

РУДНОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

1. Общая характеристика руднотермических установок

Среди электрических печей рудно-термические печи занимают особое место. В этих установках реализуются разнообразные технологические процессы, что обуславливает специфические требования к конструкции печи. Этим объясняется большой диапазон единичных мощностей от единиц до 100 МВА. Превращение электрической энергии в теплоту происходит как в электрической дуге, так и в обрабатываемых материалах.

Рудно-термические печи, в которых осуществляются технологические процессы восстановления одного или нескольких окислов руд за счет восстановителя, загружаемого совместно с рудой, называют рудовосстановительными. В качестве восстановителя применяют элемент, образующий более прочный окисел, чем у восстанавливаемого элемента, или окисел, быстро удаляемый из зоны восстановления. Наиболее часто применяемый и дешевый восстановитель – углерод, а процесс, протекающий при восстановлении углеродом, называют углетермическим.

Имеются электропечи, в которых проходят технологические процессы расплавления руд без проведения химических реакций восстановления или с небольшой долей химических реакций восстановления. Такие печи называют рудоплавильными. К таким относятся электропечи для плавки огнеупоров (муллит, бакор), синтетических и сварочных флюсов, при производстве которых требуется гомогенизация элементов, составляющих расплав. Противоположным направлением – разделением составляющих частей за счет различного удельного веса в жидком состоянии – служат электропечи для получения медного и медно-никелевого штейна. Восстановление загрязняющих первичный окисел примесей и их сегрегация осуществляется в электропечах для получения нормального и легированного электрокорунда, плавящихся огнеупоров (периклаз).

Таким образом, к рудно-термическим электропечам относятся электротермические установки с большим разнообразием технологических процессов, но объединенных основной целью – за счет прямого нагрева электрическим током в этих электропечах производится восстановление из руд минералов основного и (или) сопутствующего элемента или расплавление руд с целью гомогенизации или сегрегации их составляющих.

В электрометаллургии различают так называемые «большие» и «малые» сплавы. К первым относятся ферросилиций, кристаллический кремний, феррохром, силикокальций, силикомарганец, ферромарганец, фосфор, карбид кальция, медный и медно-никелевый штейн, электрокорунд, карбид кремния, синтетический и сварочный флюсы и другие, ко вторым – ферровольфрам, феррованадий, карбид бора, плавящиеся огнеупоры и дру-

гие. «Большие» сплавы потребляются в народном хозяйстве десятками и сотнями тысяч тонн в год, тогда как «малые» - несколько тысяч тонн в год. Масштаб производства весьма важен для определения мощности и типа электрометаллургического аппарата.

Рост производства и потребления стали инициирует рост производства и потребления ферросплавов. Объем производства ферросплавов имеет тенденцию постоянного роста. Так, в 2001 г. выпуск ферросплавов в мире составил 19,2 млн. т, а в 2005 г. — 27,6 млн. т, что на 31 % больше. В среднем объем их производства в эти годы составлял 2,44 % общего мирового объема выплавки стали [1].

Как правило, доминирующее положение в производстве ферросплавов занимают страны, имеющие запасы сырья и достаточно развитую промышленность. Основными странами-производителями ферросплавов являются Китай, ЮАР, Украина, Россия, Казахстан, Япония, Бразилия, Индия, Норвегия. На долю этих стран приходится 84,4 % мировой выплавки ферросплавов.

В таблице 1 приведены параметры некоторых руднотермических установок, находящихся в эксплуатации на территории России [2].

2. Технологические процессы и их влияние на конструкцию руднотермических электропечей

Наиболее распространенную группу рудно-термических электропечей представляют собой так называемые ферросплавные электропечи, в которых руды — окислы различных элементов восстанавливаются и, как правило, сплавляются с присутствующим в шихте железом. Наиболее распространенным среди ферросплавов является ферросилиций, который применяется для раскисления и легирования стали. Высококремнистые сорта ферросилиция используются также для силикотермических процессов восстановления. Производится несколько марок ферросилиция, в основном различающихся содержанием в продукте кремния (в пределах от 18 до 90%), а также так называемого «металлического» кремния, с примесью железа в пределах 0,4÷1,5 %.

В качестве шихтовых материалов для выплавки ферросилиция применяют кварцит, представляющий собой кремнистый песчаник, на 97-98 % состоящий из кремнезема — SiO_2 , восстановитель в виде коксика, и железо - в виде стальной стружки. Восстановление кремнезема твердым углеродом в условиях электропечи определяется сочетанием ряда химических реакций с образованием промежуточных продуктов, обнаруживаемых в печи — газообразной монооксида кремния и твердого карбида кремния. Теоретическая температура начала реакции равна 1514 °С [3].

Таблица 1

Рабочие показатели некоторых рудно-термических электропечей

№ п/п	Тип электропечи	Основной продукт	Установленная мощность трансформатора, $S_{тр}$, МВА	Полная рабочая мощность печи, $S_{п}$, МВА	Полезная рабочая мощность печи $P_{пол}$, МВт	Рабочий ток в электроде I_p , кА	Рабочее напряжение U_p , В	Коэффициент мощности, естественный	Электрический КПД, $\eta_{эл}$	Диаметр электрода мм	Диаметр распада электрода* D_p , мм
1	РКО-20,0	Ферросилиций, 75%	20,0	16,8	13,5	53,0	183,0	0,90	0,87	1100	2700
2	РКО-29,0	Ферросилиций, 65%	29,0	24,5	19,0	72,3	195,8	0,89	0,87	1400	2900
3	РКЗ-40,0	Ферросилиций, 65%	40,0	40,0	32,5	106,0	217,4	0,69	0,87	1500	3900
4	РКЗ-21,0	Ферросилиций, 45%	21,0	21,7	14,9	69,0	182,0	0,79	0,87	1200	2900
5	РКЗ-80,0	Ферросилиций, 45%	80,0	80,0	66,2	171,1	268,8	0,56	0,91	1900	5400
6	РКО-16,5	Ферросиликохром	16,5	18,97	13,5	63,3	173,0	0,80	0,89	1200	300
7	РКО-16,5	Феррохром	16,5	16,85	13,1	54,5	178,5	0,82	0,91	1200	2800
8	РКО-16,5	Силикохром	13,95	12,99	9,71	46,0	163,0	0,86	0,87	1100	2550
9	РПО-11,0	Ферромарганец	11,15	10,25	6,83	42,0	141,0	0,79	0,84	1100	2100
10	РКЗ-81	Силикомарганец	81,0	75,0	32,7	149,5	290,0	0,54	0,80	2000	5650
11	РПЗ-80	Силикомарганец	80,0	80,0	66,8	101,2	263,5	0,76	0,91	2400×1200	3600
12	РКО-15,0	Силикокальций	15,07	13,22	8,15	57,0	134,0	0,73	0,84	1050	2500
13	РПО-40к	Карбид кальция	40,0	36,8	30,0	86,0	247,0	0,88	0,92	2800×650	2400
14	РКЗ-48ф	Фосфор	50,0	50,0	46,8	62,5	460,0	0,96	0,97	1400	4000
15	РКЗ-80ф	Фосфор	80,0	72,0	58,9	78,0	533,4	0,84	0,97	1700	4800
16	РКО-16,5	Нормальный электрокорунд	16,5	14,8	12,4	39,6	217,0	0,90	0,92	1200	3000
17	РПЗ-20	Медноникелевый штейн	20,0	16,1	14,0	28,4	327,0	0,92	0,95	1200	3400

* Для печей с круглыми ваннами приводится диаметр распада электродов, а для печей с прямоугольными ваннами – расстояние между осями электродов.

Большое влияние на ход реакции восстановления кремнезема оказывает присутствие железа, которое растворяет кремний и выводит его из зоны реакции. Железо также разрушает образующиеся при реакции в твердой фазе карбиды кремния, что способствует ускорению суммарной реакции восстановления кремнезема. При растворении кремния в железе, выделяется тепло, что уменьшает расход электроэнергии. Наличие в шихте железа снижает также расчетную температуру начала восстановления кремния [4].

Выплавку ферросилиция ведут непрерывным способом с периодической загрузкой шихты на колошник в открытых электропечах, и непрерывной загрузкой – в закрытых, с периодическим выпуском сплава и шлака, непрерывным удалением печных газов. Процесс плавки происходит главным образом у электродов. Основная часть протекающего через электроды тока проходит через торцевую часть электрода на расплав, образуя электрическую дугу. Под действием дуги близлежащее пространство разогревается до температуры $1700\div 1750\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда происходит восстановление кремния, расплавление железа и его сплавление с кремнием. Под действием дуги образуется определенное количество паров кремния и железа, которые вместе с реакционными газами образуют газовую полость – тигель.

На рис. 1 схематично изображено рабочее пространство рудовосстановительной печи.

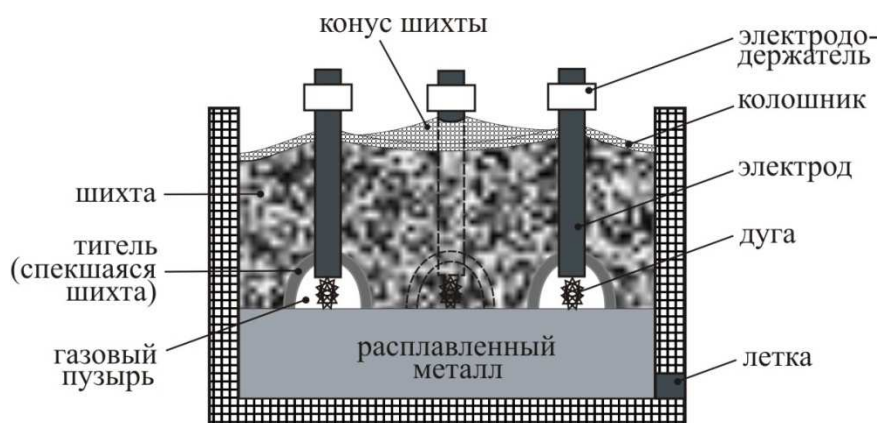


Рис. 1. Рабочее пространство рудовосстановительной печи

Для обеспечения выпуска металла и шлака необходимо достаточно близкое взаиморасположение тиглей. Удерживающая сплав футеровка работает под воздействием высокой температуры расплава, химических и механических воздействий перемещающихся расплавленных металла и шлака. Размеры ванн должны быть выбраны такими, чтобы, с одной стороны, обеспечить достаточно высокую температуру металла и шлака для их выпуска и последующей разливки, а с другой - наименее возможное разрушение футеровки под воздействием вышеперечисленных факторов. По технологии стремятся к тому, чтобы на внутренней поверхности футеровки образовывался слой гарнисажа – застывший слой из проплавляемой шихты, частиц футеровки, шлака и расплава. Гарнисаж защищает футеровку от дальнейшего разру-

шения и обеспечивает более длительную ее эксплуатацию. Наибольшее разрушающее воздействие на футеровку оказывает, как правило, шлак. При плавке ферросилиция образуется, как указано выше, небольшое количество шлака – процесс малошлаковый, поэтому образование гарнисажа не является первостепенной задачей. Исходя из этих требований, огнеупорный слой футеровки ванны электропечи для выплавки ферросилиция выполняют из угольных блоков.

Выпуск металла и шлака производят совместно через лётчные отверстия, выполненные в боковой стене футеровки на уровне подины. Выпуск производится периодически 6÷8 раз в смену. Между выпусками лётные отверстия закрывают специальными пробками из смеси угольной массы и глины, а перед выпусками разделявают кислородным или электрическим прожогом.

Образовавшиеся в газовой полости реакционные газы, проходя через слой шихты, отдают ей тепло, а пары кремния и железа конденсируются на холодной шихте. В открытых печах на поверхности шихты (колошнике) выделяющийся из печи газ сгорает, создавая тяжелые температурные условия работы оборудования и обслуживающего персонала, а уносимые вместе с газом пыль и возгоны загрязняют атмосферу цеха и окружающее пространство. Поэтому ванну печи стремятся укрыть сводом, а выделяющийся из печи газ собрать, очистить от пыли и направить на утилизацию.

Так как реакция восстановления идет, в основном, на стенках тигля (см. рис. 1), а тигель имеет размеры, ненамного превышающие диаметр электрода, то в электропечах для плавки ферросилиция подача шихты должна производиться в приэлектродную зону. В открытых электропечах (рис. 2) загрузку ведут загрузочными машинами напольного типа и подгребают шихту к электродам, где она образует конусы с диаметром основания, равным приблизительно двум диаметрам электродов. В закрытых электропечах загрузку шихты ведут в загрузочные воронки, охватывающие каждый из электродов (рис. 3).

При нормальном ходе технологического процесса в закрытой электропечи удастся уловить до 95% реакционных газов. В электропечи мощностью 21 МВА образуется около $2200 \text{ Н} \cdot \text{м}^3/\text{ч}$ реакционного газа, состоящего из 80÷90 % окиси углерода, а также имеющего в своем составе двуокись углерода, водород, кислород, азот и углеводороды.

Плавильные электропечи укрываются сводом. Колошник электропечей, выплавляющих ферросилиций с содержанием кремния более 65%, требует постоянного обслуживания ввиду спекания верхних слоев шихты и поэтому не может быть укрыт сводом. Эксплуатация их ведется в открытом варианте, а для защиты цеховых конструкций и обслуживающего персонала от тепловых излучений над печью устанавливается зонт, также собирающий колошниковые газы, поступающие для очистки от пыли в газоочистное устройство.

В последнее время для утилизации тепла, выделяемого при сгорании на колошнике реакционных газов, строят открытые электропечи с «низким» зонтом, который является своеобразным котлом-утилизатором. Одновремен-

но облегчается и работа газоочистки, так как резко сокращается объем собираемых газов, разбавленных воздухом цеха.

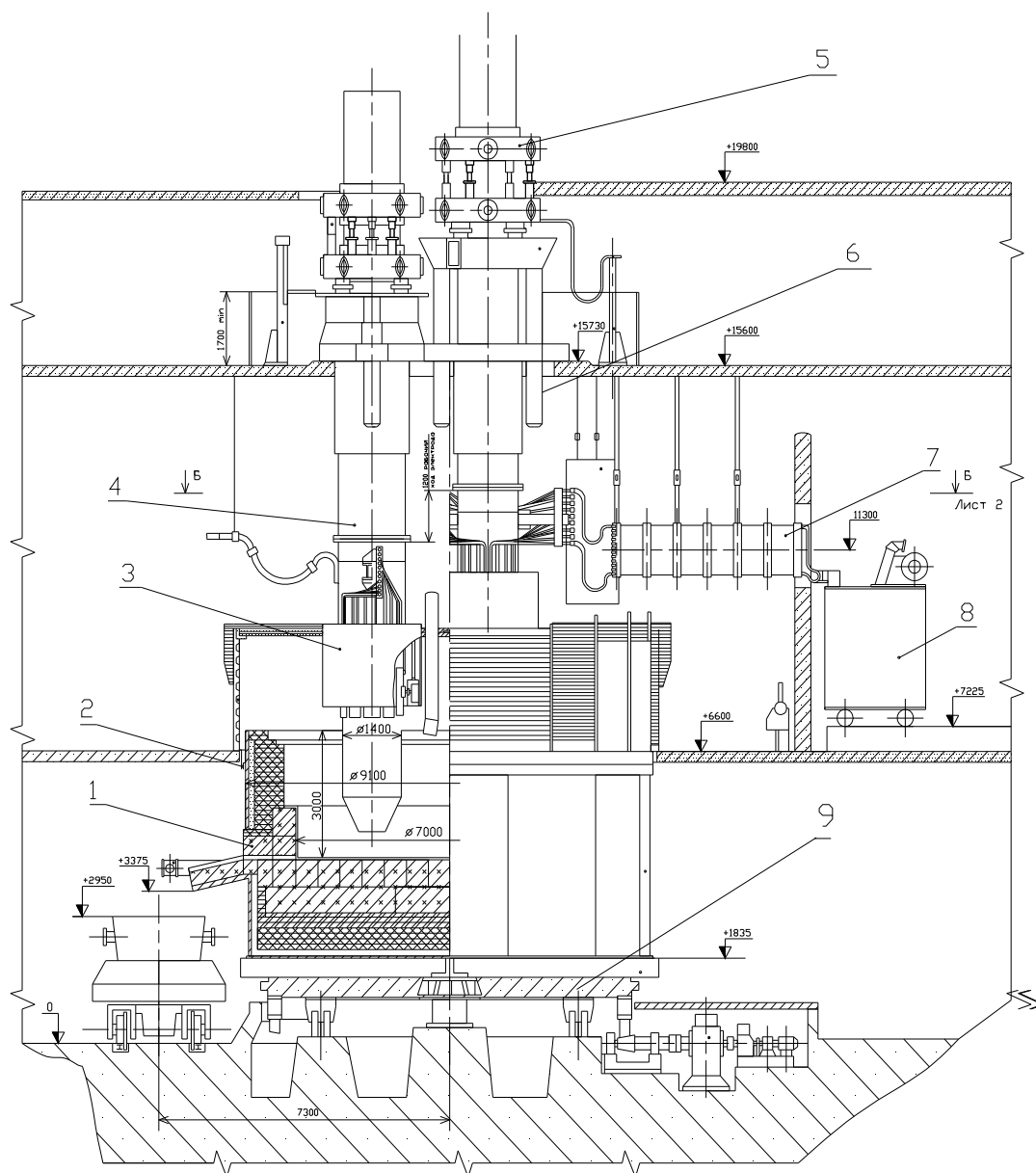


Рис. 2. Открытая ферросплавная электропечь РКО-25: 1– футеровка; 2 – кожух ванны; 3 – механизм зажима электрода; 4 – кожух самоспекающегося электрода; 5 – устройство для перепуска электрода; 6 – гидроподъемник; 7 – короткая сеть; 8 – трансформатор; 9 – опорная плита механизма вращения

С целью более равномерного термического воздействия на футеровку, борьбы с образованием спекающихся участков колошника, для более равномерного схода шихты электропечи для производства ферросилиция оборудуются механизмом вращения ванны со временем вращения $60 \div 80$ часов за один оборот и сектором вращения $80 \div 120^\circ$. Установлено, что вращение целесообразно при бесшлаковых и малошлаковых процессах и малоэффективно при многошлаковых процессах.

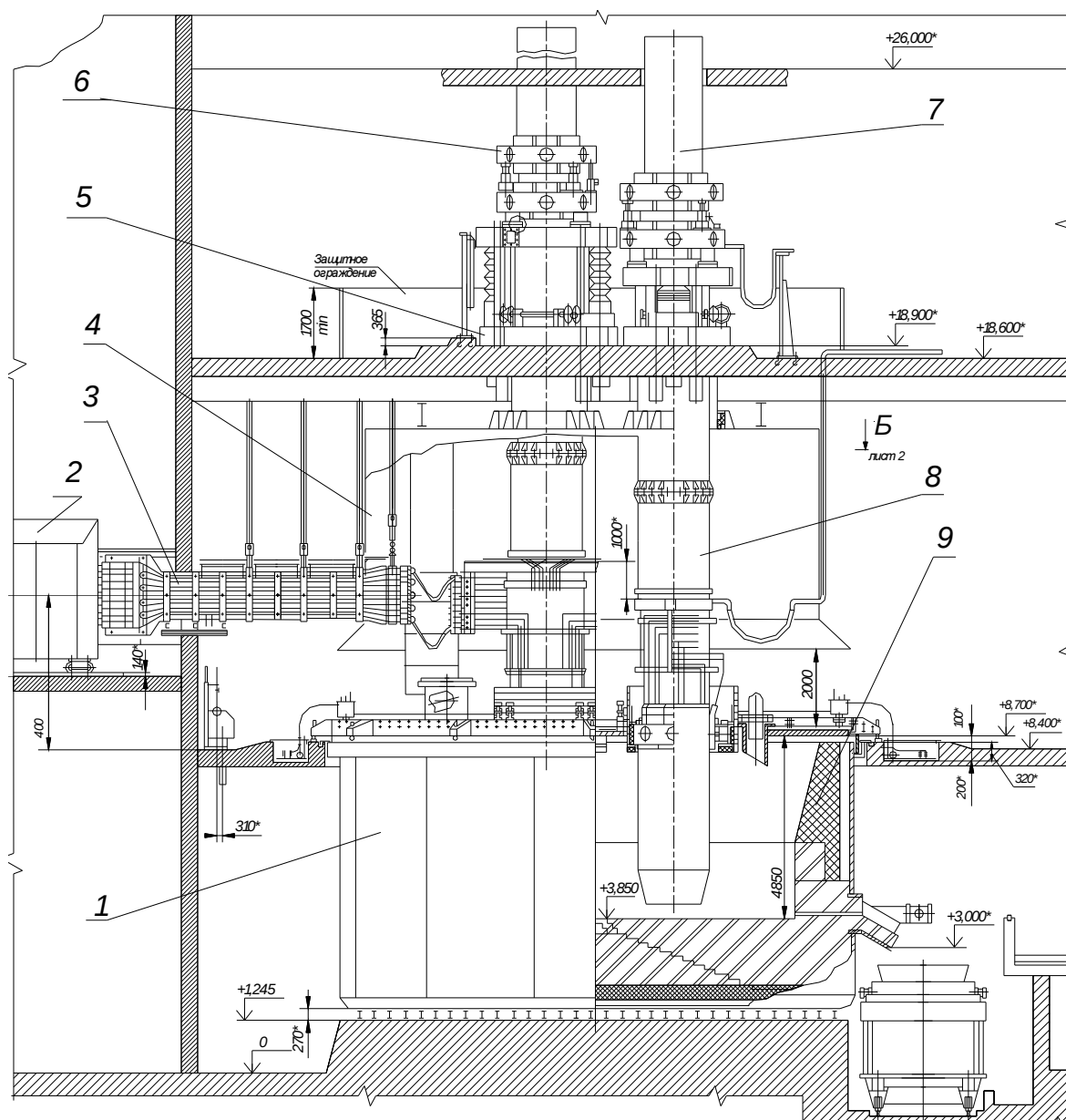


Рис. 3. Закрытая ферросплавная электропечь РКЗ-33:

1 – кожух ванны; 2 – трансформатор; 3 – короткая сеть; 4 – зонт вытяжной; 5 – гидropодъемник; 6 – устройство для перепуска электродов; 7 – электрод самоспекающийся; 8 – несущий цилиндр (мантель); 9 – футеровка

Близкими по технологии и, следовательно, по конструкции электропечей являются процессы выплавки карбида кальция, силикокальция, углеродистого ферромарганца, углеродистого феррохрома, силикомарганца, силикоалюминия, чугуна. Но каждый технологический процесс накладывает на конструкцию электропечи свои требования. Например, при выплавке углеродистого феррохрома расплав и шлак малоактивны по отношению к магнетитовой футеровке, в связи с чем огнеупорный слой выкладывается из магнезита. Выплавка силикомарганца и углеродистого ферромарганца характерна кратностью шлака к расплаву $0,7 \div 0,8$ и $1,1 \div 1,2$ соответственно, т.е. это шла-

Электроды при сливе расплава выводят на высоту, обеспечивающую наклон ванны на необходимый угол. Практика показала, что наиболее подходящий материал для футеровки этих электропечей – магнезитовый кирпич. Для увеличения стойкости футеровки и более полного проведения реакций ванну в процессе плавки вращают.

Имеются технологические процессы, позволяющие укрыть ванну электропечей сводами, преимущественно водоохлаждаемыми или комбинированными, состоящими из водоохлаждаемой центральной части и керамической периферийной. Такими процессами являются, например, процессы получения ряда плавящихся огнеупоров (муллита), процесс получения рудно-известкового расплава, применяемого для внепечного получения малоуглеродистого феррохрома. В этом случае шахты электрододержателей располагаются на наклоняющейся люльке, и электропечи отличаются от сталеплавильных в основном лишь отсутствием механизма отворота свода.

При получении некоторых продуктов электроплавки, например, карбида бора, легированных электрокорундов, ряда огнеупоров (периклаз), шихтовые материалы удается расплавить и поддерживать в жидком состоянии только в очень небольшой зоне у электродов. Выпуск расплава через леточное отверстие или через сливной носок организовать не удастся. В этом случае плавку ведут так называемым «блок-процессом», который осуществляется следующим образом. Шихта, подаваемая непрерывно или периодически, расплавляется, при подаче новой порции шихты зона расплавления поднимается, а нижние слои застывают. Так наплавляется слой за слоем блок из требуемого продукта до заполнения всей ванны электропечи. После этого электропечь останавливают, остужают, затем блок «раздевают», т.е. освобождают от непрореагировавшей шихты, расположенной по периферии.

В качестве теплоизоляции на подине в этих случаях обычно применяют огнеупорный кирпич, на стенках – шихту. В качестве шихты применяется часто пылевидный материал, во избежание большого улета пылевидной шихты ванна закрывается сводом. Для удобства разделки наплавленного блока и повышения производительности электропечи применяется сменная ванна, выкатываемая на тележке в отделение для остывания и разделки блока. Мощность таких электропечей не превышает 1500÷2000 кВА (рис. 6).

Имеется технологический процесс получения карбида кремния или карборунда, при проведении которого химические реакции идут в твердом состоянии шихты и расплавления не происходит. Электропечь для этого процесса в корне отличается от всех ранее рассмотренных рудно-термических электропечей и является фактически рудно-термической электропечью сопротивления прямого нагрева.

Эти электропечи выполняются однофазными, реакционная зона располагается горизонтально, ограничивается боковыми и подовыми чугунными щитами, внутри которых выкладывается керн из углеродистых материалов, а свободное пространство между керном и щитами заполняется шихтой, состоящей из чистого кремнезема, нефтяного кокса, старой, непрореагировавшей шихты, опилок для улучшения газонепроницаемости и поваренной соли.

ляют непрореагировавшую шихту и ее неспекшуюся часть с верхней и боковых частей блока. Оставшаяся часть блока охлаждается дополнительно, после чего отделяют карбид кремния от остального продукта. Процесс продолжается несколько суток.

3. Самоспекающиеся электроды

Рудовосстановительные электропечи работают с самоспекающимися электродами, состоящими из стального кожуха и заполняющей его на определенную высоту электродной массы. Замена электродов на формованные угольные и реже графитированные необходима при невозможности внесения в сплав железа из электродов, например, при выплавке кристаллического кремния или при необходимости большей, чем допускают самоспекающиеся электроды, концентрации электроэнергии. Необходимо учитывать, что формованные электроды значительно дороже, более дефицитны, конструкция электрододержателей при применении формованных электродов значительно сложнее, чем для самоспекающихся электродов.

В настоящее время промышленностью выпускаются формованные электроды диаметром до 1200 мм. Кроме указанных случаев, применение формованных электродов нежелательно в связи с большей стоимостью, большей суммарной массой свечи электрода, более сложными механизмами подвески и перемещения электродов, а также сложностью наращивания их на печи и обеспечении целостности сочленения.

подавляющее большинство рудно-термических печей большой мощности снабжено непрерывными самоспекающимися электродами, изобретателем которых является норвежский инженер С. В. Содерберг. Самоспекающийся электрод состоит из металлического кожуха, заполняемого электродной массой [5]. Кожух электрода представляет собой цилиндр из тонколистовой стали, оснащенный определенным количеством внутренних ребер, имеющих треугольные отогнутые насечки, либо в последнее время – круглые отверстия. Ребра служат для улучшения механического и электрического контактов между металлом кожуха и электродной массой. Цилиндр состоит из необходимого количества секций - царг, шириною обычно по 1,5÷2 м. По мере сгорания нижнего конца электрода в верхней части производится наращивание очередной секции. Толщина листа кожуха составляет 3-6 мм, высота и толщина ребер рассчитываются в зависимости от тока электрода и условий удержания электрода в перепускном устройстве.

Принимается, что допустимая плотность тока в кожухе самоспекающегося электрода не должна превышать 2 А/мм^2 .

Секции кожуха круглого самоспекающегося электрода изображены на рис. 7.

Кожух заполняется электродной массой специального состава. На каждом заводе, имеющем производство электродной массы, существует свой рецепт. Основные составляющие сухой массы: термоантрацит крупностью до

20 мм – около 50%; литейный кокс крупностью до 0,5 мм – 25÷50%; отходы электродного производства и графитированный коксик – до 25%.



Рис. 7. Секции кожуха электрода рудно-термической электропечи

Таблица 2
Физико-химические свойства спеченной электродной массы

Свойство	Величина
Удельное электросопротивление, Ом·м·10 ⁻⁵	6-8
Механическая прочность, МПа:	
на сжатие	14-22
на растяжение, не менее	1,5
Плотность, кг/м ³ :	
истинная	1900
кажущаяся, не менее	1300 1400
Пористость, %, не более	26-28
Содержание летучих веществ, %, не более	15-16
Зольность, %, не более	4

температуре 400°C начинается процесс ее спекания, который заканчивается при температуре 700÷800°C.

Чем меньше диаметр электрода при одном и том же токе и чем длиннее рабочая часть электрода, тем больше влияние Джоулева тепла. Соответственно, чем короче электрод, чем больше его диаметр и чем выше температура процесса, тем больше влияние составляющей тепла, поступающего теплопроводностью.

При правильно выбранном сечении электрода, электрическом и технологическом режимах работы печи скорость спекания электродной массы равна скорости расходования электрода, сгорающего в его нижней части. Дол-

Связующее вещество, состоящее из каменноугольного пека или пека в смеси с каменноугольной смолой, составляет 25÷27 % от сухой массы.

Спеченная электродная масса должна обладать совокупностью специальных свойств, оптимальные значения которых приведены в табл. 2. Электродная масса становится жидкой при температуре около 100°C, которая достигается на уровне 2÷2,5 м от верха контактных щёк. Уровень дробленой массы должен быть выше на 200÷500 мм.

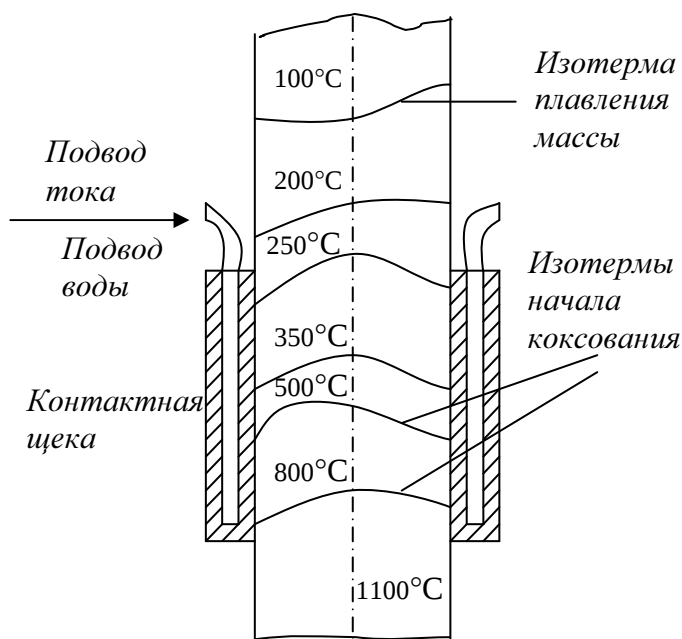
На рис. 8 показана примерная картина распределения температур в электроде [6]. От воздействия Джоулева тепла и тепла, поступающего теплопроводностью по электроду от его горячего торца, электродная масса, нагреваясь, разжижается до сметанообразного состояния (при 80÷100°C), затем, при тем-

жен быть подобран соответствующий режим перепуска электрода, т. е. удлинение его рабочей части по мере его сгорания. Нарушения в электрическом режиме (снижение мощности, остановка печи), в технологическом режиме (нарушение шихтовки, ускоренный перепуск, ухудшение состава электродной массы) приводят к нарушению режима спекания электрода.

Жидкая масса мало электро- и теплопроводна, поэтому необходимо, чтобы процесс её спекания завершился на уровне нижней трети высоты контактных щёк. При этом под действием усилия прижима контактные щёки как бы вжимаются в кожух электрода, несколько деформируя его, за счет чего обеспечивается надежный электрический и тепловой контакт. Если электрод выходит из контактных щёк не спеченным, кожух электрода перегревается, так как весь ток идёт по нему, прогорает, и жидкая электродная масса может вытечь в него, что приводит к тяжелой аварии, требующей длительной остановки печи.

Преждевременное коксование электродной массы также не желательно - при перепуске твердый электрод поступает в контактные щёки, что ухудшает электрический контакт, ведет к преждевременному выходу из строя контактных щёк.

При эксплуатации влиять на расположение высоты зоны коксования (на режим коксования электрода) затруднительно.



Изменение температуры и расхода воздуха, подаваемого для обдува электрода, а также изменение расхода охлаждающей воды в контактных щёках не дает ощутимых результатов.

Рис. 8. Распределение температуры в самоспекающемся электроде

При недококсованном электроде приходится задерживать перепуск электрода, при этом необходимо несколько снизить мощность, т.е. нарушается технологический процесс.

На расположение зоны коксования электрода можно влиять правильным выбором ширины контактных щёк, диаметров охлаждающих каналов в щёках, т. е. правильным выбором условий теплообмена между электродом и

контактной щекой, а также изменением глубины ванны, т. е. изменением влияния на процесс коксования тепла от очага выделения энергии.

Ряд узлов электродной свечи, служащих для подвода тока к электроду, его удержания, перепуска и перемещения, объединяется под названием электрододержатель (рис. 9).

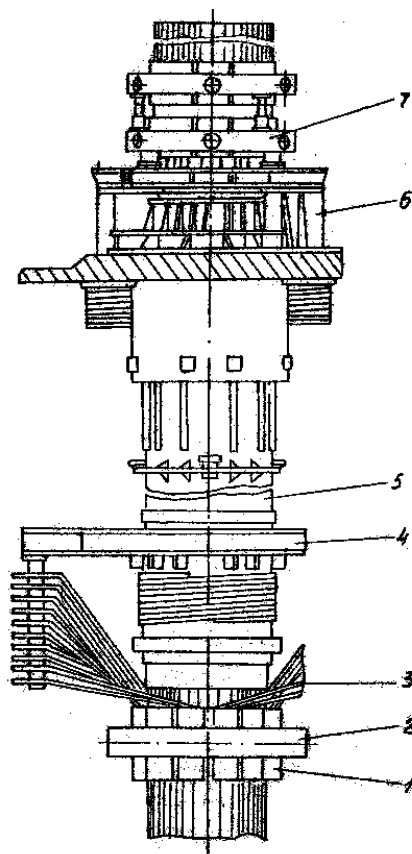


Рис. 9. Электрододержатель руднотермической электропечи: 1- контактная щека; 2- нажимное кольцо; 3- трубка токоподвода; 4- траверса токоподвода; 5- подвесной мантиль; 6- гидроподъемник; 7- устройство для перепуска электрода

Непосредственно электрический ток передается к электроду через контактные щеки. Контактная щека работает в очень сложных условиях: через нее протекает ток до 100 кА, она контактирует с электродом, разогретым до 800°C, и через неё необходимо снять излишки тепловой энергии, работа её проходит в восстановительной атмосфере, с присутствием ряда вредно действующих химических веществ, в зоне высоких температур колошника. Всем этим требованиям удовлетворяют только щеки, выполненные из меди и её сплавов.

4. Энергетические характеристики рудовосстановительных печей

Руднотермические электропечи – электротехнологический агрегат, в котором получаемая из сети электроэнергия высокого напряжения (6 – 220 кВ) передается в ванну электропечи через печной трансформатор, вторичный токоподвод и печные электроды. Кроме того, для питания всевозможных механизмов электропечи также расходуются электроэнергия и другие виды энергии: сжатый воздух, гидравлическая энергия и т. д.

Как правило, технологическая энергия составляет более 98 – 99% и при рассмотрении энергетических балансов вспомогательная энергия не учитывается.

Потери технологической электроэнергии распределяются в процентах и расходуются на нагрев соответствующих частей токоподвода следующим образом: трансформатор – 20 – 30%, короткая сеть до щёк – 40 – 35%, электрод до шихты – 40 – 35%.

Общий электрический КПД печи $\eta_3=0,80 - 0,95$ [7].

В закрытых и герметичных электропечах значительно увеличиваются электрические потери в электроде и магнитных конструкциях. В наиболее часто применяемом водоохлаждаемом своде и воронках потери тепла достигают величины 5-7%. Тепловой КПД для открытых печей $\eta_T = 0,9$, для закрытых с холодным сводом $\eta_T = 0,8-0,82$. Таким образом, общий энергетический КПД печи (с учетом физического тепла)

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{э}} \eta_T = 0,65 \div 0,85.$$

Для уточнения энергетических параметров рудовосстановительных печей большое значение имеет анализ энергетического баланса. Обычно энергетический баланс составляют одновременно с материальным балансом, поскольку при этом уточняются действительные массы потоков всех материалов, что облегчает и повышает точность данных энергетического баланса. В свою очередь для металлургов большое значение имеет материальный баланс, позволяющий уточнить расходные коэффициенты, составы исходных материалов и продуктов, процент извлечения ведущих элементов из руд и т. д. Для получения достоверных данных выбирают время устойчивой работы печи при стабильном составе шихты и минимальных отклонениях от режима нормальной эксплуатации. Исследования длятся обычно не менее месяца, при этом печь последовательно по несколько дней работает на различных ступенях вторичного напряжения с целью последующего определения оптимальной ступени. В проведении балансовых испытаний принимают участие несколько десятков исследователей.

На основании анализа балансовых плавок установлено, что электрическая мощность, вводимая в печь мощностью 21 МВА, распределяется, как показано в таблице 3.

Таблица 3

Распределение мощности в печи мощностью 21 МВА

Статья расхода	Ферросилициевая печь	Крупная фосфорная печь	Рафинировочная печь
полезная электрическая мощность	90 %	96,5 %	87 %
потери в печном трансформаторе	1,8 %	1 %	4,2 %
потери в токоподводе	8,2 %	2,5 %	5,2 %
потери в электроде			3,6 %

Большой интерес представляет рассмотрение теплового баланса, учитывающего потенциальную энергию, вводимую восстановителем и электродной массы. Для этого случая тепловой баланс на примере электропечи ОКБ – 41Г мощностью 10,5 МВА приведен в табл. 4.

Таблица 4.

Тепловой баланс открытой РТП при производстве 75% ферросилиция (мощность 10,5 МВА)

Приход тепла	Расход тепла
Электроэнергия – 47,4%	Эндотермические реакции – 46,4%
Кокс и электродная масса – 47,6%	Потери с жидким расплавом – 3,8%
Экзотермические реакции – 4,9%	Потери с жидким шлаком – 0,1%
Физическое тепло шихты – 0,1%	Испарение влаги – 0,7%
	Тепло, уносимое испарением кремния – 1,0%
	Физическое тепло колошниковых газов – 2,7%
	Тепловые потери футеровки ванны – 1,2%
	Потенциальная энергия колошниковых газов и излучение колошника – 44%
Итого: 100%	Итого: 100%

С учетом как физического тепла, вводимого в электропечь для осуществления эндотермических реакций, так и потенциальной энергии восстановителя тепловой КПД $\eta_{\text{пот}} \sim 0,5$. Для печей данного назначения он колеблется в пределах $\eta_{\text{пот}} \sim 0,5-0,7$. Отсюда следует, что необходимо использовать потенциальную энергию отходящих газов, т. е. вторичных энергоресурсов, что, в свою очередь, позволяет значительно увеличить эффективность работы электропечей. При эксплуатации закрытых и герметичных руднотермических печей эта проблема решается (частично) использованием отходящих газов для сушки шихтовых материалов и нагрева воды для бытовых целей, в открытых электропечах эта проблема решается внедрением низких зонтов – теплообменников.

В табл. 5÷7 приведены тепловые балансы печей для выплавки ферросилиция, получения фосфора и для рафинировочной печи [8].

Таблица 5

Тепловой баланс выплавки 45 %-ного ферросилиция в печи мощностью 16,5 МВА (бесшлаковый процесс)

Приход	%	Расход	%
Электроэнергия	93,92	Эндотермические реакции	75,40
Растворение кремния в железе	5,88	Сплав	14,61
Образование силикатов	0,20	Шлак	0,38
		Газы	5,29
		Тепловые потери	4,23
Итого	100	Итого	100

Интерес представляет также такой технико-экономический показатель, как удельный расход электроэнергии, основой для определения которого яв-

ляется энергетический баланс печи. Величина этого параметра существенно зависит от получаемого продукта. В таблице 8 приведены значения удельного расхода электроэнергии при получении различных ферросплавов [3].

Таблица 6

Тепловой баланс фосфорной печи мощностью 50 МВА
(многошлаковый процесс)

Приход	%	Расход	%
Электроэнергия	70,62	Эндотермические реакции	72,35
Окисление углерода	18,29	Шлак	19,32
Экзотермические реакции	10,70	Ферросплав	0,57
Физическое тепло шихты	0,39	Газы	1,94
		Тепловые потери	1,91
		Электрические потери	3,96
		Невязка	0,05
Итого	100	Итого	100

Таблица 7

Тепловой баланс рафинировочной печи мощностью 3,5 МВА
(с открытой дугой)

Приход	%	Расход	%
Электроэнергия	64,37	Сплав	11,01
Экзотермические реакции		Шлак	60,00
образования шлака	11,38	Испарение влаги	0,91
Силикотермическое восстанов-		Разложение карбоната	2,95
ление	21,32	Потери с открытого колошника	14,05
окислов хрома, железа и др.	2,19	Тепловые потери	
Окисление углерода	0,74	с элементов конструкции	9,14
Физическое тепло шихты		Невязка	1,94
Итого:	100,0	Итого:	100,0

Таблица 8

Удельный расход электроэнергии при производстве ферросплавов

Сплав	Расход электроэнергии кВт·ч/т
Ферросилиций, 18 %	2000
Ферросилиций, 45 %	4500 – 4800
Ферросилиций, 75 %	8300 – 8700
Ферросилиций, 90 %	12500
Кристаллический кремний	12000 - 12300
Углеродистый феррохром	3500
Углеродистый ферромарганец	3090

5. Анализ существующих методов расчета электрических и геометрических параметров руднотермических электропечей

Теоретических методов расчета рудно-термических электропечей, где бы строго устанавливались соотношения между номинальной мощностью, током и напряжением трансформатора, а также между электрическими и геометрическими параметрами электропечей, не существует. Это объясняется тем, что совокупность энергетических, физических, химических, гидродинамических процессов внутри ванны очень сложна, а методика экспериментальных исследований ещё не позволяет установить необходимые закономерности для создания строго обоснованной теории расчета. Поэтому формулы, применяемые для расчета основных электротехнических и геометрических параметров рудно-термических электропечей, базируются на сочетании статистических экспериментальных данных и общих физических закономерностей.

Большинство предлагаемых методик рассматривают выбор тока и напряжения при заданной мощности трансформатора и выбор основных геометрических размеров при известных токе и напряжении.

Учитывая вышеизложенное, легко объяснить, что нет общепризнанных методов расчета рудно-термических электропечей. Создание такого метода – одна из актуальных задач электротермии.

Достаточно подробный обзор работ по методам расчета рудно-термических электропечей приводит Я.Б. Данцис [9].

Особо необходимо остановиться на методике, разработанной на базе работ Микулинского, который основывался на принципах электрического и геометрического подобия рудно-термических электропечей. Расчет параметров рудно-термических электропечей у нас в стране ведется по этой методике. В своих работах Микулинский [10] исходил из практики, что все изменения основных параметров электропечей являются, в конечном счете, следствием изменения электрического поля в печи и, следовательно, для установления зависимости параметров от мощности целесообразно воспользоваться условиями подобия электрических полей.

Критерий подобия можно получить из выражения закона Ома в дифференциальной форме:

$$\delta = -\frac{1}{\rho} \text{grad} U, \quad (8)$$

где δ - плотность тока в электроде; U - напряжение между подиной и электродом, т. е. полезное напряжение; ρ - удельное сопротивление тигля.

Очевидно, что $\delta = \frac{I}{D_9^2}$, а правая часть выражения пропорциональна $\frac{U_{\text{пол}}}{\rho \cdot D_9}$.

Отношение левой части к правой называют «критерием подобия электрического поля».

$$\frac{U_{\text{пол}} \cdot D_{\text{э}}}{\rho \cdot I} = \varepsilon n. \quad (9)$$

Диаметр электрода и мощность печи описывают выражениями:

$$D_{\text{э}} = \sqrt{\frac{4 \cdot I}{\pi \cdot \delta}}; P = \sqrt{3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}.$$

Путем соответствующих преобразований получаем

$$U = \frac{(\varepsilon n)^{2/3} \cdot \rho^{2/3} \cdot \delta^{1/3} \cdot P^{1/3}}{\eta^{2/3} \cdot \cos \varphi}, \quad (10)$$

где U - напряжение на выводах трансформатора, В; η - электрический КПД печи.

Этой формулой можно пользоваться для расчета параметров «подобных» электропечей, т. е. электропечей, выплавляющих тот же самый сплав по принятой технологии и с аналогичным обслуживанием, аналогичной подготовкой и химическим, физическим, гранулометрическим составом сырьевых материалов, как и электропечи, принятой в качестве аналога. Печь-аналог обычно называется «образцовой» печью. В этом случае ρ и δ будут теми же самыми для «подобной» (рассчитываемой) печи и для «образцовой» печи и, следовательно, будет справедливо утверждение, что $\varepsilon n = \text{const}$. При расчетах необходимо также учесть следующее: если «образцовая» электропечь однофазная, а «подобная» электропечь трехфазная, то необходимо учесть ответвление тока через шихтовую проводимость между электродами, учитываемую коэффициентом « M ». В этом случае вместо тока I следует ввести $M I$, а формула будет иметь вид

$$U = \frac{(\varepsilon n)^{2/3} \cdot \rho^{2/3} \cdot \delta^{1/3} \cdot P^{1/3}}{M_2^{2/3} \cdot \eta^{2/3} \cdot \cos \varphi}, \quad (11)$$

где

$$M_2 = \frac{2}{3^{0,5} \cdot \pi^{0,5} \cdot M}.$$

При выполнении расчетов по указанным формулам необходимо вычислить критерий подобия образцовой печи и задаться величинами $\cos \varphi$ и η рассчитываемой печи, которые, в свою очередь, зависят от тока и напряжения рассчитываемой печи. Учитывая это, было показано, что правильнее оперировать полезным напряжением $U_{\text{пол}}$, и тогда

$$U_{\text{пол}} = \sqrt[3]{(\varepsilon n)^2 \cdot \rho^2 \cdot \delta \cdot P_{\text{пол}}^{0,33}}, \quad (12)$$

где $P_{\text{пол}}$ - полезная мощность на электроде;
или в общей форме

$$U_{\text{пол}} = c \cdot P_{\text{пол}}^n, \quad (13)$$

где $c = \sqrt[3]{(\varepsilon n)^2 \cdot \rho^2 \cdot \delta}$; $n=0,33$.

Легко показать, что формулы Келли, Моркрамера и Гро-Стази тоже могут быть выражены подобным образом. При этом формулы Келли и Моркрамера могут быть выражены как

$$U_{\text{пол}} = 0,634 \sqrt{\rho_{\text{т}}^2 \cdot h_{\text{уд}}} \cdot P_{\text{пол}}^{0,25},$$

а формула Гро-Стази как

$$U_{\text{пол}} = 0,118 \sqrt{P_{\text{уд}}} \cdot P_{\text{пол}}^{0,33} /$$

Учитывая, что и в формуле, предложенной Микулинским $n=0,33$, можно сделать вывод, что если критерием подобия является постоянство объемной удельной мощности в реакционном тигле, то степень $n=0,33$; в случае же, если критерием подобия является постоянство удельной мощности, приходящейся на единицу поверхности реакционной зоны, то показатель $n=0,25$.

Ряд авторов принимает для практических расчетов для малошлаковых печей $n=0,33$, для многошлаковых – $n=0,25$. По данным, приводимым Данцисом, показатель $n=0,33$ для ферросилиция, силикомарганца, ферросиликохрома, силикокальция, фосфора, карбида кальция; $n=0,25$ для силикоалюминия, углеродистого феррохрома; $n=0,28$ для углеродистого ферромарганца. То есть показатель « n » тем ниже, чем ниже удельное сопротивление шихтовых материалов.

Г.С. Нус провел большие исследования по выбору параметров многошлаковых, в первую очередь, штейновых и им подобных печей. В предлагаемых им методиках расчета учитываются условия работы футеровки, теплопередача от шлака и расплава к футеровке и т. д. Он считает также, что при определении величины показателя « n » необходимо учитывать и свободную конвекцию шлакового расплава в вязкостно-гравитационном режиме и предлагает считать этот показатель для штейновых печей $n=0,375$.

К сожалению, до настоящего времени нет достоверных методов исследования путей тока в ванне печи, в связи с чем оценить величину n можно только сопоставлением экспериментальных зависимостей полезного напряжения от полной мощности с расчетной величиной, меняя величину n . В то же время Данцис приводит результаты расчетов для карбидных печей, показывая, что при изменении c на $\pm 10\%$ фазное напряжение трансформатора $U_{\text{ф}}$ меняется на $\pm (5-6)\%$ при изменении реактивного сопротивления x на 10% фазное напряжение $U_{\text{ф}}$ меняется на $\pm 2\%$, изменение активного сопротивления r практически не влияет на величину фазного напряжения, при изменении величины n в пределах $0,25-0,33$ данное напряжение меняется в пределах $\pm 3\%$. Объясняется это незначительным влиянием показателя n на фазное напряжение следующим образом: изменение показателя n связано с токораспределением внутри ванны печи и, следовательно, с величиной реактивного сопротивления ванны печи. А так как реактивное сопротивление ванны печи составляет малую часть реактивного сопротивления печной установки, то

последнее изменяется незначительно в зависимости от принятого пути тока, следовательно, незначительно изменяется и величина фазного напряжения U_{ϕ} .

На основе статистических данных по реальным отклонениям величин c , x , r при работе электропечей Я.Б. Данцис математически показывает возможность отклонения реального оптимального рабочего напряжения в пределах $\pm 10\%$, на основании чего предлагает устанавливать диапазон постоянной мощности в пределах $0,9-1,1 U_{\phi}$ расчетного. Учитывая, что есть еще какой-то коэффициент незнания отличий в работе рассчитываемой печи от «образцовой», следует этот диапазон расширить и установить в пределах $(0,8-0,85)-(1,15-1,2) U_{\phi}$ расчетного.

Важным условием подобия электропечей является подобие геометрических размеров электропечей, чему часто не уделяется достаточного влияния на практике. Под геометрическим подобием в данном случае подразумевается подобное соотношение в геометрических размерах электропечи; диаметре электрода, распадае электродов, высоте ванны, расстоянии между стенкой ванны и электродом. Геометрически подобными могут быть не только, например, круглые трехэлектродные «образцовая» и проектируемая прямоугольная шестиэлектродная печи.

Ясно, что только в случае геометрического подобия будет выдержано подобие технологических процессов и электрических полей. Путем математических выкладок можно получить формулы подобия для диаметра электрода

$$d_{\text{э}} = c_1 \cdot I_{\text{р}}^{\frac{1-2n}{1-n}}, \quad (14)$$

где $d_{\text{э}}$ - диаметр электрода, мм;

c_1 - коэффициент подобия электродов, $\text{мм/кА}^{1-2n/1-n}$;

I - расчетный ток электрода, кА.

Таким образом, при коэффициенте $n=0,33$

$$d_{\text{э}} = c_1 \sqrt{I_{\text{р}}}, \quad (15)$$

при коэффициенте $n=0,25$

$$d_{\text{э}} = c_1 \sqrt[3]{I_{\text{р}}^2}. \quad (16)$$

При промежуточных значениях коэффициента n необходимо пользоваться формулой (14).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Производство стали и ферросплавов в мире // Л.И. Леонтьев, Л.А. Смирнов, В.И. Жучков, В.Я. Дашевский // Электromеталлургия, 2008. - №2. - С. 2 - 9.
2. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей: справ.изд./ Я.Б. Данцис, Л.С. Кацевич, Г.М. Жилов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия. – 1987. – 320 с.
3. Рысс М.А. Производство ферросплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 344 с.
4. Курапин И.Н., Курапина М.Н. Рудно-термические электропечи / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 1994. – 173 с.
5. Гасик М.И. Самообжигающиеся электроды рудовосстановительных печей. – М.:Металлургия, 1976. – 368с.
6. Киселев А.М. Исследование самообжигающихся электродов в конструкциях мощных рудовосстановительных электропечей и обеспечение их повышенной эксплуатационной стойкости. Автореф....дис.канд.техн.наук. – М.: ВНИИЭТО, 1975.
7. Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры / под ред. А.Е. Никольского. – М.: Энергия, 1964. – 87с.
8. А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др.; Под ред. А.Д. Свенчанского: “Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева”, Учебник для вузов /– 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
9. Данцис Я.Б. Методы электротехнических расчетов мощных электропечей. – Л.:Энергоиздат, 1982. – 230 с.
10. Микулинский А.С. Определение параметров рудно-термических электропечей на основе теории подобия. – М.: Энергия, 1964. – 87с.