнительно узкой и неглубокой полосе расплава, вследствие чего еще больше уменьшится количество энергии, выделяющейся в расплаве. Таким образом уменьшается прогрев расплава в нижних зонах ванны, что повышает вязкость расплава и затрудняет его выпуск. Кроме того, перегревается зеркало расплава и колошник получает горячий ход.

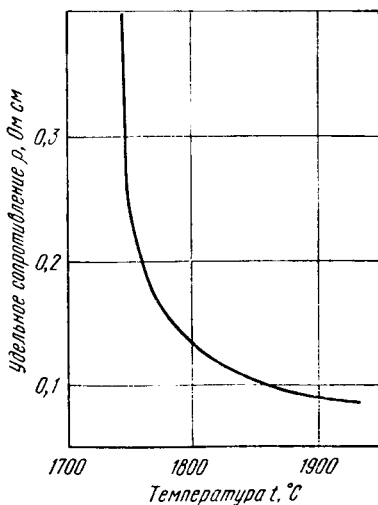
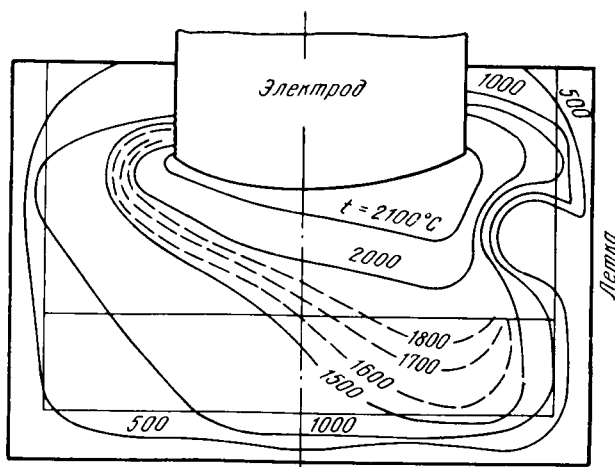


Рис. 189. Зависимость удельного сопротивления карбида кальция от температуры

Рис. 190. Распределение температур в ванне карбидной печи



В заключение укажем на опыты, проведенные О. С. Арутюновым, М. Б. Мегрбяном и Э. Б. Симоняном. В подину карбидной печи были вмонтированы металлические электроды, охлаждаемые водой. Их располагали под электродами печи на глубине 15—20 см от поверхности подового электродного блока. Измерения показали, что разность потенциалов между соседними фазами составляет 3—4 В. Это значит, что ток не проникает в подовые электроды и последние представляют почти эквипотенциальные объемы. Токи между фазами замыкаются в верхней зоне расплава, где господствуют высокие температуры и проводимости.

Г. Расплавы при наличии шлаков

В ряде случаев в ванне печи образуется значительное количество шлаков, играющих важную роль в энергетических процессах ванны. Шлак покрывает сверху жидкий расплав и выполняет определенные технологические функции. Вместе с тем происходит постоянный теплообмен между шлаком и расплавом. В шлаке же происходит преобразование части электрической энергии в тепловую. В зависимости от вида сплава и режима работы печи эта доля энергии может быть больше или меньше. Удельное сопротивление жидких шлаков значительно больше, чем металлов. Оно примерно совпадает с удельным сопротивлением расплавленных электродов; температурный коэффициент у них положителен.

Как известно, металлы характеризуются электронной проводимостью, а электролиты — ионной. Природа проводимости шлаков недостаточно выяснена. Наряду с ионной проводимостью в шлаках, по-видимому, имеет место и электронная проводимость. В пользу того, что шлакам свойственна также электронная проводимость, указывает и то, что у шлаков, богатых окислами FeO и MnO, как и у металлов, скачок проводимости в точке плавления незначителен. В электропечах дело осложняется еще тем, что процессы образования жидких шлаков и металла идут параллельно. Образующиеся капельки металла находятся во взвешенном состоянии в шлаке и влияют на интегральную электропроводность последнего. Характерным примером такого взаимодействия металла и шлака могут служить процессы в печи для выплавки малоуглеродистого ферромарганца. В начале процесса, в период расплавления шихты на поверхности колошника наблюдаются открытые дуги, как в сталеплавильной печи. После расплавления шихты концы электродов погружаются в кипящий шлак, и независимо от того, горит дуга у концов электродов или не горит, ток ответвляется от поверхности электродов через окружающий их шлак. Величина тока, очевидно, зависит от электропроводности шлака.

Поскольку электроды, срабатываясь, приобретают форму конуса, это также является еще одним признаком тесного контакта между электродами и шлаком. Весьма важно, что в процессе плавления в ванне в соприкосновении с электродами находится не чистый шлак и не металл, а их смесь в виде тонкой эмульсии. Ее элек-

тропроводность больше электропроводности шлака, но, конечно, меньше электропроводности металла. После окончания процесса плавления металл осаждается и шлак становится однородным. Исследования проб расплава и шлака показывают разницу в электропроводности шлаков в различные периоды работы печи.

На рис. 191, по данным Л. Г. Рошояна, показано, что при изменении температуры от 900 до 1200° С значенне ρ изменяется в 10^4 раз. Следовательно, этот диапазон температур является решающим для токов, протекающих через шлак. На рис. 192 приведены зависимости электропроводности от температуры для шлаков (а—в) различных составов. Они также показывают, что именно в диапазоне температур 900—1300° С происходит наиболее резкое изменение электрических свойств шлаков. В зависимости от характера сплава и толщины слоя шлака преобразование электрической энергии в тепло может протекать тремя путями.

1. Если толщина шлакового слоя невелика и вместе с тем в соответствии с требованиями технологии требуется высокая температура, то электрическая энергия будет преобразовываться в тепловую в дуге. В шлаке в этом случае выделяется весьма незначительное количество энергии. Такой процесс протекает в сталеплавильных печах в период рафинирования. Поверхность жидкого металла бывает покрыта тонким слоем шлака, а дуга горит непосредственно между металлом и электродом. Основания дуг находятся в небольших углублениях в шлаке, образующихся вследствие осевого давления столба дуги. Энергетический эффект шлака в этом случае невелик.

2. Если толщина шлака достаточно велика и вместе с тем под шлаком горит дуга, то шлак шунтирует дугу. Часть энергии выделяется в дуге, часть — в шлаке.

Характерным примером такого процесса является выплавка свинца. На рис. 193 приведена ванна такой печи по данным Г. Ф. Платонова. На поду ванны находится штейн и свинец 1, над ними расположен шлак 2, толщина которого в несколько раз больше толщины расплава, над шлаком находится шихта 3. Дуга горит непосредственно между торцом электрода и шлаком в газовом слое 4.

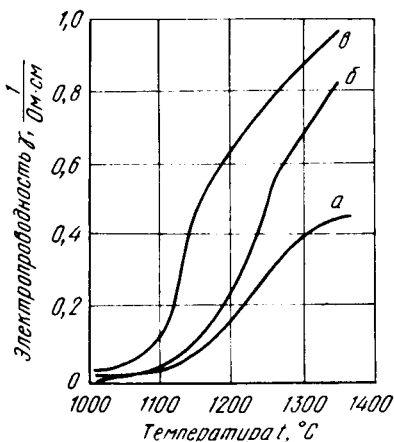


Рис. 192. Зависимость электропроводности шлаков от температуры при разных составах шлаков (%):

	FeO	SiO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
а	25	36	8	15	10
б	38	35	8	10	5
в	42	35	2	5	5

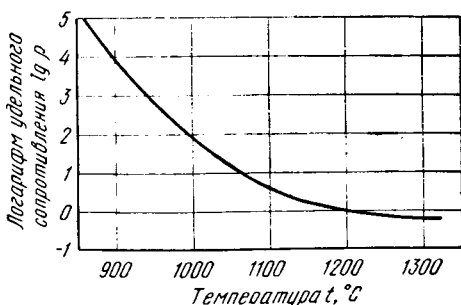


Рис. 191. Зависимость логарифма удельного сопротивления шлака среднеуглеродистого ферромарганца от температуры

По данным Г. Ф. Платонова, удельное сопротивление шлака составляет 0,69 Ом × см. Удельное сопротивление шлака в сотни раз больше удельного сопротивления металла и, следовательно, сопротивлением металла, расположенным в цепи тока последовательно с сопротивлением шлака, можно пренебречь.

Такие процессы протекают в печах при выплавке углеродистого ферромарганца.

При выплавке этого сплава образуется значительное количество шлака. Над шлаком располагается толстый слой шихты, а под шлаком — расплав. Удельное сопротивление расплава очень мало, так как он в основном состоит из марганца и железа. Удельное сопротивление шлака велико. Таким образом, в печах этого типа горит дуга, шунтированная шлаком и шихтой.

3. Параметры ванны и электродов могут быть выбраны так, что под электродом не

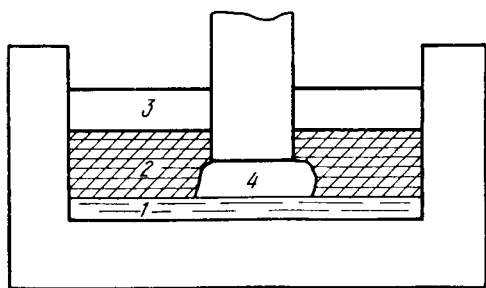


Рис. 193. Схема свинцовой электропечи

ляется вне шихты. Некоторым преимуществом этих печей является снижение требований к качеству шихты и особенно к ее грануляции. Но они характеризуются низкой производительностью и в этом их основной недостаток.

Д. Расплав в стекловаренной печи

Хотя описание стекловаренных печей не входит в объем данной работы, рассмотрим их расплав, так как он представляет типичный пример расплава с очень высоким удельным сопротивлением.

Электрический ток через стекло и в твердом и в жидком состоянии осуществляется ионами, поэтому электропроводность стекла по своему характеру является электролитической. Электропроводность стекла в сильной степени зависит от его химического состава и агрегатного состояния. Проводимость твердого стекла настолько мала, что его используют в качестве изолятора. С повышением температуры проводимость стекла резко увеличивается. Зависимость проводимости от температуры для стекла можно выразить экспоненциальной функцией. Из ряда таких формул наиболее приемлемой считается формула

$$\lg \gamma = A - \frac{Be^{\frac{\alpha_1}{T}}}{T}. \quad (X-18)$$

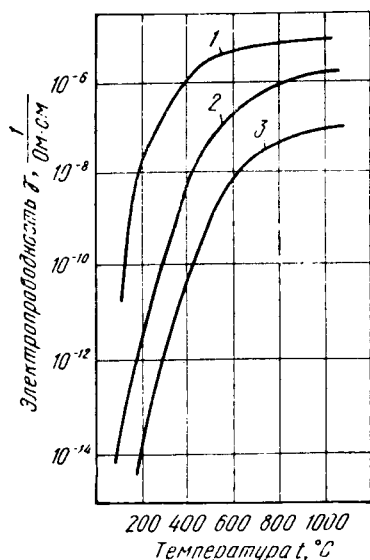


Рис. 194. Зависимость электропроводности стекол от температуры:
1 — натриевое стекло; 2 — фарфор;
3 — кварцевое стекло

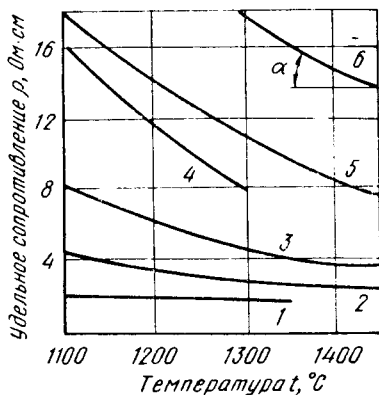


Рис. 195. Зависимость удельного сопротивления стекол от температуры:
1 — натриевый силикат; 2 — калиевый силикат; 3 — натриево-известковое стекло; 4 — свинцовое стекло; 5 — нейтральное стекло; 6 — пирекс

Для кварцевого стекла при изменении температуры от 20 до 1300° С удельное сопротивление меняется от $1 \cdot 10^{18}$ до $4 \cdot 10^5$ Ом·см., т. е. уменьшается в 10^{13} раз. На рис. 194 приведена зависимость электропроводности (масштаб логарифмический) от температуры для трех сортов стекла. Кривые показывают, что при переходе стекла в жидкое состояние зависимость проводимости от температуры уменьшается, но все же она остается заметной. Для иллюстрации на рис. 195 приведены кривые зависимости удельного сопротивления от температуры для разных стекол в диапазоне температур от 1100 до 1400° С.

Хотя величины удельного сопротивления весьма различаются, все они достаточно высоки. В среднем они колеблются в пределах 1,8—20 Ом·см.

Как видно, удельное сопротивление жидкой стекломассы в тысячи раз больше, чем жидкого металла. Поэтому в стекловаренных печах, конечно, не бывает коротких замыканий. При конструировании этих печей приходится заботиться не о предотвращении или ограничении коротких замыканий, а о правильном выборе геометрических размеров ванны, при которых печь могла бы работать с необходимой мощностью.

Глава XI

Тепловое поле в ванне печи

1. Введение

Тепловое поле играет очень важную роль в режиме работы печи, так как в основном им определяются очаги преобразования тепловой энергии в химическую. В значительной степени от него зависят также очаги химических преобразований. Математический анализ теплового поля еще сложнее, чем электрического. Изучение этих полей осложняется тем, что некоторые коэффициенты, характеризующие поле, являются функцией температуры и, следовательно, на различных участках ванны имеют различные значения.

Кроме того, конфигурация тепловых полей в значительной степени зависит от способа преобразования электроэнергии в тепловую. При наличии только дугового режима в определенных областях ванны, прилегающих к столбу дуги, температурные градиенты могут быть очень высокими, в то время как в объемах, где протекают шунтирующие токи, даже при высоких средних уровнях температуры градиент их незначителен.

Наконец, для характеристики теплового поля ванны существенную роль играет тепловая инерция. В областях же, занятых материалами в твердом и жидком состояниях, она очень велика.

В основу рассмотрения теплового поля ванны должны быть положены приведенные выше энергетические параметры ванны, на основании которых составлено уравнение (I-1).

Сначала исследуем строение теплового поля аналитическими методами, а потом остановимся на экспериментальных материалах.

При рассмотрении аналитических методов ограничимся только однофазными печами.

2. Тепловое поле печи при наличии параметров q_k и p_k

Через q_k мы обозначили долю электрической энергии, переходящей в тепловую в твердом теле вне перерабатываемого материала (в процессе косвенного действия), а через p_k — долю той же энергии,

выделяющейся в газовой сфере также вне перерабатываемого материала.

При наличии только параметра q_k уравнение (I-1) запишем в виде $q_k = 1$. (XI-1)

Оно показывает, что вся электрическая энергия преобразуется в тепло в твердом проводнике вне перерабатываемого материала и передается последнему в соответствии с законами теплопередачи. В самом же перерабатываемом материале тепло распространяется по закону теплопроводности.

Печами такого типа являются, например, печи для производства цианамида кальция, карбида кремния и др.

Цианамидная печь имеет цилиндрическую форму. По оси печи расположен угольный нагревательный элемент. Тепло, выделяющееся в элементе, передается шихте теплопроводностью. Часть этой энергии расходуется на эндотермический процесс — азотирование карбида кальция, а остальная теряется (потери печи). Отвлекаясь от деталей процесса, можно сказать, что передача тепла от электрода к шихте происходит по закону теплопроводности. То же самое наблюдается в печах карбида кремния.

В общем случае, как известно, передача тепла от нагретого тела к окружающей среде может происходить тремя способами — теплопроводностью, конвекцией и излучением. В печах рассматриваемых типов можно пренебречь теплопередачей последних двух видов и принять во внимание только теплопроводность.

Применять к тепловому полю только один закон теплопроводности можно в том случае, когда поле характеризуется параметром q_k . Действительно, дуга горит в газовой сфере тигля и выделяющееся при этом тепло вследствие конвекции и лучеиспускания передается внутренним стенкам тигля. От последних теплопроводностью оно распространяется в толще шихты. При рассмотрении мы отвлекаемся от эндотермических и экзотермических реакций и выделения тепла шунтирующими токами.

При принятых условиях температура любой точки изотропной среды будет функцией пространственного положения этой точки и времени

$$\theta = f(x, y, z, \tau), \quad (\text{XI-2})$$

где θ — температура данной точки с координатами x, y, z ;
 τ — время.

Тепло передается от точки с более высокой температурой к точке с более низкой, т. е. в сторону уменьшения градиента температуры. Общее количество тепла, проходящее за время $d\tau$ через некоторую площадку поверхностью dS , при толщине ее dn определяется законом Фурье:

$$dw = -\lambda_\tau \frac{d\theta}{dn} dS d\tau, \quad (\text{XI-3})$$

где λ_τ — коэффициент теплопроводности.

Знак «минус» указывает на то, что тепловой поток распространяется в сторону падения градиента температуры.

Если ввести понятие о тепловом потоке

$$Q = \frac{dw}{d\tau}, \quad (\text{XI-4})$$

где Q — тепловой поток, Вт,
то уравнение (XI-3) перепишем в следующем виде:

$$Q = -\lambda_{\tau} \frac{d\theta}{dn} dS. \quad (\text{XI-5})$$

Как известно, вектор теплового потока, или его плотность, равен потоку, проходящему через единичную площадку, перпендикулярную направлению потока:

$$\bar{q} = \frac{dQ}{dS} \bar{n}^0. \quad (\text{XI-6})$$

Подставив значение потока из уравнения (XI-5) получим

$$q = -\lambda_{\tau} \frac{d\theta}{dn} \bar{n}^0. \quad (\text{XI-7})$$

где $\bar{n}^0$ — единичный вектор данного направления, т. е. плотность теплового потока прямо пропорциональна температурному градиенту.

Отсюда получаем уравнение для изотерм:

$$\frac{d\theta}{dn} \bar{n}^0 = 0. \quad (\text{XI-8})$$

На основании этих уравнений можно показать, что и для теплового поля остается в силе уравнение Пуассона, которое записывается так:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{c\gamma_{\text{в}}}{\lambda_{\tau}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \quad (\text{XI-9})$$

где c — удельная теплоемкость среды;

$\gamma_{\text{в}}$ — объемный вес среды;

λ_{τ} — коэффициент теплопроводности.

Левая часть уравнения (XI-9) представляет количество тепла, поступающего в единицу времени; при заданных параметрах это количество тепла обуславливает подъем температуры со скоростью $\partial\theta/\partial\tau$.

Как известно из теории поля, сумма частных производных от скалярной функции обозначается оператором Гамильтона:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{\partial \theta}{\partial z} = \nabla \theta, \quad (\text{XI-10})$$

а сумма вторых частных производных — оператором Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \nabla^2 \theta = \Delta \theta. \quad (\text{XI-11})$$

Применяя эти операторы, уравнение теплового поля можно записать:

$$\nabla^2 \theta = \frac{c\gamma_{\text{в}}}{\lambda_{\tau}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau}. \quad (\text{XI-12})$$

В частном случае, когда тепловое поле переходит в установившееся состояние, производная температуры по времени становится равной нулю и уравнение Пуассона (XI-9) превращается в уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \nabla^2 \theta = 0. \quad (\text{XI-13})$$

Возможны и такие случаи, когда поле меняется только в двух или только в одном направлении.

В первом случае выражение (XI-9) принимает вид

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = \frac{c\gamma_B}{\lambda_T} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \quad (\text{XI-14})$$

а во втором

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{c\gamma_B}{\lambda_T} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \quad (\text{XI-15})$$

или соответственно для установившегося поля:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0; \quad (\text{XI-16})$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0. \quad (\text{XI-17})$$

Рассмотрим теперь случай, когда источники тепла находятся внутри рассматриваемого тела.

Источники тепла могут быть положительными (истoki) и отрицательными (стоки). Типичным примером истоков является преобразование в рассматриваемой среде электрической или химической энергии в тепловую (экзотермические реакции). Примерами стоков являются эндотермические реакции и процессы, связанные с агрегатным изменением среды (плавление, испарение, кристаллизация).

Для оценки источников тепла в качестве меры принимают их производительность p , т. е. количество тепла, которое поглощается или выделяется тем или иным истоком или стоком в единице объема в единицу времени. Единицей измерения производительности является Вт/м³.

Общее количество тепла, генерируемое источником в объеме dv за время $d\tau$, будет:

$$dw = p \, dv \, d\tau. \quad (\text{XI-18})$$

Тепловое поле при наличии такого источника выражается уравнением (XI-12), к левой части которого добавится новый член и оно примет вид

$$\nabla^2 \theta + \frac{p}{\lambda} = \frac{c\gamma_B}{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}. \quad (\text{XI-19})$$

В более общем случае в поле могут находиться несколько истоков и стоков; например, в шихте может выделяться тепло при

прохождении электрического тока и одновременно могут протекать экзотермические процессы или расплавление элементов шихты. В этом случае в левой части уравнение (XI-19) появится несколько слагаемых:

$$\nabla^2 \theta + \sum_{k=1}^n \frac{p_k}{\lambda_T} = \frac{c \gamma_B}{\lambda_T} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \quad (\text{XI-20})$$

где k — число истоков или стоков.

В случае установившегося режима, когда в объеме шихты температурные градиенты не изменяются, уравнение (XI-20) примет вид

$$\nabla^2 \theta + \sum_{k=1}^n \frac{p_k}{\lambda_T} = 0. \quad (\text{XI-21})$$

Следует отметить, что приведенные уравнения тепловых полей внешне выглядят просто, но в развернутом виде они превращаются в весьма сложные дифференциальные уравнения и в большинстве случаев трудно поддаются интегрированию.

Рассмотрение полей осложняется еще тем, что физические константы, входящие в эти уравнения, не остаются постоянными и меняются вместе с изменением теплового и электрического режима ванны. Несмотря на это, в литературе встречаются теоретические расчеты тепловых полей, подчиняющихся определенной закономерности.

В качестве примера приведем расчет теплового поля однофазной печи, приведенной П. В. Гельдом, В. К. Ивановым и А. С. Микулинским.

На рис. 196 приведена схема печи. Предполагается, что дуга занимает весь объем под электродом и тепло передается от ее боковой поверхности шихте. В последней шунтирующими токами генерируется тепло удельной мощностью p .

Предполагается, что электропроводность и теплопроводность среды вдоль вертикальной оси печи меняются по экспоненциальным законам:

$$\gamma = \gamma_0 e^{-2hz}; \quad \lambda_T = \lambda_{T_0} e^{-2nz}, \quad (\text{XI-22})$$

где h и n — постоянные коэффициенты.

Дифференциальное уравнение теплового поля для установившегося режима в цилиндрических координатах запишем в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} - 2n \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{p}{\lambda_{T_0}} e^{-2nz} = 0. \quad (\text{XI-23})$$

Принимаем, что ограничивающие поля поверхности являются изоляционными.

При решении уравнения (XI-23) были получены ряды, содержащие тригонометрические и гиперболические функции и функций

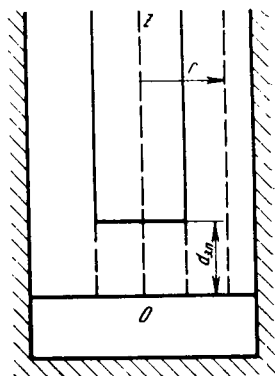


Рис. 196. Эскиз ванны к расчету теплового поля однофазной печи

Бесселя. В табл. 27 приведены результаты одного расчета, проведенного указанными авторами.

ТАБЛИЦА 27

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ, °C

Величи- на z	Значения r						Величи- на z	Значения r					
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0	2438	2338	1844	1422	1150	919	3	832	594	491	428	355	288
1	2238	2000	1722	1384	107	981	4	448	431	382	326	283	232
2	1305	955	771	658	546	442	5	255	243	231	209	186	164

Эти расчеты показывают, что основной очаг преобразования электроэнергии и протекания основных технологических процессов сосредоточивается в области, окружающей торец электрода.

Однако математические методы расчета тепловых полей так же затруднительны и малоприемлемы, как и электрических, так как они очень трудоемки и вместе с тем не отображают всего многообразия процессов, протекающих в ванне печи. Поэтому материалы экспериментального исследования дают лучшее представление о температурном поле ванны. Но прежде чем перейти к их рассмотрению, остановимся на строении тигля или очага плавления, так как оно оказывает большое влияние на распределение температуры в ванне.

3. Строение и форма тигля ванны

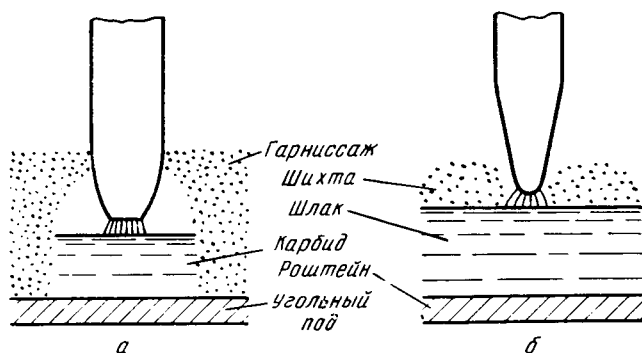
Тиглем печи будем называть ту часть ванны, в которой протекают основные физико-химические процессы образования сплава. Нужно тут же оговориться, что некоторые химические реакции происходят и вне тигля, но они играют второстепенную роль.

Тигель — наиболее важная и чувствительная область печи и в то же время он менее всего изучен. Это объясняется прежде всего трудностью экспериментирования. Будучи со всех сторон закрыт шихтой и сплавом и находясь в зоне наиболее высоких температур, тигель в производственных условиях недоступен для наблюдения.

Имеющиеся в литературе описания тиглей печей не дают ясного представления о них. Исторически наибольшего внимания заслуживают схемы строения тиглей, данные М. С. Максименко [18] в связи с классификацией отдельных видов производств. В печах для производства различных материалов строение тиглей различно. В карбидной печи (рис. 197, а) жидкий карбид располагается на поду ванны. Как указывает М. С. Максименко, дуга горит между концом электрода и жидким карбидом и закрыта сводом из шихты. В целом схема показывает, что дуга является центром тигля и окружена значительным газовым пузырем. В процессах, характеризующихся большим количеством шлака (рис. 197, б), дуга горит над шлаком и основной продукт реакции располагается на поду печи. В шлаке

Рис. 197. Схема строения тигля по М. С. Максименко:

а — для карбидной печи; *б* — для процессов с большим количеством шлаков



выделяется $\sim 25\%$ всех энергии. Дуга может быть либо закрыта шихтой, либо открыта.

Ниже будут показаны примеры другого строения тиглей, сейчас же изложим общие соображения о строении тигля руднотермической печи, в которой дуга играет доминирующую роль. При изучении ванн руднотермических печей создается следующее представление о строении тигля. Тигель однофазной печи имеет форму тела вращения. Основанием его служит масса жидкого сплава или шлака. Через его вершину в направлении оси в тигель входит электрод. Продолжением электрода является электрическая дуга, которая оканчивается на поверхности жидкого сплава.

Ось дуги является местом наивысших температур. При удалении от оси дуги температурный градиент резко снижается. Диссоциированные частицы, покидая область дуги, попадают в газообразную сферу тигля, и часть энергии дуги передается газам. Она расходуется либо на эндотермические процессы, протекающие в газах, либо на их нагрев. Газы, соприкасаясь с внутренней поверхностью тигля, передают тепло шихте. На эту же поверхность приходится излучение дуги.

Таким образом, основная доля энергии дуги передается внутренним стенкам тигля, и тут в более или менее узкой зоне стенок тигля происходят химические реакции разложения шихтовых материалов и образование сплава. Этот слой, образующий внутренние стенки тигля, где протекают основные процессы образования сплава, будем условно называть зоной реакции.

За этой зоной расположен более толстый слой стенок тигля, состоящий из полужидкой спекшейся шихтовой массы.

В этом слое разные шихтовые материалы находятся в различном агрегатном состоянии в зависимости от температуры их плавления. Углеродистые материалы и в этой зоне остаются в твердом состоянии. Железо, температура плавления которого относительно низка, к зоне реакции будет подходить в жидком состоянии, а кремнезем — в полужидком, вязком состоянии и т. д.

По мере удаления от зоны реакции агрегатное изменение шихтовых материалов становится все меньше и, наконец, наружные стенки тигля переходят в слой нормально прогретой шихты.

Образующиеся в тигле газообразные продукты реакции удаляются через стенки тигля. В основном газы уходят через верхнюю часть тигля. Поэтому верхняя часть тигля по форме приближается к параболоиду или эллипсоиду вращения. Если по крупности шихта более или менее равномерна и печь имеет ровный, установившийся режим, газы удаляются со значительной части стенок тигля и поэтому газы на поверхности колошника распределяются довольно равномерно. При нарушении режима работы печи (горячий ход, сужение тигля и т. д.) равномерность толщины стенок тигля уменьшается, давление газов внутри тигля растет и газы выходят в отдельных точках в виде горящих факелов (свищей).

Одним из методов выравнивания выхода газов является шуровка. При шуровке пробиваются вязкие толстые стенки тигля, что дает свободный выход газам. Однако следует отметить, что шуровка является вспомогательным средством для восстановления нарушенного режима работы печи. В нормальных условиях, по мере протекания реакции нормальная толщина тигля должна восстанавливаться автоматически благодаря постепенному сходу шихты, удаление газов должно происходить в соответствии с вполне определенной закономерностью.

На рис. 198, *а* изображена схема строения тигля однофазной печи мощностью 10 000 кВА. Примерная форма тигля — параболоид или эллипсоид вращения. Через вершину в тигель входит электрод. Под последним находится газовый слой 1. Под ним расположен расплав 2. Дуги, по-видимому, горят и в центральной части торца электрода и на его периферии. У боковой поверхности торца электрода начинается область 3 конденсации диссоциированных атомов, а за ней находится зона реакции 4. За зоной реакции располагаются стенки тигля 5, представляющие жидкую и полужидкую спекшуюся шихтовую массу.

Представление о форме тигля трехфазной печи можно получить, исходя из формы тигля однофазной печи. Если электроды трехфазной печи расположены далеко друг от друга и сопротивление шихты достаточно велико, то под каждым электродом образуется свой тигель. В этом случае форма тигля в каждой фазе будет приблизительно такой же, как у однофазной печи, но две соседние фазы все же будут влиять на тепловой режим данной фазы и изменять форму ее тигля. При расположении электродов в ряд наружные стенки тиглей крайних фаз будут иметь такую же форму, как тигли однофазных печей, стенки же между фазами несколько отодвинутся. Тигли крайних фаз имеют несимметричную форму.

Длина тигля средней фазы вдоль оси расположения электродов больше, чем по поперечной оси. На рис. 198, *б* приведено примерное строение тигля рассматриваемой печи мощностью 7500 кВА.

Такое строение тигля наблюдается на трехфазных карбидных печах. В них каждая фаза имеет свой тигель и между фазами до самого пода сохраняется перегородка из более или менее твердой или весьма вязкой шихтовой массы. Летки также устроены под каждой фазой, и межфазные перегородки настолько прочны, что

при выпуске сплава из-под одной фазы они не разрушаются и сплав под соседней фазой остается в печи. Только в редких случаях при расстройстве хода печи сплав, накопившийся под одной фазой, пробивает перегородку и выходит из-под другой фазы. Образование обособленных тиглей в карбидных печах объясняется высоким электрическим сопротивлением карбида и его шихты при температуре ниже $1500\text{--}1600^\circ\text{C}$, а также высоким сопротивлением и вязкостью карбидного расплава при низких температурах. Вследствие этого относительная величина тока по схеме «треугольник» (от электрода к электроду) невелика. Ток протекает главным образом по схеме «звезда», и основная часть энергии выделяется в дуге. Благодаря этому возникает высокая концентрация мощности в самом тигле.

В трехфазной печи, в которой электроды расположены в ряд, тигель может принять иную форму: тигли всех трех фаз могут слиться в общий тигель. В этом случае основанием тигля служит зеркало

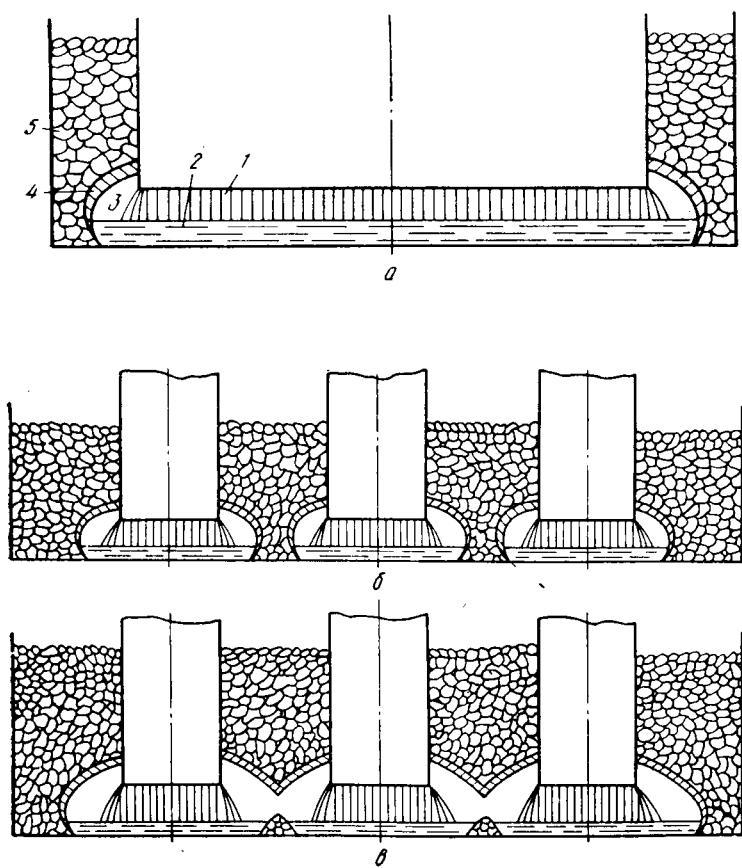


Рис. 198. Строение тигля различных печей

сплава, общее для всех трех фаз. Все три дуги будут опираться на это общее основание, которое и служит нулевой точкой звезды токов дуг. Очертание наружных стенок тигля крайних фаз такое же, как у тигля однофазной печи. Перегородки между фазами отсутствуют. Верхние стенки междугазового перекрытия тигля имеют сводчатое строение со спуском посередине. Так как слой шихты под сводом в трехфазной печи меньше, то температура на поверхности колошника будет выше, чем в однофазной. На рис. 198, в показано схематическое строение тигля для трехфазной печи. По размерам тигель соответствует печи мощностью 7500 кВА. Такое строение тигля характерно для ферросплавных печей. Это объясняется главным образом высокой электропроводностью шихтовых материалов и относительно низкой температурой плавления их компонентов. Благодаря высокой электропроводности шихты значительная доля тока замыкается по схеме «треугольник» — от электрода к электроду. Энергия, выделяющаяся вне тигля, составляет значительную долю всей подводимой к печи энергии. Поэтому шихта подогревается в верхних зонах печи и высокие температурные градиенты наблюдаются на большом расстоянии от оси дуги. Так как температура плавления самих шихтовых материалов в этом случае ниже, то размягчение и проплавление шихты начинается на значительном расстоянии от дуги, тигли под отдельными электродами получают большими и сливаются в один тигель, общий для всех трех фаз. Вследствие большого рассеивания тепла и меньшей его концентрации в тигле печи колошник ферросплавных печей значительно горячее, чем у карбидных.

Для трехфазных симметричных печей, у которых электроды расположены по вершинам равностороннего треугольника, могут существовать тигли обоих рассмотренных выше типов: обособленные тигли под каждым электродом или общий тигель для всех трех фаз. Строение тигля в этом случае зависит от соотношения между диаметром тигля и расстоянием между осями электродов. На рис. 199 приведены три варианта тиглей, согласно данным Келли [42]. Если диаметр тигля D_T равен расстоянию между электродами $d_{м.э}$ (рис. 199, а), то в ванне образуются три соприкасающихся тигля и между ними «мертвая» зона. В этом случае минимальный диаметр самой ванны будет $D_B = 2 \left(R_p + \frac{d_{м.э}}{2} \right) = 2,16d_{м.э}$, где R_p — радиус распада электродов.

В другом крайнем случае тигель одной фазы может распространиться до поверхности соседнего электрода (рис. 199, б), диаметр тигля будет $D_T = 2d_{м.э} - D_э$ и минимальный диаметр ванны получится $D_B = 2,31d_{м.э} - D_э$, где $D_э$ — диаметр электродов.

Три фазовых тигля в этом случае налагаются друг на друга и по оси печи создается область весьма высоких температур.

Оптимальным является третий вариант, когда диаметры трех тиглей пересекаются по оси печи (рис. 199, в). Как указывает Келли, в этом случае в ванне нет ни мертвых, ни слишком горячих зон. Для оптимального варианта $D_T = 1,16d_{м.э}$, а $D_B = 2,3d_{м.э}$.

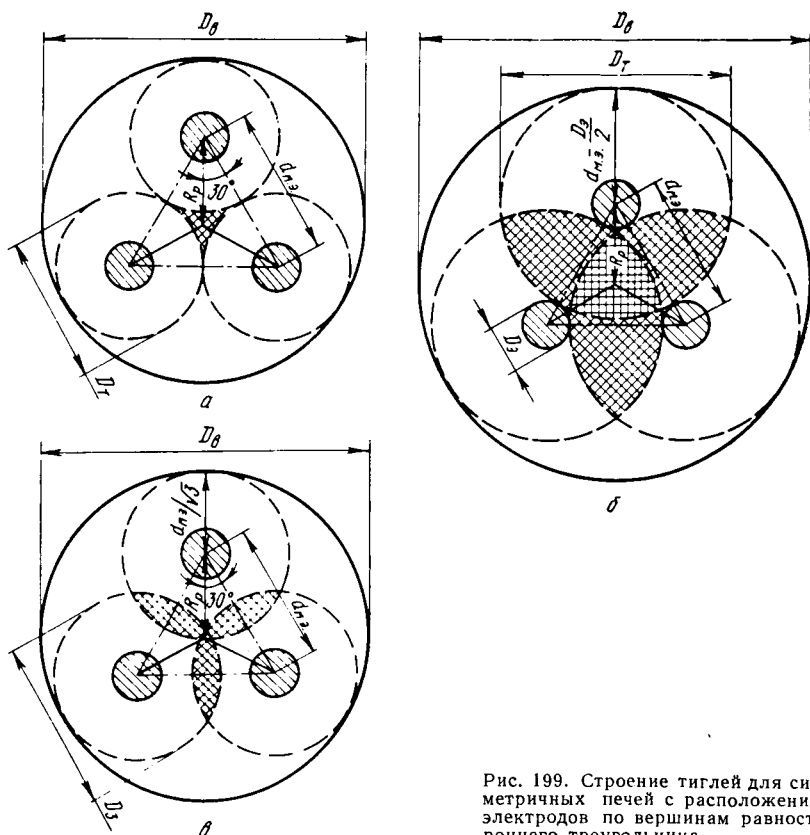


Рис. 199. Строение тиглей для симметричных печей с расположением электродов по вершинам равностороннего треугольника

Для образования отдельных тиглей под каждой фазой требуется, чтобы распад электродов был значительно больше общепринятого, поэтому обычно в симметричных печах образуется один общий для всех трех фаз тигель. С уменьшением распада электродов, т. е. с приближением электродов друг к другу, вследствие нарушения тепловой симметрии тигли начинают деформироваться: они увеличиваются в направлении оси симметрии печи и, наконец, при достаточной близости электродов друг к другу, все три тигля сливаются в один общий. Очертания боковых стенок такого общего тигля можно представить как результат слияния трех эллипсоидов вращения. Отличительной особенностью тиглей симметрических печей является высокий температурный уровень свода тигля между электродами. Это объясняется высокой температурной изоляцией центральной части тигля, окруженного с трех сторон дугами. Вследствие этого свод тигля поднимается значительно выше, чем в несимметричных печах, и колошник между электродами имеет более высокую температуру. Естественно, что и выход газов в центре колошника значительно интенсивнее, чем вне распада электродов.

4. Температура тигля

Распределение температуры тигля подчиняется определенной закономерности. Отправными точками для изучения температурного градиента служат две более или менее определенные точки — температура столба дуги и температура зоны реакций. Температура столба дуги может колебаться в широких пределах 3000—20 000 К. На рис. 36 и 37 были приведены кривые колебания температуры в открытой дуге, горящей в спокойном воздухе.

В руднотермических печах дуга горит в замкнутом объеме тигля: одним из электродов служит жидкий сплав. Поэтому газовая среда дуги будет состоять из ионизированных атомов элементов сплава. Температура столба дуги T_d пропорциональна потенциалу ионизации газов и приближенно определяется уравнением

$$T_d = 2eU_i/29k, \quad (\text{XI-24})$$

где U_i — потенциал ионизации;
 k — постоянная Больцмана, равная $1,371 \cdot 10^{-16}$ эрг/град;
 e — элементарный заряд.

Если измерять энергию в эргах, то формула принимает вид

$$T_d = 800U_i. \quad (\text{XI-25})$$

Отсюда следует, что температура дуги для различных сплавов будет различна. При выплавке карбида кальция основную газовую среду дуги будут составлять пары кальция, потенциал ионизации которого $U_i = 6,1$ В, и температура дуги, следовательно, будет равна $T_d = 800 \cdot 6,1 = 4880$ К.

При выплавке ферросилиция газовую сферу дуги будут составлять пары железа и кремния; потенциал ионизации первого из них $U_i = 7,83$, а второго 7,94 В. Значит, температура дуги при выплавке ферросилиция будет составлять ~ 6300 К.

Температура дуги в направлении от оси к ее периферии падает. По данным некоторых исследователей, температура на поверхности дуги достигает 3000—4000 К.

Температура зон реакции определяется температурой испарения шихтовых материалов.

Если реакция образования сплавов происходит в газовой фазе в непосредственной близости к поверхности твердых или жидких шихтовых материалов, то в зоне реакции должна господствовать температура не выше температуры испарения шихтовых материалов. При выплавке, например, ферросилиция температура зоны реакции должна быть ~ 1800 К, так как при более высокой температуре кремнекислота начинает испаряться.

Если бы по какой-нибудь причине температура превысила 1800 К, то эндотермическая реакция разложения кремнекислоты пошла бы энергичнее, количество проплавляемого материала увеличилось бы и температура снова снизилась до 1800 К. При этом стенка тигля в зоне высокой температуры отодвинулась бы несколько дальше.

Таким образом, в газовой фазе происходит падение температуры от 6000—7000 К (на оси дуги температуры испарения или плавления в зоне реакции) до 1800 К.

Так как в зоне реакции происходит бурное поглощение энергии, то за этой зоной температура должна резко падать. Это явление в той или иной степени смягчается благодаря току проводимости шихты. В однофазной печи этот ток течет от боковой поверхности электрода на под и боковые стенки ванны, а в трехфазной печи при общем тигле ток в основном течет по схеме «треугольник» от электрода к электроду. При обособленных тиглях токи шихты замыкаются и по схеме «треугольник», и по схеме «звезда». Поэтому шихта стенок тигля подогревается не только со стороны зоны реакции благодаря теплопроводности, но и токами проводимости. Величина тока проводимости зависит от проводимости шихтовых материалов. Поэтому для тех сплавов, электропроводность которых высока, энергия, выделяющаяся в шихте, будет больше и, следовательно, толщина спекшегося слоя шихты — стенок тигля также будет больше. Проводимость шихты ферросилиция, например, больше, чем шихты карбида кальция, поэтому ток проводимости для ферросилиция будет больше и стенки тигля при выплавке ферросилиция будут толще, чем при выплавке карбида кальция.

5. Экспериментальные данные о строении и температуре тигля

Выше была рассмотрена одна из наиболее ранних схем строения и образования формы тигля. В настоящее время наши сведения по этим вопросам шире.

На рис. 190 было показано распределение температур в ванне карбидной печи по данным Л. А. Кузнецова. Как видно, под электродом имеется довольно обширная зона, температура которой равна 2100 К. Очевидно, в непосредственной близости к торцу электрода температура должна быть еще выше. В этой зоне материал, по-видимому, находится в газообразном состоянии и, следовательно, она и является зоной дуги. Следующая зона, температура которой 2000 К, еще обширнее. Надо полагать, что именно в этих двух зонах происходит наиболее интенсивное преобразование электрической энергии в тепловую.

В подэлектродном пространстве зона высоких температур распространяется довольно далеко и глубоко проникает в футеровку ванны. В ряде точек температура угольных блоков достигает 1900 К, а в шамотной кладке она составляет 1600—1700 К. В направлениях от торца к боковой поверхности электрода и поверхности колошника температура и ее градиент меняются значительно резче. При других условиях эксплуатации изотермы могут, конечно, располагаться иначе, но во всех случаях будет наблюдаться высокотемпературная зона у торца электрода.

Существенно важную роль в распространении температур и зон материалов с различными агрегатными состояниями играет соот-

ношение между температурой плавления шихтовых материалов и температурой восстановительных процессов.

На рис. 200 приведена схема агрегатных состояний шихтовых материалов для ферромарганцевой печи. Разрез дан по малой оси печи. Под торцом электрода имеется более или менее устойчивая газовая сфера 1. Под ней расположен жидкий расплав 2, окруженный полужидкой магмой 3. Ниже последней располагается не подвергшаяся разложению шихта 4 и свежая шихта 5. На рис. 201 дано примерное распределение температур в ванне. Температуры газовой сферы 1 и жидкого расплава 2 взяты предположительно, для остальных точек температуры измерены термопарами. Следует иметь в виду, что в связи с периодичностью слива распределение температур и агрегатного состояния материалов меняются также периодически.

Заслуживают внимания исследования состояния ванны ферросплавных печей, проведенные Ш. С. Пхакадзе. С разрешения автора ниже приводим полученные им картины агрегатного состояния ванны. На рис. 202 дана схема состояния ванны мощной однофазной печи при выплавке 45%-ного ферросилиция на низком напряжении (57 В, 230 кА).

Как указывает автор, при вскрытии ванны под оказался сильно разьединенным. Поверх сильно металлизированной массы, заполнившей разьединенную подину, находился металл T (45%-ный $FeSi$) толщиной 60—100 мм, на площади радиусом около 1,5 м. Над ним находился слой плавленной шихты III толщиной около 30 мм. В верхней зоне на периферии горна находилась спекшаяся плотная масса шихты К.

На рис. 203, а представлена работа той же печи при напряжении 90 В и тока 130 кА. Этот режим печи характеризуется наличием дуги. По-видимому, она в основном горела у краев торца электрода. Поэтому эти края скошены и, как видно из рисунка, форма электрода приближается к усеченному конусу. Следует также отметить, что электрод сидел низко, его торец находился на высоте 300 мм от уровня подины. На последней образовался значительный настил из желе-

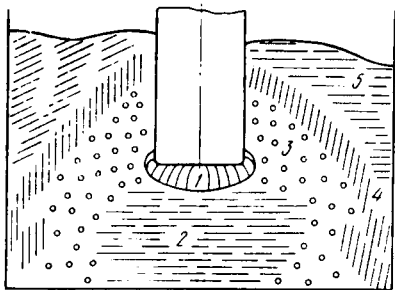


Рис. 200. Агрегатное состояние шихтовых материалов в ферромарганцевой печи

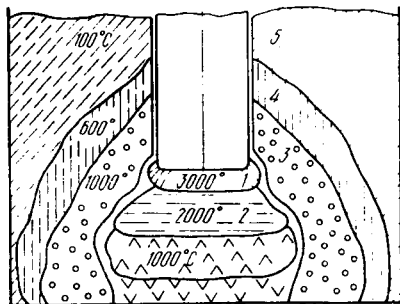
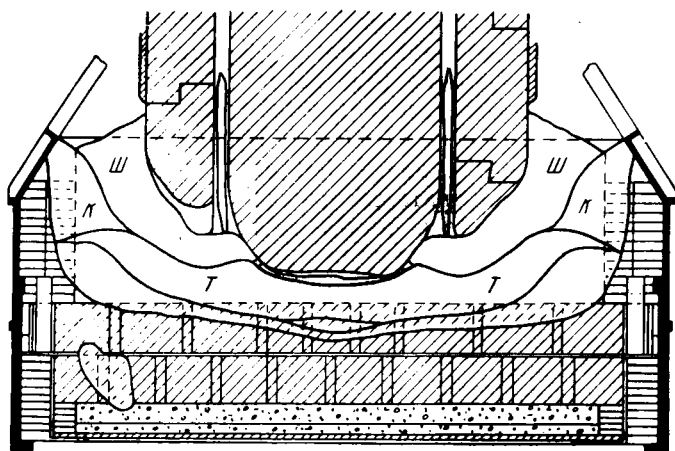
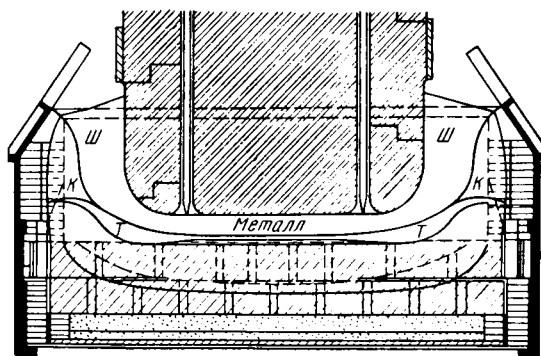
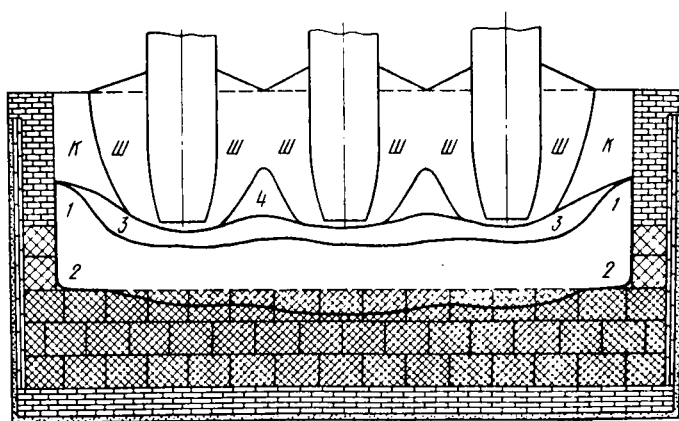


Рис. 201. Распределение материалов и температуры в ферромарганцевой печи перед выпуском 1—5 — то же, что и на рис. 200.

Рис. 202. Состояние ванны одно-
фазной печи при выплавке 45 %-
ного ферросилиция (металл —
«Т»)



а



б

Рис. 203. Состояние ванны трехфазной печи мощностью 7500 кВА при
выплавке 75%-ного ферросилиция

новато-серой плотной массы толщиной около 300 мм, содержащей много вкрапленного металла. Над ним вокруг торца электрода была расположена спекшаяся оплавленная полупористая шихта Т с вкраплениями металла. Еще выше была расположена свежая шихта Ш, а на периферии полуспекшаяся шихта К. Центр разъедания подины и расположение материалов указывают на то, что зона наивысших температур и в этих печах находится под электродом.

На рис. 203, б приведена схема состояния горна трехфазной печи 7500 кВА при выплавке 75%-го ферросилиция. Строение тигля и расположение материалов аналогичны предыдущим случаям. Подина печи и тут разъедана. На ее периферии расположена светло-зеленая плотная масса 1, которая сверху вниз переходит в серовато-зеленую плотную массу 2. Под электродами масса 3 принимает серый цвет с зеленым оттенком с блестящими зернами и имеет слегка металлизированный вид; между электродами она становится зеленоватой 4.

Толщина слоя этой плотной массы 3, 4 составляет 800—1000 мм, включая разъеденную подину (400 мм).

Над ней расположена расплавленная шихта толщиной 200—300 мм, в которой вкраплены шлак и металл. В межэлектродных участках в верхней части находится слабопористая, а в нижней части плотная масса зеленовато-серого цвета. Массы на этих участках представляют плотную смесь шихты со шлаком и коксиком.

В верхних зонах периферии ванны находится гарниссаж К в виде плотной, спекшейся шихты и, наконец, вокруг электродов до поверхности колошника расположена пористая шихта Ш, свежая на поверхности, полуспекшаяся в верхней зоне и спекшаяся в нижней.

Надо иметь в виду, что рассмотренные схемы расположения материалов относятся к уже остывшей печи, т. е. к периоду, когда полужидкие и жидкие компоненты массы успевают стечь вниз. По-видимому, в период работы печи жидкие и полужидкие массы, образующиеся в зоне реакции, будут расположены выше. Приведенные выше экспериментально полученные схемы расположения материалов в ванне показывают, что рассмотренные теоретические схемы правильно отображают строение тиглей печей.

Наконец, на рис. 204 приведены схемы расположения материалов в печи по А. С. Микулинскому [22].

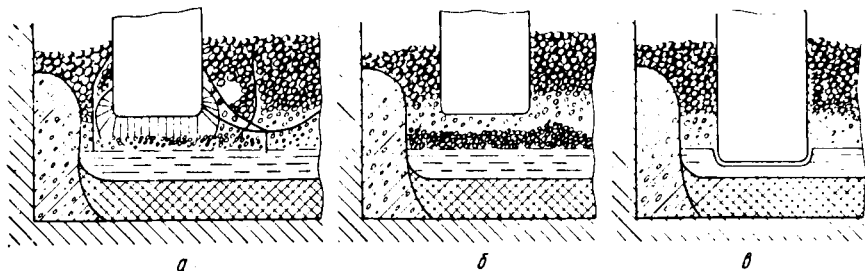
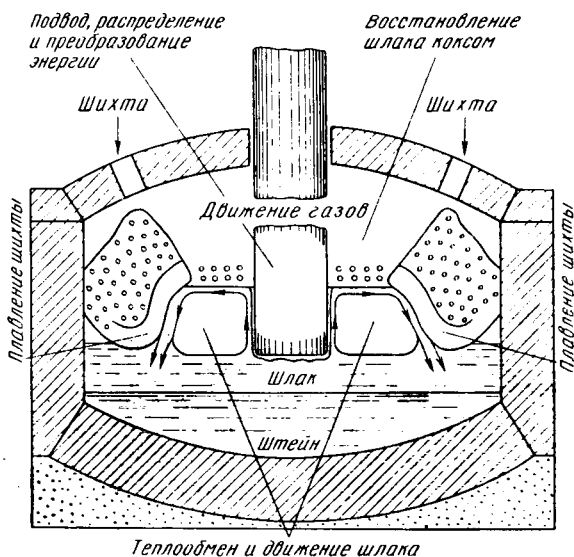


Рис. 204. Схемы расположения материалов в печи по данным А. С. Микулинского: а — у торца электрода дуговой разряд; б — у торца электрода образовался коксовый стол, дугового разряда нет; в — электрод погружен в расплав

Рис. 205. Схема работы закрытой руднотермической восстановительной печи по данным Д. А. Диомидовского



В первом варианте (рис. 204, а) у торца электрода происходит дуговой разряд, во втором — (рис. 204, б) у торца электрода образовался коксовый слой при отсутствии дугового разряда и, наконец, на третьей схеме (рис. 204, в) показан случай, когда торец электрода непосредственно погружен в расплав.

Заслуживает внимания также схема работы закрытой рудовосстановительной печи (рис. 205), данная Д. А. Диомидовским [4]. В ней не выделены зоны дуг и не приведено распределение температур, но дана общая схема расположения материалов при большом количестве шлаков.

В заключение еще раз подчеркнем, что в зависимости от общих физико-химических условий печь может работать либо в дуговом, либо в бездуговом режиме.

Исключительным достоинством дугового режима является то, что с помощью дуги можно получить высокую концентрацию энергии при весьма высоких температурах.

В одних случаях такая температура необходима и неизбежна и при этих процессах печь необходимо эксплуатировать в дуговом режиме. В других случаях высокие температуры и высокие концентрации энергии являются излишними и даже вредными, и в этих случаях, конечно, следует избегать возникновения дуги или уменьшать долю энергии, преобразующейся в дуге. В гл. I были показаны примерные пределы оптимального соотношения между величинами p и q для различных процессов.

6. Неуставившийся тепловой режим ванны печей

Ванна руднотермической печи характеризуется очень большой тепловой инерцией. Поэтому для перевода печи из одного теплового состояния в другое требуется значительный промежуток времени.

Особенно долго продолжается нагрев печи после длительного простоя и полного ее остывания. Чтобы холодная печь вошла в нормальный тепловой и производственный режим, требуется несколько суток.

Однако не у всех зон печной ванны одинаковая тепловая постоянная.

При возникновении или прекращении дуги температура ее створа резко меняется в течение долей секунды. Медленнее изменяется температура газового слоя, окружающего дугу. Но и в этом слое процесс перехода от одного теплового состояния к другому заканчивается в течение долей секунды или нескольких секунд. Значительно большей инерцией обладают внутренние стенки тигля, состоящие из жидкой и полужидкой магмы. При наличии дуги они обогреваются ее лучистой энергией. В слое стенок тигля выделяется и основная часть тепла, обусловливаемого током шихтовой проводимости.

Часть тепла, получаемого стенками тигля, расходуется в слое стенок на эндотермические химические реакции, остальное же тепло передается в глубь магмы теплопроводностью.

Темпы установления температурного режима стенок тигля при включении и выключении печей различны. При включении печи температура стенок тигля низкая и химические реакции отсутствуют. Поэтому все тепло, поступающее в слой стенок тигля, расходуется на повышение температуры стенок и на нагрев путем теплопроводности остальных слоев шихты, лежащих за стенками. Вследствие низкой температуры стенок тигля охлаждение газового слоя и разрядного промежутка протекает весьма интенсивно и дуга горит неустойчиво. Постепенно с повышением температуры стенок возникают эндотермические химические реакции и часть тепла расходуется на образование сплавов. По мере приближения к установившемуся режиму доля энергии, потребляемой на разогрев печи, падает до нуля, а доля энергии, приходящаяся на тепловые потери ванны и расходуемая на химические реакции, приближается к постоянной величине.

При отключении печи картина протекает несколько иначе. С прекращением тока и дугового разряда прекращается и подвод энергии. Температура столба дуги и всего газового слоя, как мы говорили, падает очень быстро. Но все же в течение некоторого промежутка времени она остается выше температуры стенок тигля и направление потока энергии от газового слоя к стенкам тигля остается неизменным.

Таким образом, скорость снижения температуры стенок тигля значительно отстает от снижения температуры в столбе дуги и газовом слое в целом.

Со снижением температуры стенок тигля замедляются и химические реакции, а некоторые из них начинают протекать в обратном направлении. Благодаря этому еще больше снижается и скорость падения температуры стенок тигля.

По истечении некоторого времени температура газового слоя и стенок тигля выравнивается и теплообмен между ними прекращается.

Затем начинается обратный процесс. Температура газов, уходящих из тигля, становится ниже температуры стенок тигля, и тепловой поток меняет направление. При этом не газы подогревают стенки тигля, а, наоборот, последние обогревают газы.

В этом теплообмене весьма деятельное участие принимает торец электрода. При включении холодной печи электрод сам начинает нагреваться и аккумулировать тепло, что способствует еще более интенсивному охлаждению газовой сферы и неустойчивости горения дуги. При отключении печи, наоборот, энергия, аккумулированная в массе электрода, передается окружающей его газовой сфере. Благодаря этому в газах и на стенках тигля долго поддерживается достаточно высокая температура и охлаждение их, как указывали выше, идет медленно.

За стенками тигля расположена масса полуспекшейся и частично прореагировавшей шихты. По мере приближения к периферии ванны (к внутренним стенкам и колошнику) физико-химическое состояние массы меняется и ее свойства постепенно приближаются к свойствам свежей шихты.

Удельная электропроводность этой массы незначительна и ток шихтовой проводимости невелик. Поэтому тепловые процессы в массе протекают почти исключительно вследствие теплопроводности.

Очевидно, по этому же принципу совершается теплообмен и в толще стенок ванны.

Наружная поверхность ванны, включая колошник, находится в лучистом и конвективном теплообмене с окружающей средой.

При включении печи направление теплового потока в шихтовой массе устанавливается от стенок тигля к стенкам ванны, а в последних — от внутренней поверхности к кожуху печи, и оно сохраняется в течение всего времени разогрева и эксплуатации печи.

Во время разогрева часть энергии аккумулируется в шихтовой массе и футеровке ванны, остальная часть представляет собой тепловые потери ванны.

После того, как прекратится разогрев ванны и закончится аккумулярование энергии, печь входит в нормальный режим и через шихтовую массу и футеровку проходит только энергия потерь на излучение и конвекцию. В электроде, шихте и футеровке печи аккумулируется значительное количество энергии, поэтому для нагревания печи и вхождения ее в нормальный режим требуется длительное время. Процесс этот затягивается еще вследствие того, что начиная от некоторого значения температуры, в печи возникают эндотермические химические процессы. Разогрев печи нельзя форсировать подводом большой мощности во избежание нарушения технологического процесса.

После отключения печи тепловые процессы в шихтовой массе и футеровке протекают иначе. Хотя с исчезновением дуги температура газовой сферы быстро падает, все же в течение некоторого промежутка времени она превышает температуру стенок тигля. Поэтому поток энергии и у отключенной печи в начальный момент направлен

к стенкам тигля. В дальнейшем температура газов и стенок тигля выравнивается и теплообмен между ними прекращается.

Так как выход газов из тигля через зазор между шихтой и электродом продолжается, от температуры газов продолжает снижаться и становится ниже температуры стенок тигля. С этого момента тепловой поток меняет направление и стенки тигля отдают тепло газам, в результате чего постепенно снижается температура стенок тигля и близлежащей магмы. В это же время происходит теплоотдача от наружной поверхности ванны.

Таким образом, внутри шихтовой массы между стенками тигля и кожухом ванны будет существовать некоторый слой с наивысшей температурой и теплоотдача от этого слоя будет происходить в обе стороны — и в сторону самого тигля, и в сторону кожуха ванны. Слой этот постепенно будет перемещаться от внутренних стенок тигля в сторону кожуха ванны. По мере его перемещения снижается и уровень его температуры, и процесс этот будет протекать до тех пор, пока не выровняются температуры всех участков ванны.

Так как в ванне печи аккумулируется большое количество тепла и шихтовая магма обладает небольшой теплопроводностью, то процесс охлаждения ванны и выравнивания температуры протекает очень медленно.

7. Классификация тиглей руднотермических печей

Тигли ванн руднотермических печей можно разделить примерно на три типа.

1. Тигли, образующиеся при бесшлаковых процессах с высоким удельным расходом электроэнергии и малой скоростью схода шихты. К таким процессам относится выплавка 75 %-ного и 45 %-ного ферросилиция.

Тигли этого типа характеризуются достаточно высокой механической прочностью и устойчивостью. Они достаточно четко ограничены и изолированы в тепловом отношении. При изменении тепловых условий деформация их происходит медленно. Зона реакции в тиглях этого типа имеет небольшую толщину. В таких тиглях имеются условия для интенсивной ионизации и диссоциации газовой сферы. Поэтому дуга в таких тиглях должна гореть устойчиво и форма кривых силы тока и напряжения дуги должна быть весьма близка к синусоиде.

При длительном горячем простое печи форма тиглей сохраняется почти без изменения.

2. Тигли в бесшлаковых сплавах, когда процессы протекают с малым удельным расходом электроэнергии и большой скоростью схода шихты. К таким сплавам относится карбид кальция. Тигли этого типа менее устойчивы в механическом отношении. Зона реакции в этих тиглях меньше. В тепловом отношении они хорошо изолированы; поэтому дуга в них должна гореть устойчиво и синусоидальная форма кривых силы тока и напряжения редко нарушается.

При длительных горячих простоях тигли этого типа подвержены определенным деформациям, но все же в основном сохраняют свою форму.

3. Тигли сплавов со значительным количеством шлаков, при протекании процессов с малым удельным расходом электроэнергии и большой скоростью схода шихты. К таким сплавам относятся силикомарганец и ферромарганец. Тигли этого типа механически мало устойчивы и подвержены частым деформациям. Температура на внутренних стенках таких тиглей ниже, объем самих тиглей относительно больше. Зона реакции имеет значительную толщину. Тепловые условия горения дуги в таких тиглях гораздо хуже, чем в тиглях двух первых типов. Поэтому дуга в них чаще подвергается обрыву и кривые силы тока и напряжения дуги в большей или меньшей степени отклоняются от синусоидальной формы.

Как было указано в гл. I, попытки строгой и единообразной классификации печей терпят неудачу из-за того, что один и тот же сплав может быть получен при различных режимах работы печи. Это положение сохраняет силу и при классификации тиглей. В зависимости от теплового состояния печи строение и форма тиглей данного сплава могут меняться в весьма широких пределах; тигли приведенных выше типов характерны для нормальных режимов работы печей.

На с. 274—276 приведено несколько схем строения ванны печи; одни из них носят чисто умозрительный характер, другие построены по данным исследования ванн печей после их отключения. Ни те, ни другие не могут дать полного представления о строении тигля ванны в его динамическом состоянии. Поэтому исследование ванны в процессе ее работы является весьма важной проблемой.

Глава XII

Шунтирование электрической дуги в печи

1. Принципы шунтирования дуги

Электропроводность шихты, окружающей электроды руднотермической печи, в подавляющем большинстве случаев имеет конечную величину. Поэтому через шихту всегда протекает ток шихтовой проводимости. Величина этого тока зависит от величины электропроводности.

Объемная плотность мощности, выделяющейся в шихте, зависит от удельного сопротивления шихты и плотности тока

$$p = \delta^2 \rho, \quad (XII-1)$$

где δ — плотность тока;

ρ — удельное сопротивление.

Если электрическое сопротивление шихтовых материалов очень мало, то невозможно получить высокие объемные мощности в шихте, и печь приходится переводить на дуговой режим. В этом случае

шихта газовыми потоками изолируется от электрода и ее случайное соприкосновение с ним приводит к короткому замыканию печи. Такими печами являются сталеплавильные печи и печи рафинирования металлов.

Но и при весьма высоких удельных сопротивлениях шихты нельзя достичь высоких объемных плотностей мощности, потому что такая шихта не позволяет получить высокие плотности токов. Поэтому при весьма высоких и весьма низких электропроводностях шихты печь работает в дуговом режиме и только при средних значениях электропроводности шихты возможна эффективная работа печи в режиме сопротивления. Но и при работе печи в режиме сопротивления возможно возникновение дуги. В этом случае печь будет работать в смешанном режиме. Часть тока будет проходить через дугу, а часть — через шихту. На рис. 206 приведена схема замещения печи, работающей в смешанном режиме.

Однако, если удельное сопротивление расплава достаточно велико, то при расчетах нужно учитывать падение напряжения, обусловленное прохождением тока через расплав. Поэтому для однофазной печи в схему замещения цепи последовательно с дугой надо ввести эквивалентное сопротивление расплава.

Для трехфазных печей схема замещения еще сложнее, так как приходится учитывать токи шихтовой проводимости, замыкающиеся как по схеме «звезда», так и по схеме «треугольник». Эти схемы замещения будут рассмотрены ниже.

В заключение отметим, что большинство ферросплавных печей работает по смешанному принципу.

В настоящее время уже не подвергается сомнению смешанный характер работы карбидных печей: часть энергии в них выделяется в дуге, а часть — в шихте и расплаве. При этом расплав расположен последовательно с дугой, а шихта — параллельно дуге и расплаву. По некоторым данным, для мощных карбидных печей отношение мощности, выделяющейся в расплаве и шихте, к мощности дуги колеблется около двух. Для маломощных печей это отношение, по приведенным выше данным А. С. Микулинского, несколько меньше.

Иначе обстоит дело в мощных ферросплавных печах. В частности, на печах мощностью 16,5 МВА, по нашим данным и измерениям И. Т. Жердева, в шихтовых материалах шунтирующие токи обнаруживаются на глубине порядка 800—900 мм от поверхности колошника. На печах такого же типа при наличии свода (закрытые печи) шунтирующие токи обнаруживаются уже на глубине 200—300 мм.

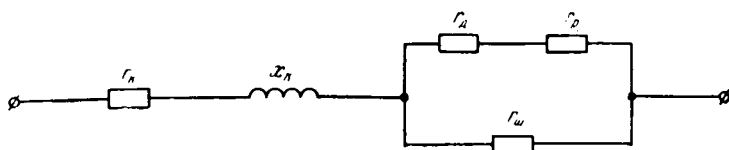


Рис. 206. Схема замещения шунтированной дуги

При этом плотности токов меняются в довольно широких пределах: от десятых долей до 4—5 А/см².

Такие резкие изменения плотности тока объясняются значительным различием температурных полей открытых и закрытых печей. В открытых печах ответвление шунтирующих токов происходит в более глубоких зонах, по сравнению с закрытыми. Дуга же в открытой печи имеет большую мощность.

2. Влияние шунтирования на форму кривых тока и напряжения дуги

Все приведенные выше кривые токов изображают суммарный ток ванны печи, который складывается из двух составляющих: тока, протекающего через дугу, и тока, протекающего через шихту. Поэтому при анализе осциллограмм надо всегда иметь в виду, что кривая представляет не только ток дуги.

Определение составляющих общего тока ванны печи или выделения тока дуги представляет большие трудности и в подавляющем большинстве случаев необходимые данные для решения этой задачи отсутствуют. Но все же в литературе встречаются попытки определения составляющих тока ванны.

Обычно задаются определенной формой кривой напряжения дуги и, исходя из параметров контура, определяют форму кривой тока. Так, задаваясь постоянством напряжения дуги в период ее горения, определяют составляющие тока дуги С. И. Тельный и И. Т. Жердев и В. П. Никитин.

Действительно, обозначим через r_k и L_k активное сопротивление и индуктивность короткой сети печи, а через $r_{ш}$ и r_d — сопротивления шихты и дуги (см. рис. 163). Если кривая подведенного к печи напряжения синусоидальна, а напряжение дуги в период ее горения постоянно, то для шунтированной дуги можно записать три следующих уравнения:

$$U_m \sin \omega \tau = i r_k + \omega L_k \frac{di}{d\omega \tau} + i_{ш} r_{ш}; \quad (\text{XII-2})$$

$$U_m \sin \omega \tau = i r_k + \omega L_k \frac{di}{d\omega \tau} + i_d r_d; \quad (\text{XII-3})$$

$$i = i_{ш} + i_d. \quad (\text{XII-4})$$

Решив эти уравнения относительно i , i_d и $i_{ш}$, можно построить кривые как токов дуги и шихты, так и суммарного тока.

На рис. 207 приведены составляющие тока и суммарный ток печи по данным С. И. Тельного и И. Т. Жердева. Как видно, кривая тока дуги несколько искажена, но близка к синусоиде. Кривая суммарного тока также искажена и имеет небольшой перегиб у переднего края.

На рис. 79 была приведена осциллограмма шунтированной дуги, снятая И. Т. Жердевым, который на основе развитой выше теории шунтированной дуги выделяет составляющие полного тока. Однако не всегда можно добиться такого разделения токов для осциллограмм,

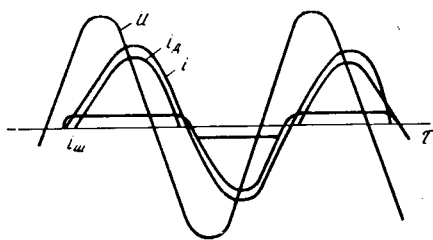


Рис. 207. Ток шунтированной дуги:
 u — приложенное напряжение; $i_{ш}$ — ток шунта; i_d — ток дуги; i — суммарный ток

так как кривые напряжения дуги иногда имеют почти синусоидальный характер и на них никак нельзя уловить предполагаемые моменты возникновения и прекращения дуги. Кроме того, характер кривой тока зависит не только от этих параметров, но и от физических свойств дугового промежутка. Существенно важны здесь не только условия возникновения дуги, но и условия ее

горения. А так как все эти условия могут резко меняться в зависимости от теплового режима, то кривые силы тока и напряжения дуги получатся очень разнообразными по характеру.

Остановимся еще раз на процессе возникновения и прекращения дуги. В дуговом промежутке образуются электроны и ионы, необходимые для существования тока в цепи. В разрядном промежутке число свободных заряженных частиц зависит от ряда факторов: напряженности поля, температуры и плотности газов, степени охлаждения последних и т. д. Баланс заряженных частиц в каждый данный момент в конечном счете определяется их ионизацией, рекомбинацией и диффузией.

В момент прохождения кривой напряжения разрядного промежутка через нуль ионизация соударением резко уменьшается, в то время как убывание числа заряженных частиц вследствие рекомбинации и диффузии продолжается. Если при обратном нарастании напряжения в газовой сфере имеется достаточное число заряженных частиц, то ток в разрядном промежутке восстанавливается немедленно. Если же в газовой сфере в период прохождения кривой напряжения через нуль деионизация и диффузия протекают с большой интенсивностью, то число заряженных частиц в разрядном промежутке уменьшается настолько, что дуга обрывается и для повторного зажигания требуется нарастание напряжения до величины, достаточной для ионизации среды, соответствующей разрядному режиму («возникновению»).

Дуга может гореть устойчиво, с более или менее длительными паузами тока, но устойчивое горение может протекать и без пауз тока (непрерывное горение дуги).

Для каждого из этих случаев требуются определенные условия не только во внешней части дугового контура, но и в разрядном промежутке. Если электрические и тепловые условия таковы, что в разрядном промежутке создается благоприятный баланс заряженных частиц, то дуга после прохождения тока через нуль возникает немедленно и, следовательно, горение дуги протекает непрерывно.

После возникновения разряда форма кривой тока также определяется не только константами внешней части цепи. Если э. д. с. источника значительно превышает напряжение дуги и основная часть этой э. д. с. уравнивается падением напряжения во внеш-

ней части цепи, то форма кривой силы тока определяется главным образом параметрами внешней части дугового контура, но если напряжение дуги соизмеримо с э. д. с. источника, форма кривой силы тока определяется параметрами разрядного промежутка. Для иллюстрации на рис. 208 приведена осциллограмма прекращения дуги, шунтированной активным сопротивлением.

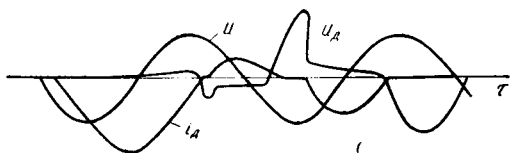


Рис. 208. Гашение шунтированной дуги по данным Смурова

Мы видим, как по мере увеличения напряжения возникновения дуги, искажение кривой силы тока увеличивается.

В руднотермической печи падение напряжения от зажимов трансформатора до электродов, правда, в основном является реактивным, но составляет всего 10—15% подводимого напряжения. Следовательно, форма кривой силы тока главным образом определяется явлениями, протекающими в самом разрядном промежутке. Весьма важно то, что падение напряжения в короткой сети сдвинуто по отношению к току почти на 90° и составляет в момент прохождения тока через нуль около 15—20 В, т. е. примерно равно падению напряжения в катодной и анодной областях дуги.

Следовательно, если в столбе дуги в момент прохождения тока через нуль обеспечена достаточно высокая ионизация, то дуга будет гореть стабильно без пауз тока.

В рассматриваемой группе осциллограмм, как видим, в момент прохождения тока через нуль обеспечено напряжение, равное падению потенциала в катодной и анодной областях. Кривая силы тока проходит через нулевые значения без пауз. Но на осциллограммах зафиксирован суммарный ток (дуги и шихты), поэтому по кривой нельзя еще судить, горела дуга без пауз тока или нет. Суждение об этом можно получить, исходя из кривой напряжения.

Кривая напряжения плавно нарастает от нуля по синусоидальному закону и искажена всего около одной шестой части полупериода, а потом кривая плавно стремится к нулю опять по синусоиде. Если считать, что дуга горит только в течение той части периода, когда кривая напряжения дуги близка к прямолинейной характеристике, то можно получить кривую тока с весьма длительными паузами, вследствие чего она значительно искажается. Она должна будет иметь явно заметные перегибы в точках, соответствующих токам начала и конца прямолинейной части кривой напряжения, а между тем таких перегибов не наблюдается ни на одной из всей группы осциллограмм. Правда, осциллограммы (см. рис. 169, д, е) имеют небольшие перегибы в конце периода, но если учесть ход изменения кривой напряжения, то эти точки никак нельзя характеризовать как точки возникновения или исчезновения дуги.

Отсюда можно сделать вывод, что если в этих осциллограммах даже есть паузы тока, то они имеют весьма небольшую длительность и существенно не влияют на ход кривой тока.

3. Шунтирование трехфазной дуги

Шунтирующие сопротивления еще больше осложняют картину распределения токов и мощностей в трехфазных печах. Выше была приведена эквивалентная схема трехфазной печи (см. рис. 164). Из нее видно, что токи в печи могут разветвляться и по схеме «звезда», и по схеме «треугольник». В уточненной схеме, кроме сопротивлений, шунтирующих дуги, необходимо учесть и сопротивления, включенные последовательно, с дугами. Особенно важное значение они имеют для расплавов с высоким удельным электрическим сопротивлением. Но с уточнением схемы замещения печного контура усложняется математическое решение задачи.

В исследовании шунтированной электрической дуги трехфазной печи И. Т. Жердев [10] принимает схему замещения печи, приведенную на рис. 209.

В общем случае трехфазной системы параметры различных фаз обычно отличаются друг от друга, а дуги, горящие между подом и фазами, имеют различную форму. Эти обстоятельства сильно осложняют математическое исследование шунтирования трехфазной дуги. Поэтому примем для схемы следующие ограничения. Будем считать, что параметры всех фаз печи равны между собою, а напряжения горения дуги всех трех фаз примем постоянными (прямоугольная форма кривой напряжения дуги).

При этих условиях для эквивалентной схемы печи можно записать следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} U_m \sin \omega \tau &= i_1 r_k + x_k \frac{di_1}{d\omega \tau} + i_{d_1} r_p + u_{d_1} + u_0; \\ U_m \sin \omega \tau &= i_1 r_k + x_k \frac{di_1}{d\omega \tau} + i_{ш_1} r_{ш} + u_0; \\ U_m \sin (\omega \tau - 120^\circ) &= i_2 r_k + x_k \frac{di_2}{d\omega \tau} + i_{d_2} r_p + u_{d_2} + u_0; \\ U_m \sin (\omega \tau - 120^\circ) &= i_2 r_k + x_k \frac{di_2}{d\omega \tau} + i_{ш_2} r_{ш} + u_0; \\ U_m \sin (\omega \tau - 240^\circ) &= i_3 r_k + x_k \frac{di_3}{d\omega \tau} + i_{d_3} r_p + u_{d_3} + u_0; \\ U_m \sin (\omega \tau - 240^\circ) &= i_3 r_k + x_k \frac{di_3}{d\omega \tau} + i_{ш_3} r_{ш} + u_0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII-5})$$

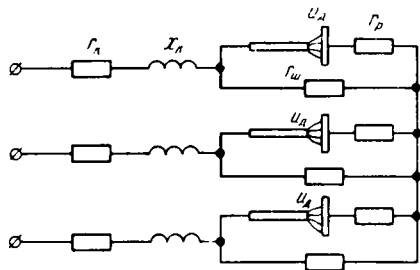


Рис. 209. Схема трехфазной шунтированной дуги:

r_k — эквивалентное активное сопротивление одной фазы подводящей сети; x_k — индуктивное сопротивление фазы; r_d — сопротивление дуги; $r_{ш}$ — сопротивление шунта; r_p — сопротивление расплава, включенное последовательно с дугой

Так как токи в фазах связаны соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_{d_1} + i_{ш_1}; \\ i_2 &= i_{d_2} + i_{ш_2}; \\ i_3 &= i_{d_3} + i_{ш_3}; \\ i_1 + i_2 + i_3 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII-6})$$

то после исключения токов в разветвлениях всю систему уравнений можно свести к трем уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} U_m \sin \omega \tau &= i_1 r' + x_k \frac{di_1}{d\omega \tau} + u_{d_1} r'' + u_0; \\ U_m \sin (\omega \tau - 120^\circ \text{ C}) &= i_2 r' + x_k \frac{di_2}{d\omega \tau} - u_{d_2} r'' + u_0; \\ U_m \sin (\omega \tau - 240^\circ \text{ C}) &= i_3 r' + x_k \frac{di_3}{d\omega \tau} + u_{d_3} r'' + u_0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII-7})$$

где

$$r' = r_k + \frac{r_{ш'p}}{r_{ш} + r_p}; \quad r'' = \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_p}. \quad (\text{XII-8})$$

Сопротивления, включенные параллельно и последовательно дуге, заменены эквивалентными последовательными сопротивлениями r' и r'' ; соответствующим образом изменились и напряжения дуг.

Из системы уравнений (XII-5) получим

$$u_0 = -\frac{r''}{3} (u_{d_1} - u_{d_2} + u_{d_3}). \quad (\text{XII-9})$$

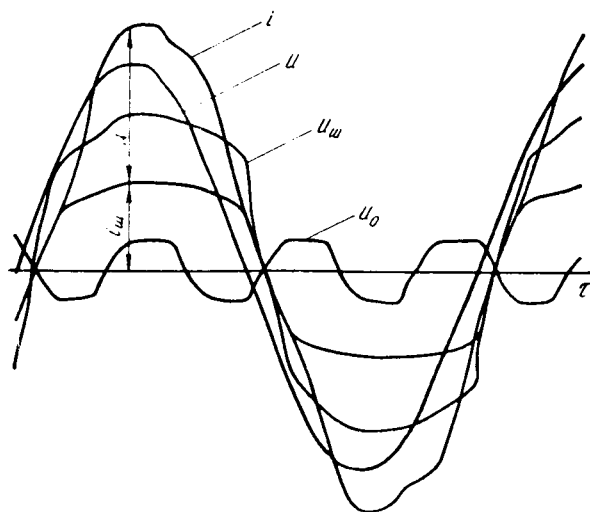
Подставляя эти значения в уравнения (XII-7), получаем полную систему уравнений в виде

$$\left. \begin{aligned} U_m \sin \omega \tau &= i_1 r' + x_k \frac{di_1}{d\omega \tau} + u'_{d_1}; \\ U_m \sin (\omega \tau - 120^\circ \text{ C}) &= i_2 r' + x_k \frac{di_2}{d\omega \tau} + u'_{d_2}; \\ U_m \sin (\omega \tau - 240^\circ \text{ C}) &= i_3 r' + x_k \frac{di_3}{d\omega \tau} + u'_{d_3}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII-10})$$

где

$$\left. \begin{aligned} u'_{d_1} &= \frac{r''}{3} (2u_{d_1} + u_{d_2} - u_{d_3}); \\ u'_{d_2} &= \frac{r''}{3} (u_{d_1} - 2u_{d_2} + u_{d_3}); \\ u'_{d_3} &= -\frac{r''}{3} (-u_{d_1} + u_{d_2} + 2u_{d_3}). \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII-11})$$

Рис. 210. Расчетные кривые трехфазной шунтированной дуги по данным И. Т. Жердева



Эти уравнения решаются методом подстановки и дают следующие значения токов печи:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{U_m}{z} \left[C_1 e^{-\omega' \tau} + \sin(\omega \tau - \alpha) - \frac{u'_{A1}}{U_m \cos \alpha} \right]; \\ i_2 &= \frac{U_m}{z} \left[C_2 e^{-\omega' \tau} + \sin(\omega \tau - 120^\circ C - \alpha) - \frac{u'_{A2}}{U_m \cos \alpha} \right]; \\ i_3 &= \frac{U_m}{z} \left[C_3 e^{-\omega' \tau} + \sin(\omega \tau - 240^\circ C - \alpha) - \frac{u'_{A3}}{U_m \cos \alpha} \right], \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII-12})$$

где $z = \sqrt{r'^2 + x^2}$; $\text{ctg} \alpha = r'/x$; $\omega' = \omega \text{ctg} \alpha$;

C_1, C_2, C_3 — постоянные интегрирования.

Зная полные фазные токи, можно вычислить и их составляющие:

$$\left. \begin{aligned} i_{w1} &= r'' \left(i_1 + \frac{u_{A1}}{r_p} \right); \\ i_{w2} &= r'' \left(i_2 + \frac{u_{A2}}{r_p} \right); \\ i_{w3} &= r'' \left(i_3 + \frac{u_{A3}}{r_p} \right). \end{aligned} \right\} \quad (\text{XII-13})$$

Токи дуг определяют по уравнениям (XII-6).

На рис. 210 приведены кривые, полученные в результате одного из многочисленных примерных расчетов, выполненных И. Т. Жердевым по вышеуказанному методу.

Однако принятые ограничения (постоянство параметров и прямоугольная форма кривой напряжения) в значительной степени сни-

жают возможности практического применения математического анализа рассматриваемой задачи.

Общий же вывод, к которому приводит этот анализ, заключается в том, что с уменьшением сопротивления шунта устойчивость горения дуги резко снижается.

Глава XIII

Анализ результатов экспериментального исследования мощной электрической дуги

1. Общие соображения

Главной целью испытаний было показать, что печная дуга не во всех случаях горит одинаково и отступление формы кривых силы тока и напряжения дуги от синусоиды не обязательно. При определенных благоприятных условиях кривые тока и напряжения могут быть и синусоидальными. Основным фактором, влияющим на форму кривых силы тока и напряжения, является тепловой режим тигля ванны печи, обусловливаемый видом сплава и технологией производства. В качестве примеров мы рассмотрели ряд сплавов, довольно резко отличающихся друг от друга по строению тиглей.

2. Анализ работы печи при выплавке ферросилиция

В соответствии с данной выше классификацией при выплавке 45%-ного ферросилиция в ванне печи образуются тигли первого типа. Эти тигли характеризуются высокой механической прочностью. При нормальном режиме работы печи газовая сфера такого тигля сильно ионизирована и дуга горит без перерывов. Ионизация среды настолько велика, что при горении дуги форма кривых напряжения и силы тока следует синусоидальному закону.

Обычно руднотермические печи работают непрерывно в течение месяцев. Нормально простой печи не должны превышать 2—3% рабочего времени. При такой работе в ванне печи устанавливается весьма устойчивый тепловой режим с определенным, мало подверженным изменениям тепловым градиентом в направлении от оси дуги к кожуху печи. При наших испытаниях печь, как мы видели, находилась в худших условиях. В течение длительного периода она подвергалась систематическим отключениям по несколько часов в сутки.

Во время таких отключений температурный режим ванны печи все время колеблется, и в тигле печи нарушаются условия нормального горения дуги.

Первый цикл испытаний был начат после шестичасовой бесперебойной работы печи при полной нагрузке. Можно было бы ожидать, что за такой промежуток времени в печи установится нормальный тепловой режим и дуга будет гореть не только без обрывов, но

и с такой степенью ионизации среды, что форма кривых тока и напряжения дуги будет приближаться к синусоидальной.

Однако испытания показали, что для установления чисто синусоидальной формы кривой тока дуги шестичасовой непрерывной работы печи недостаточно. Кривые силы тока в осциллограммах, показанных на рис. 138, б, в, г, продолжают оставаться (правда, в небольшой степени) искаженными. Однако сравнение этих кривых показывает, что с течением времени кривая тока начинает сглаживаться. Действительно осциллограмма, показанная на рис. 138, в, снятая через 3 ч после осциллограммы рис. 138, б, менее искажена и ближе к синусоиде, чем предыдущая кривая. Еще более показательна осциллограмма, приведенная на рис. 138, г. Несмотря на то, что ток фазы перед записью был снижен с 35 до 25 кА, искажение этой кривой меньше, чем кривой на рис. 138, б. Следовательно, длительность ровного режима работы печи влияет на форму кривой силы тока не меньше, чем величина тока.

Второй цикл осциллограмм должен был показать нам режим печи во время ее повторного пуска. К моменту пуска печи тигель находится в холодном состоянии и под торцом электрода, поднятого вверх, дуга не может гореть. Но в то же время магма, окружающая боковую поверхность электродов, сохраняет достаточно высокую температуру и электропроводность. Поэтому ток в печи в этот период обуславливается исключительно шихтовой проводимостью. Таким образом, следовало ожидать, что кривая тока будет чистой синусоидой.

Кривая тока на осциллограмме рис. 138, д подтверждает это положение. Повторная осциллограмма рис. 138, е, снятая через 13 мин после пуска печи, показывает, что и в этот момент ток печи продолжает оставаться синусоидальным и, следовательно, печь работает по принципу печи сопротивления.

Первые признаки искажения тока появились только через 23 мин после пуска печи (см. рис. 138, ж). Но и это искажение отнюдь не следует приписывать появлению дуги под торцом электрода, т. е. в тигле печи. Электрод все это время оставался неподвижным и расстояние между подом и электродом было настолько велико, что подаваемое фазное напряжение не могло обеспечить горения дуги на таком расстоянии. Незначительное искажение тока в этот период объясняется появлением перемежающихся мелких дуг между боковой поверхностью электрода и оплавливающейся шихтой.

Существенно важным фактором, отмеченным за этот период работы печи, является то, что мощность печи с 3000 кВт при пуске через 25 мин поднялась до 6000 кВт. По мере разогрева печи ее мощность постепенно нарастала. Электроды за все это время оставались неподвижными, кривая силы тока была почти чисто синусоидальной, значит, дуга под электродом не горела и, следовательно, печь работала по принципу шихтовой проводимости, забирая мощность, равную почти номинальной.

Отметим тут же, что при испытаниях печи на 75%-ном ферросилиции был выявлен иной характер протекания процесса включе-

ния. В момент включения при поднятых электродах, в случае плавки 75%-ного ферросилиция, печь забирает меньшую мощность (2000—2500 кВт). Это объясняется тем, что шихта этого сплава содержит меньше железа, чем шихта 45%-ного ферросилиция и, следовательно, электропроводность его магмы меньше. С течением времени и там постепенно нарастают ток и мощность.

Но если электроды остаются неподвижными, мощность печи не поднимается выше 3000—4000 кВт; для дальнейшего нарастания мощности обязательно требуется более глубокая посадка электродов. Это можно объяснить тем, что удельная электропроводность шихты 75%-ного ферросилиция при прочих равных условиях меньше, чем шихты 45%-ного ферросилиция.

С началом регулирования, т. е. с углублением посадки электродов в шихту, мощность печи постепенно нарастает и, как свидетельствуют осциллограммы на рис. 138, з, степень искажения тока увеличивается. На последней осциллограмме степень искажения кривой тока достаточно велика и ясно выражена. Из этих осциллограмм видно, что под торцом электрода появляется дуга, горящая неустойчиво и с обрывами.

Увеличение мощности при переходе к дуговому режиму составило около 1200—1500 кВт, т. е. примерно 15—20% мощности печи. Исходя из этого, можно сделать вывод, что и при нормальной установившейся работе печи дуга забирает только 15—20% мощности, подаваемой в ванну, но мы склонны дать иное объяснение этому явлению.

В начале регулирования приходится осаждать электроды глубоко в ванну. При этом под торцами электродов появляются дуги и мощность печи нарастает. По мере возникновения и нарастания тока дуги растут и мощность, выделяющаяся в тиглях ванны. Это влечет за собою сильное газообразование в тиглях. В нормальных условиях значительная часть горячих газов удаляется через шейку вокруг электродов. В результате этого увеличивается оплавление шихты вокруг электродов и образование вокруг них устойчивого газового слоя. Этот газовый слой затрудняет переход тока от поверхности электрода в шихту, т. е. влечет за собой увеличение переходного сопротивления электрод—шихта и уменьшение тока шихтовой проводимости. Чем выше температура электрода и газов и чем больше количество отходящих газов, тем, очевидно, будет больше переходное сопротивление и, следовательно, меньше ток шихтовой проводимости. Появление газовых потоков вокруг электродов ухудшает условия горения тех перемежающихся дуг, которые обычно наблюдаются вокруг электродов в начальный период включения печи, что в конечном счете, опять-таки приводит к уменьшению тока шихтовой проводимости.

Работу печи обычно регулируют по току. При ручном регулировании дежурный персонал обязан поддерживать ток печи на определенном уровне. Поэтому при любом регулировании при уменьшении тока ниже заданного значения электроды осаживаются в ванну печи глубже, т. е. автоматически уменьшается расстояние между подом и электродом, иначе говоря, длина дуги.

Вследствие этого соответственно нарастает ток дуги, а следовательно, и суммарный ток печи.

Таким образом, *появление дуги влечет за собой уменьшение тока шихтовой проводимости и соответствующее увеличение тока дуги. Суммарный ток печи при правильном регулировании остается неизменным.*

Это увеличение тока дуги по мере становления устойчивого режима работы печи явно отражается на степени искажения кривых тока. С течением времени доля тока дуги в суммарном токе растет, поэтому увеличивается степень искажения формы кривой суммарного тока.

За весь этот период кривая тока дуги остается искаженной, т. е. тепловой режим тиглей остается неустановившимся. Чтобы после 5 ч простоя в ванне печи установился нормальный тепловой режим, требуется гораздо больше времени, чем те 2 ч, которые заняли описанные опыты.

Последующие осциллограммы (см. рис. 140), снятые через 13 ч после пуска печи, показывают совершенно иную картину. Кривые тока так же чисты от высших гармоник, как при работе печи в период пуска по принципу сопротивления. Значит, за длительный период работы печи создан весьма устойчивый тепловой режим; ионизация газовой сферы оказалась настолько высокой, что дуга не только не претерпевает разрывов, но в периоды максимума напряжения ток поддерживается достаточным количеством свободных электрических зарядов.

Отметим тут же, что испытания печи при выплавке 75%-ного ферросилиция дают те же результаты.

Осциллограмма тока такой печи, снятая после 15 ч непрерывной работы печи с полной нагрузкой, представляет почти чистую синусоиду и не содержит заметных высших гармоник.

3. Анализ работы печи при выплавке силикомарганца

Обратимся теперь к анализу результатов наблюдения над печью для производства силикомарганца.

Первые три цикла этих испытаний были проведены при необычном электроде. Он был обломан и конец его был погружен в шихту на незначительную глубину.

О возникновении под торцом электрода более или менее мощной дуги в данном случае не могло быть и речи. С момента включения здесь следовало ожидать протекания только тока шихтовой проводимости. Однако первая серия осциллограмм (см. рис. 141, *a—e*) показала, что кривые силы тока в определенной степени искажены. Особенно ясно бросается это в глаза при сравнении их с осциллограммами пуска ферросилициевой печи (см. рис. 138, *a—e*). Там мы видели, что кривые силы тока в течение длительного периода сохраняли синусоидальную форму, и более или менее заметные искажения в них начали появляться только после углубления электродов в шихту.

Заметные искажения кривых силы тока в данном случае можно объяснить появлением значительного числа мелких перемежающихся дуг, которые возникли вокруг электрода в период пуска.

Действительно, в рассматриваемом случае небольшой конец электрода перед пуском был окружен свежей непрореагировавшей шихтой; в зоне, где находился конец электрода, не было остывшей магмы и ток проходил через свежую шихту. Эти перемещающиеся дуги нетрудно было наблюдать над поверхностью колошника. Они поочередно горели на периферии колошника вокруг электрода ослепительным светом. По-видимому, такой же характер носил переход тока от электрода к шихте и в нижних зонах.

Более глубокие искажения как кривой тока, так и кривых напряжения, были зафиксированы на осциллограмме рис. 141, *д* после перепуска и посадки электрода. По-видимому, только после этого возникла дуга под торцом электрода. Но, так как тепловые условия, необходимые для непрерывного горения дуги, отсутствовали, то дуга горела с отрывами и со значительным искажением как кривой тока, так и кривых напряжения. Особенно сильное искажение заметно на кривой падения напряжения короткой сети. Это и понятно. Кривая падения напряжения является производной кривой тока и вследствие повышения частоты имеет относительно большие амплитуды высших гармоник, чем кривая тока.

Значительный интерес представляет группа осциллограмм рис. 141, *д—и*.

На осциллограмме рис. 141, *д*, кроме тока и падения напряжения короткой сети, записано фазное напряжение, а на остальных — напряжение дуги и фазное напряжение.

С точки зрения сдвига фазы, во всех этих кривых дело обстоит благополучно. Кривая тока везде почти совпадает с кривой напряжения дуги. Это значит, что индуктивность контура дуги настолько мала, что можно ею пренебречь. Далее, кривая тока везде отстает от кривой фазного напряжения, что обуславливается индуктивностью короткой сети. Этот сдвиг фазы по осциллограммам составляет $\sim 10^\circ$. Измерения эффективных напряжений короткой сети и фазного напряжения дали примерно те же результаты.

На осциллограмме рис. 141, *д*, снятой сейчас же после посадки электрода, виден довольно резко выраженный пик тока. Кроме того, в кривой тока зафиксирован второй, менее выраженный пик.

Длительность времени между этими двумя пиками составляет $\sim \frac{1}{3}$ полупериода тока. Прямая, проведенная через вершину этих пиков, имеет довольно резкий уклон к оси абсцисс вследствие того, что первый пик значительно выше второго. В остальной серии осциллограмм эти оба пика тока сохраняются, но разница между ними постепенно сглаживается и в последней осциллограмме (см. рис. 141, *и*) кривая тока принимает почти трапецидальный характер.

Характеристика кривой фазного напряжения на осциллограмме рис. 141, *и* в области максимума также пологая, с определенным наклоном к оси абсцисс.

В дальнейших осциллограммах полагая часть кривых как напряжения дуги, так и напряжения фазы выравнивается и на осциллограмме рис. 141, и кривая напряжения дуги приобретает также трапецеидальный характер. Но кривая фазного напряжения сохраняет некоторый уклон к оси абсцисс.

Наконец, группа осциллограмм, приведенных на рис. 141, *к—н*, показывает, что при установившемся режиме кривые силы тока и напряжения ванны весьма близки к синусоиде. Смещение нейтральной точки указывает на наличие дуги.

Таким образом, мы пришли к обычным формам тока и напряжения дуги.

4. Анализ работы печи при выплавке карбида кальция

Из рассмотренных предыдущих двух групп осциллограмм видно, что в ферросплавных печах форма кривых силы тока и напряжения может меняться в весьма широких пределах в зависимости от режима работы печи, и основным фактором, влияющим на форму кривых тока и напряжения, является тепловое состояние тигля ванны печи.

Эти положения остаются в силе и для карбидных печей.

Все эти серии осциллограмм показали, что с ухудшением теплового состояния тигля искажение кривых силы тока и напряжения начинает возрастать, и, наоборот, когда тепловые условия в тигле улучшаются, кривые сглаживаются и приближаются к синусоиде.

Действительно, кривые на осциллограмме, данной на рис. 145, *б* значительно искажены именно потому, что перед их снятием печь не работала, тигли печи остыли и, конечно, дуга не могла гореть нормально. Наоборот, кривые осциллограмм на рис. 145, *г* искажены меньше, потому что они сняты после длительной нормальной работы печи.

Результаты неправильной эксплуатации печи и недоброкачественной шихты иллюстрируются также кривыми рис. 145, *е, ж*.

В целом по форме кривых силы тока и напряжения осциллограммы малых и средних карбидных печей занимают промежуточное положение. Искажение кривых на этих осциллограммах больше, чем на осциллограммах при выплавке ферросилиция, и меньше, чем при выплавке силикомарганца. Это вытекает непосредственно из данных выше характеристик тиглей печей.

Как было отмечено, наиболее устойчивыми тиглями характеризуются ферросилициевые печи и наименее устойчивыми — ферромарганцевые.

Печи для производства карбида кальция и силикомарганца занимают среднее положение. Очевидно, при одинаковых эксплуатационных условиях кривые ферромарганцевой печи давали бы больше искажений и отступлений от синусоидальной формы.

5. Общие выводы

Выше была сделана попытка установить связь между напряженностью поля и величиной дуги. Было показано, что при различных формах охлаждения зависимость между током и градиентом потенциала дуги различна. Если дуга охлаждается излучением или теплопроводностью, то с увеличением тока градиент потенциала падает, при объемном же охлаждении градиент потенциала не зависит от тока.

С увеличением герметичности дуги, т. е. с уменьшением потерь тепла, зависимость градиента потенциала от силы тока может стать противоположной: с увеличением тока градиент потенциала может расти, и отношение градиента потенциала к току, т. е. сопротивление на единицу длины дуги, может сохранить постоянную величину.

Физически протекание всего процесса можно представить себе так. В начале зажигания дуги температура как газовой полости, так и стенок тигля низкая и охлаждение столба дуги происходит интенсивно. В периоды прохождения тока через нуль деионизация газового столба велика, дуга горит со значительными паузами, поэтому кривая тока значительно искажена. Но с течением времени температура как газов, так и стенок тигля повышается и колебания ее уменьшаются. Благодаря этим обстоятельствам паузы тока уменьшаются и, наконец, горение дуги становится непрерывным. Но непрерывность дуги еще не означает, что процессы ионизации могут обеспечить в разрядном промежутке ток любой величины. Процессы охлаждения, особенно объемного, к которому относятся и возможные в столбе дуги химические реакции, могут ограничить число свободных зарядов, создающих ток. Наконец, в столбе дуги могут наступить такие температурные условия, что ток вследствие достаточного числа заряженных частиц будет следовать непосредственно за ходом градиента потенциала в пределах всего полупериода. Такие тенденции постепенного становления температуры и формы кривых тока и напряжения явно прослеживаются на осциллограммах, приведенных на рис. 141, *д—и*. На рис. 141, *д* заметны значительные искажения кривых силы тока и напряжения, а на последней осциллограмме (см. рис. 141, *и*) кривые уже значительно сглажены. Если бы удалось довести исследование этой фазы до логического конца, то должны были бы получить почти чистые синусоиды тока и напряжения, как это происходило при исследованиях на ферросилициевой печи. Но получение таких кривых на силикомарганцевой печи затрудняется вследствие того, что тигель печи при этом сплаве легко подвергается деформации и, следовательно, нарушения теплового режима в таких тиглях возникают чаще.

Несмотря на это, следующая группа осциллограмм (рис. 141, *к—м*), снятая на третьей фазе, работавшей в нормальных условиях, показывает, что и при этом сплаве могут устанавливаться температурные условия, обеспечивающие более или менее чистые синусоидальные формы кривых силы тока и напряжения. Эта группа осциллограмм еще раз показывает, что постоянство напряжения и период

горения дуги отнюдь не является неременным условием существования дуги в руднотермической печи, а только одним из частных случаев горения дуги, соответствующим определенным фактическим условиям. В нормальных условиях при установившемся тепловом режиме дуга в ферросилициевой печи горит непрерывно. Благодаря высокой устойчивости стенок тигля и высокой температуре как столба дуги, так и стенок тигля кривые тока и напряжения дуги имеют синусоидальную форму. Нарушение этой формы наступает в периоды неустановившегося теплового режима ванны и прежде всего тигля печи.

По характеру горения дуги весьма близко к ферросплавным печам подходят карбидные печи. Форма кривых тока и напряжения в карбидной печи очень близка к синусоиде, и более или менее значительные искажения наступают только при нарушениях нормального режима работы печи.

В силикомарганцевой печи в период установившегося режима форма кривых силы тока и напряжения дуги также близка к синусоиде. Однако нарушение этого режима наступает чаще вследствие меньшей устойчивости стенок тигля и более частых нарушений формы последнего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брон О. Б. Электрическая дуга в аппаратах управления. М.—Л., Госэнергоиздат, 1954. с. 532 с ил.
2. Вочке И. Электрическая плавильная печь. Пер. с нем. Р. М. Четыркина. М., ГОНТИ, 1936. 540 с. с ил.
3. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Т. I. М., Гостехтеориздат, 1952. 432 с. с ил.; т. II. М., «Наука», 1971. 544 с. с ил.
4. Диомидовский Д. А. Металлургические печи цветной металлургии. М., «Металлургия», 1970. 702 с. с ил.
5. Елисеев А. А. Василий Владимирович Петров. М., Госэнергоиздат, 1949. 180 с. с ил.
6. Еднерал Ф. П. Электрометаллургия стали и ферросплавов. М., Metallurgizdat, 1963. 640 с. с ил.
7. Елютин В. П., Павлов Ю. А., Левин Б. Е. Ферросплавы. М., Metallurgizdat, 1951. 496 с. с ил.
8. Жердев И. Т. — «Изв. вуз. Черная металлургия», 1962, № 3, с. 77—87. с ил.
9. Жердев И. Т. — «Электричество», 1962, № 8, с. 30—34 с ил.
10. Жердев И. Т. — «Электричество», 1960, № 2, с. 46—53 с ил.
11. Залесский А. М. Электрическая дуга отключения. М., Госэнергоиздат, 1963. 266 с. с ил.
12. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. М., Гостехтеориздат, 1952. 808 с. с ил.
13. Караев Р. И. — «Электричество», 1949, № 10, с. 14—19 с ил.
14. Караев Р. И. — «Электричество», 1952, № 10, с. 38—45 с ил.
15. Куренный Э. Г. — «Электричество», 1970, № 6, с. 45—50 с ил.
16. Кузнецов И. В. Люди русской науки. М., Гостехтеориздат, 1948, т. I. 646 с. с ил.; т. 2, 1186 с. с ил.
17. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. М., Гостехтеориздат, 1950. 672 с. с ил.
18. Максименко М. С. Основы электротермии. М., ГОНТИ, 1937. 135 с. с ил.
19. Марков Н. А., Баранник О. В. Эксплуатационный контроль электрических параметров дуговых электропечей. М., «Энергия», 1973. 104 с. с ил.
20. Марков Н. А., Чердовских П. П. Распределение тока в ванне дуговой печи. М., «Энергия», 1966. 104 с. с ил.
21. Мирский Ю. А. Электропечи за рубежом. М., ЦИНТИ, 1961. 92 с. с ил.
22. Микулинский А. С. Процессы рудной электротермии. М., «Энергия». 280 с. с ил.
23. Микулинский А. С., Юманова Л. В. К вопросу прохождения тока в карбидной печи. М., Госхимиздат, 1954 (Научные труды УНИХИМ. Вып. 2), 235 с. с ил.
24. Нейман Л. Р., Зайцев И. А., Дьяченко К. П. Прибор для измерения мощности, тока и напряжения без разрыва цепи тока. М., Госэнергоиздат, 1956 (Труды ЛПИ. Сб. № 184), с. 45—60 с ил.
25. Окороков Н. В. Дуговые сталеплавильные печи. М., «Металлургия», 1971. 343 с. с ил.
26. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. М., «Машиностроение», 1966. 359 с. с ил.
27. Платонов Г. Ф. Параметры и электрические режимы металлургических электродных печей. М., «Энергия», 1965. 151 с. с ил.
28. Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры. Под ред. Л. Е. Никольского. М., «Энергия», 1971. 271 с.
29. Розенберг В. Л., Микулинский А. С., Лыков А. В. и др. Зависимость технико-экономических показателей мощных закрытых ферросплавных электропечей от изменения критериев электрического и геометрического подобия. М., Изд. Информстандартэлектро, 1967. 34 с. с ил.
30. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Пер. с 1-го амер. изд. Под ред. В. Ю. Ломоносова. М., ИЛ, 1955. 715 с. с ил.
31. Свечанский А. Д., Смельянский М. Я. Электрические промышленные печи. Ч. 2. Дуговые печи. М., «Энергия», 1970. 262 с. с ил.

32. Сергеев П. В. Энергетические закономерности руднотермических печей, электролиза и электрической дуги. Алма-Ата, Изд-во АН Каз. ССР, 1963. 251 с. с ил.
33. Сисоян Г. А. — «Сталь», 1949, № 5, с. 404—412 с ил.
34. Сисоян Г. А. — «Сталь», 1950, № 9, с. 28—34 с ил.
35. Смоляренко В. Д., Кузнецов Л. Н. Энергетический баланс дуговых сталеплавильных печей. М., «Энергия», 1973. 86 с. с ил.
36. Струнский Б. М. Руднотермические плавильные печи. М., «Металлургия», 1972. 367 с. с ил.
37. Научные труды Куйбышевского индустриального института. Вып. III. М., Госполиграфиздат, 1950, с.75—102 с ил.
38. Тиходеев Г. М. Энергетические свойства электрической сварочной дуги. М., Изд-во АН СССР, 1961. 254 с. с ил.
39. Финкельнбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. Пер. с нем. В. Б. Левина и др. М., ИЛ, 1961. 370 с. с ил.
40. Шателен М. И. Русские электротехники во второй половине XIX века. М., Госэнергоиздат, 1950. 384 с. с ил.
41. Электротермическое оборудование. Под ред. А. П. Альтгаузена, М. Я. Смелянского, М. С. Шевцова. М., «Энергия», 1967. 487 с. с ил.
42. Kelly W. H. — «Journal du Four électrique», 1959, № 1, p. 27.
43. Paschkis V., Persson J. Industrial electric furnaces and appliances. N.-V. — London, Interscience, 1960. 607 p.
44. Dunski Ch., K r a b i e l l H. — «Electrowärme», 1963, № 11, S. 519—525.
45. K r a b i e l l H. — «Electrowärme», 1962, № 1, S. 12—17.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Анализ работы печи при выплавке ферросилиция 289
- силикомарганца 292
- карбида кальция 295
- Анод 26
- Анодное пятно 24

Б

- Блок-схема фазы регулятора мощности 170

В

- Ванна печи, электрическое поле 228
- тепловое поле 261
- Вольтамперные характеристики 57, 77
- Возникновение дуги вследствие нарушения контактов 112
- при пробое газоразрядного промежутка 118

Г

- Гашение многоамперных дуг 87
- Градиент газа пробивной 118
- потенциала в столбе разряда 53
- , зависимость от давления 60
- , — силы тока 56

Д

- Денонизация столба дуги 94
- Дезэлектризация 47
- Диапазон напряжений сталеплавильных печей 168
- Диффузия 48
- Длина свободного пробега 35
- Дуга автоэлектронная 20
- высокой интенсивности 56
- длинная 20
- короткая 20
- печная 84, 107
- сварочная 32
- , постоянная составляющая тока 33
- термическая 20
- Дуговой промежуток 21

Е

- Емкость сталеплавильных печей 168

З

- Зависимость динамического сопротивления от температуры 129
- тока от диаметра электрода 240

- зазора между электродом и подом 238
- размеров тигля 237
- Закон минимума энергии в дуге 53

И

- Изменение температуры относительное 130
- Измерение напряжения 153
- силы тока 157
- методом падения напряжения 160
- Ионизация газов 38
- контактная 39
- фотоконтактная 39
- при соударении частиц газа с ионами 41
- электронами 39
- термическая 41

К

- Катод
- Катодная область дуги 31
- Катодное падение потенциала 37
- пятно 23
- Квантовый статистический вес состояния 42
- Кинетическая энергия электрона 40
- Классификация дуг переменного тока 106
- дуговых разрядов 20
- руднотермических процессов 9
- тиглей руднотермических печей 250
- электрических печей 8
- Контактное сопротивление 250
- Контур с электрической дугой в печи однофазной 133
- трехфазной 137
- Конфигурация электрического поля печи однофазной 234
- трехфазной 242
- Коэффициент диффузии 49
- рекомбинации 47
- температурный 252
- Критерий Кауфмана 121

Л

- Линии тока 235

М

- Магнитный пояс 157
- Математические методы анализа 126
- Материалы графитированные 248
- Модель печи однофазной 234
- трехфазной 240

Н

- Напряженность электрического поля 232
- Несамостоятельный разряд 16
- Неустановившийся тепловой режим печи 277

О

- Обрывы тока дуги 87
- Охлаждение дуги объемное 55

П

- Печь карбидная 199
 - , дуга в установившемся режиме 211
 - переходном режиме 219
 - нагрузочные характеристики 202
 - осциллограммы 225, 227
 - параметры 199, 210
 - показатели 201, 207
 - производство карбида кальция 210
 - Любatti 260
 - рафинировочная 9
 - сталеплавильная 162
 - нагрузочные характеристики 169
 - осциллограммы в период расплавления 171
 - рафинирования 176
 - параметры 167
- ферросплавная 178
 - выплавка силикомарганца 191
 - нагрузочные характеристики 181
 - параметры 178
 - плавка 45%-ного ферросилиция 183
 - показатели 181
- Пик возникновения дуги 93
- исчезновения дуги 99
- Плазма 38
- Плотность тока в катодном пятне 24
 - ионного 36
 - электронного 36
 - заряда объемная 52
- Потенциалы ионизации 44
- Преобразование энергии 8
- Прибор ламповый для измерения силы тока 162
- Прохождение тока через дугу 29
- Процессы руднотермические 99

Р

- Разряд электрический 16
 - возникновения 18
 - дуговой 18
 - самостоятельный 16
 - темный 16
 - тлеющий 16

- Распределение потенциала в дуговом промежутке 28
- Расчет теплового поля однофазной печи 265
 - электрического поля однофазной печи 229
- Регулятор электрического режима 171
- Рекомбинация 47
 - в печной дуге 85

С

- Скорость движения заряженных частиц 52
- Смещение нейтрали печи 151
- Сопротивление динамическое 91
 - дифференциальное 92
 - статическое 91
- Степень ионизации 42
 - средняя для смеси газов 45
- Столб дугового разряда 51
- Строение и форма тигля печи однофазной 266
 - трехфазной 268
 - разрядного промежутка 23

Т

- Температура дуги 65
 - тигля 272
- Температурное поле дуги 68
 - столба дуг 67
- Тепловое поле с параметрами q_k и p_k 261
- Типы кривых напряжения дуги 99
- Ток шихтовой проводимости 239
 - эмиссии 36
- Трансформатор печей 179, 183, 199
 - тока для измерения силы тока 159

У

- Уравнение напряжения столба дуги 126
 - Саха 42
 - , связывающее параметры столба дуги 53
- Устойчивость переменного тока 122
 - постоянного 120

Ф

- Форма кривых тока, напряжения и сопротивления 90
 - прямоугольная 140
 - трапецидальная 148
 - напряжения дуги в печи однофазной
 - трехфазной 143

Х

- Характеристики вольтамперные 57, 77
- электрические постоянного тока 72
- — — — — возрастающие 74
- — — — — падающие 75
- — переменного тока 81

Ш

- Шунтирование электрической дуги 281
- — — — — влияние на форму кривых тока и напряжения 283

Э

- Экспериментальное исследование электрического поля печи однофазной 234
- — — — — трехфазной 240

Электризация газа 49

- Электропроводность восстановителей 246
- металлов 252
- окислов 252
- расплавов
- — в печи сталеплавильной 255
- — — — — стекловаренной 260
- — — — — карбида кальция 256
- — — — — при наличии шлаков 258
- — — — — ферросилиция 256
- шихтовых материалов 246
- шихтовой смеси 254
- Эмиссия термоэлектронная 31
- электростатическая 34
- Эффект сжимающий 61

ОГЛАВЛЕНИЕ

Из предисловия к первому изданию	5
Из предисловия ко второму изданию	5
Предисловие к третьему изданию	6
Глава I. Краткие сведения об электрических печах	7
1. Общая классификация электрических печей	7
2. Характеристика руднотермических печей	7
3. Энергетические параметры ванны электрических печей	12
Глава II. Теория электрической дуги (дугового разряда)	13
1. Открытие электрической дуги (исторический обзор)	12
2. Виды электрических разрядов в газах	16
3. Классификация дуговых разрядов	20
4. Общее описание дугового промежутка	21
5. Распределение потенциала в дуговом промежутке	28
6. Прохождение тока через дугу	29
7. Катодная область дуги	31
8. Ионизация газов	38
9. Деэлектризация газов	47
10. Столб дугового разряда	51
11. Зависимость продольного градиента потенциала столба дуги от давления	60
12. Явление сжимающего эффекта в дуге	61
13. Температура дуги	65
Глава III. Электрические характеристики дуги	72
1. Характеристики дуги постоянного тока	72
2. Методы графического изображения характеристик цепи переменного тока	78
3. Характеристики дуги переменного тока	81
4. Форма кривых тока, напряжения и сопротивления дуги переменного тока	90
5. Характеристики эффективных величин дуги переменного тока	100
6. Классификация дуг переменного тока	106
7. Обзор литературы о печной дуге переменного тока	108
Глава IV. Возникновение дуги и устойчивость ее горения	112
1. Возникновение дуги вследствие нарушения контакта между электродами	112
2. Возникновение дуги при пробое газоразрядного промежутка	118
3. Устойчивость горения дуги постоянного тока	120
4. Устойчивость горения дуги переменного тока	122
Глава V. Математические методы анализа силы тока и напряжения дуги	126
1. Введение	126
2. Уравнение напряжения столба дуги	126
3. Зависимость динамического сопротивления столба дуги от температуры	129
4. Контур с электрической дугой в однофазной печи	133
5. Контур с электрической дугой в трехфазной печи	137
6. Прямоугольная форма напряжения дуги в однофазной печи	140
7. Прямоугольная форма напряжения дуги в трехфазной печи	143
8. Трапецеидальная форма напряжения дуги в трехфазной печи	148
9. Смещение нейтрали печи	151
Глава VI. Методика измерений на мощных электрических печах	152
1. Введение	152
2. Измерение напряжения	153
3. Измерение силы тока	157
4. Ламповый прибор для измерения напряжения, тока и мощности	162

Глава VII. Электрическая дуга в дуговой сталеплавильной печи	165
1. Введение	165
2. Параметры современных дуговых сталеплавильных печей	167
3. Осциллограммы силы тока и напряжения сталеплавильной печи в период расплавления	171
4. Осциллограммы силы тока и напряжения сталеплавильной печи в период рафинирования	176
Глава VIII. Дуга в ферросплавных печах	178
1. Введение	178
2. Параметры современных ферросплавных печей	178
3. Дуга при выплавке 45%-ного ферросилиция	183
4. Дуга при выплавке силикомарганца	191
Глава IX. Дуга в карбидных печах	199
1. Параметры исследованных печей	199
2. Специфические особенности производства карбида кальция	210
3. Дуга в карбидной печи в установившемся режиме	211
4. Дуга в карбидной печи в переходном режиме	219
Глава X. Электрическое поле в ванне печи	228
1. Введение	228
2. Аналитический расчет электрического поля однофазной печи при постоянстве электропроводности шихты	229
3. Экспериментальное исследование электрического поля однофазной печи	234
4. Экспериментальное исследование электрического поля трехфазной печи	240
5. Электропроводность шихтовых материалов	246
6. Электропроводность расплавов	255
Глава XI. Тепловое поле в ванне печи	261
1. Введение	261
2. Тепловое поле печи при наличии параметров q_k и p_k	261
3. Строение и форма тигля ванны	266
4. Температура тигля	272
5. Экспериментальные данные о строении и температуре тигля	273
6. Неустановившийся тепловой режим ванны печей	277
7. Классификация тиглей руднотермических печей	280
Глава XII. Шунтирование электрической дуги в печи	281
1. Принципы шунтирования дуги	281
2. Влияние шунтирования на форму кривых тока и напряжения дуги	283
3. Шунтирование трехфазной дуги	286
Глава XIII. Анализ результатов экспериментального исследования мощной электрической дуги	289
1. Общие соображения	289
2. Анализ работы печи при выплавке ферросилиция	289
3. Анализ работы печи при выплавке силикомарганца	292
4. Анализ работы печи при выплавке карбида кальция	294
5. Общие выводы	295
Список литературы	297
Предметный указатель	299

ГРИГОРИЙ АРТЕМЬЕВИЧ СИСОЯН

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Редактор *В. Б. Гоголь*

Редактор издательства *М. Р. Лановская*

Художественный редактор *Д. В. Орлов*

Технический редактор *Е. Б. Вайнштейн*

Корректоры *Н. А. Дынина* и *Л. Ф. Орлова*

Переплет художника *А. П. Кондратюка*

Сдано в набор 30/XI 1973 г. Подписано в печать 5/IV 1974 г.
Т-06760. Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1.
Печ. л. 19. Уч.-изд. л. 22,30. Тираж 2500 экз. Заказ № 727.
Изд. № 2044. Цена 2 р. 44 к.

Издательство «Металлургия»
119034, Москва, Г-34, 2-й Обыденский пер., 14

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
193144, Ленинград, С-144, ул. Мойсеенко, 10

14

29530