

Р. А. ЧУГУРЯН

## ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В ВАННЕ КАРБИДНОЙ ПЕЧИ

Закономерности прохождения тока в плавильном пространстве, а следовательно и превращения электрической энергии в тепловую в ванне карбидной печи, до настоящего времени являются предметом обсуждений. Существует мнение [1, 2], что необходимое тепло для образования карбида кальция выделяется в дуге, и при классификации руднотермических печей карбидную печь причисляют к печам, работающим в дуговом режиме; при этом предполагается, что энергия, выделяющаяся в дуге, намного больше энергии, выделяющейся в расплаве. Другие [3, 4, 5] полагают, что энергия дуги примерно равна энергии, выделяющейся в шихте. Наконец, существует предположение, что карбидные печи работают в чистом режиме печи сопротивления и что в ней электрическая энергия превращается в тепловую в шихте и расплаве, и энергия дуги по сравнению с энергией шихты ничтожна [6, 7].

Выяснение способа превращения электрической энергии в тепловую в ванне карбидной печи практически важно, так как с этим связана правильная эксплуатация карбидной печи — ее обслуживание, управление, автоматика. Ниже дается оценка характера сопротивления исследованных нами карбидных печей. Анализ и выводы по затронутому вопросу основаны на ряде опытов, проведенных в карбидном цехе завода им. С. М. Кирова.

Описанные здесь эксперименты являются частью комплекса экспериментальных исследований, проведенных Институтом электротехники Академии Наук Армянской ССР по программе, предложенной доктором технических наук, профессором Г. Т. Адонцом.

### 1. Напряжение между нулевой точкой пода и электродом

Для определения характера сопротивления ванны печи нами проводилось осциллографирование напряжения между нулевой точкой пода и фазовым электродом. При этом точка замера на электроде бралась на 20 см ниже электродного кольца.

При нормальной эксплуатации печи электродное кольцо расположено на расстоянии 120—130 см от нижнего конца электрода. Следовательно, часть электрода, расположенная ниже точки замера, составляет примерно 100 см. На этом участке, согласно литературным данным [5], актив-

ное сопротивление рабочей части электрода составляет около 23% от общего сопротивления короткой сети. Как показали измерения, падение напряжения в короткой сети фаз «А» и «В» без электродов составляет 3,6 в. Индуктивное сопротивление короткой сети больше активного в шесть раз. Учитывая также, что сопротивление электрода в три раза меньше, чем

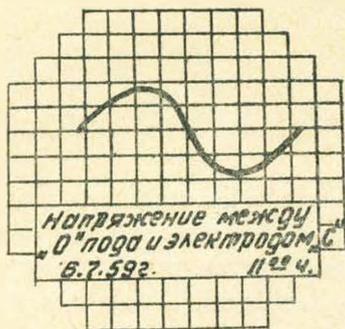


Рис. 1.

активное сопротивление остальной части короткой сети, падение напряжения на рабочем участке электродов фаз «А» и «В» составит 0,2–0,3 в, что не может существенным образом влиять на характер кривой напряжения, и, следовательно, она остается синусоидальной. Падение напряжения в короткой сети на фазе «С» сравнительно больше, вследствие чего кривая напряжения между подом и электродом искажается, ибо ток не синусоидален (рис. 1). Что касается ин-

дуктивного сопротивления рабочего участка электрода, то им можно пренебречь. Расчетным путем можно показать [8], что индуктивность на этом участке не выше  $1,2 \cdot 10^{-7}$  гн.

Как показали замеры, напряжение между электродом и подом печи для фаз «А» и «В» составляет 84–85 в, а для фазы «С» — 63–64 в. Напряжение под-электрод на фазе «С» ниже из-за глубокой посадки электрода.

## 2. Вольт-амперная характеристика печной нагрузки

Ниже приводятся вольт-амперные характеристики для каждой фазы исследуемой нами печи. Эти характеристики построены с учетом отсутствия сдвига фаз между током и напряжением под-электрод.

На рис. 2 представлены кривые напряжения под-электрод и ток фазы «А», а также кривая изменения сопротивления в течение одного полупериода, при нормальном режиме работы печи. Как видно из диаграммы, точки максимума тока и напряжения и минимум сопротивления совпадают по времени. На этом же рисунке дана вольт-амперная характеристика фазы «А», имеющая две точки пересечения. Стрелками показаны восходящие и нисходящие ветви этой характеристики.

Приведенная вольт-амперная характеристика является общей характеристикой дуги и шунта (шихты). Поэтому физическая интерпретация каждой точки этой кривой представляет значительную трудность. Однако по площади гистерезисной петли можно дать качественный анализ режима дуги, так как даже при нелинейности вольт-амперной характеристики шихты гистерезис не должен иметь место, поскольку сопротивление шихты в течение четверти периода не может существенно изменяться с изменением температуры, тогда как небольшое изменение температуры резко влияет на процессы в дуговом разряде [9], т. е. на сопротивление дуги.

Из изложенного следует, что величина площади петли характеризует те энергетические процессы, которые имеют место в дуге; нелинейность вольт-амперной характеристики шихты, изменяя форму кривой гистерезиса, не может влиять на величину площади. Площадь петли может служить критерием, характеризующим работу данной фазы печи. На рис. 3 приведены аналогичные кривые для фазы «В». Как видно из кривых, мак-

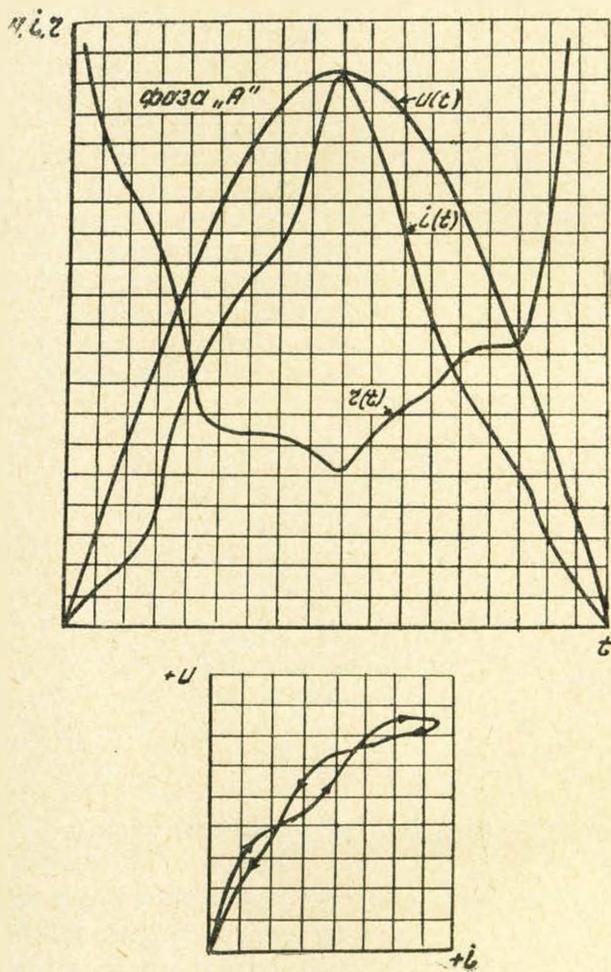


Рис. 2.

симумы тока и напряжения и минимум сопротивления ее совпадают во времени.

Сопротивление подэлектродного пространства фазы «В» в течение одного полупериода претерпевает сравнительно меньшие изменения. Вольт-амперная характеристика этой фазы также имеет гистерезисную петлю, восходящие и нисходящие ветви которой не пересекаются.

На рис. 4 представлены аналогичные кривые для фазы «С». Восходящие и нисходящие ветви вольт-амперной характеристики этой фазы пересекаются только один раз.

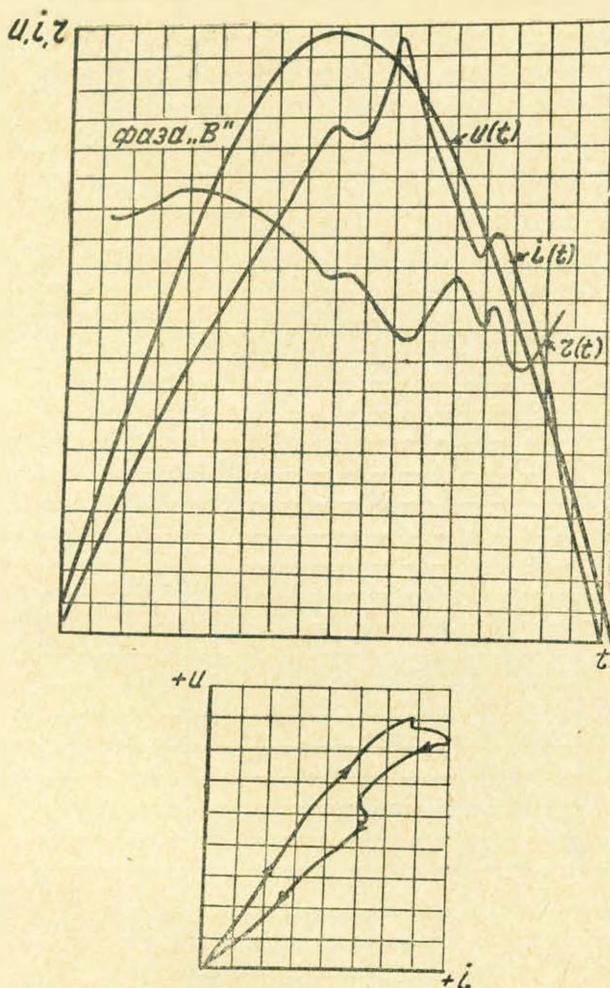


Рис 3.

### 3. Анализ экспериментальных данных

Анализируя осциллограммы токов, напряжений и вольтамперные характеристики, можно установить следующее положение. Включение под синусоидальное напряжение печной нагрузки вызывает резкое отступление формы кривой тока от синусоиды. Это говорит о наличии в цепи нелинейного элемента. Полагая, что вся короткая сеть обладает линейным подэлектродного пространства. Как указано выше, напряжение между под электродного пространства. Как указано выше, напряжение между нулевой точкой пода и электродом в исследуемой нами печи можно считать синусоидальным. Правда, эта кривая на фазе «С» — «Мертвая» — имеет некоторое отступление от синусоиды.

Синусоидальная форма кривой напряжения между подом и электродом некоторым образом затрудняет определенный вывод о наличии в печи явно выраженной дуги. Однако по кривым тока можно видеть, что для данной фазы исследуемой печи в определенные периоды работы, обций.

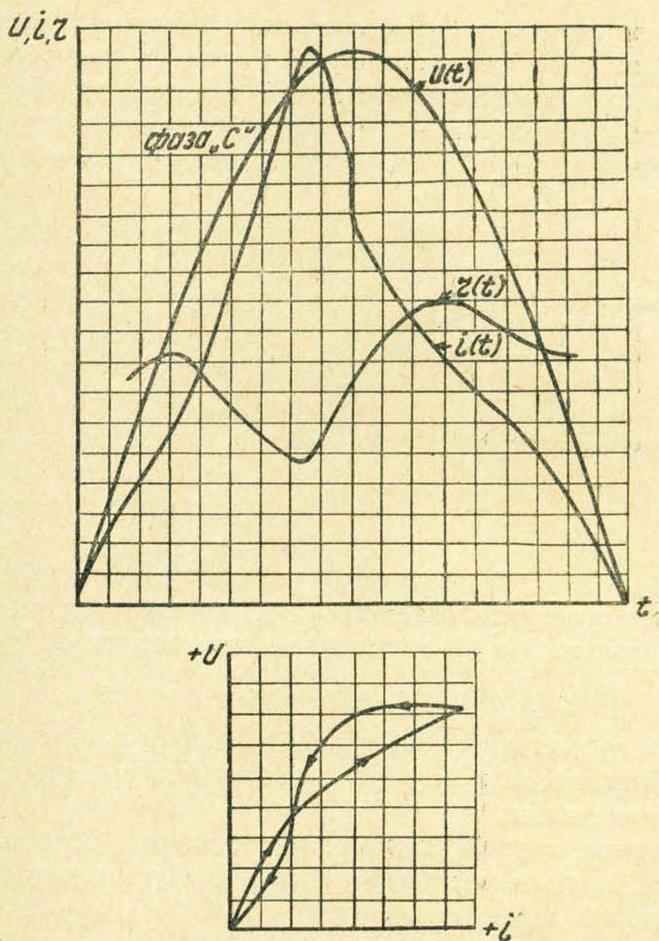


Рис. 4.

характер деформации кривой тока периодически повторяется. Это дает основание предположить, что в ванне печи имеют место периодические электрические процессы. К тому же вольт-амперная характеристика общего сопротивления фазы имеет форму гистерезисной петли, что присуще дуге. О наличии дуги говорит также характерное для нее искажение кривой тока. Но искажение здесь несколько смягчено шунтирующим влиянием шихты. О наличии шунтированной дуги в ферросплавных печах было доказано проф. С. И. Тельным, Г. А. Сисояном и И. Т. Жердевым [4]. Мысль о наличии шунтированной дуги в карбидных печах высказана профессором Г. А. Сисояном [5]. Из работ указанных авторов следует важное положение, что форма кривой тока в момент зажигания и гасания дуги не должна иметь резкий характерный разрыв, так как через шихту непрерывно проходит ток.

Чем вызван синусоидальный характер напряжения между подом и электродом печи в наших экспериментах?

Для математического обоснования составим электрическую схему замещения карбидной печи. Решение этой задачи для трехфазной несим-

метричной печи связано со значительными трудностями. Оно намного облегчается, если пренебречь асимметрией токов. Это упрощение не внесет значительных погрешностей в расчеты, ибо степень асимметрии на исследуемых печах не превышает 8—10%. При указанном допущении становится возможным рассмотрение одной фазы печи. Электрическая схема ее приведена на рис. 5.

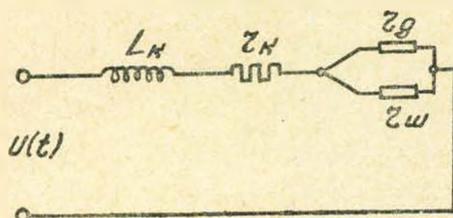


Рис. 5.

Анализ этой схемы приводит к следующим выводам:

1. При условии наличия источника бесконечной мощности и при отсутствии кажущегося сопротивления  $Z_k$  короткой сети напряжение на дуге должно быть синусоидальным несмотря на потребление приемником несинусоидального тока.
2. При отсутствии индуктивности  $L_k$  короткой сети и наличии  $r_k$ , соизмеримого с сопротивлением печи, напряжение на дуге должно быть несинусоидальным. Это объясняется тем, что напряжение на дуге

$$u_g = u_c - ir_k.$$

3. При отсутствии параметра  $L_k$  и наличии  $r_k$  короткой сети значительно меньшего, чем сопротивление печи, напряжение дуги мало отличается от синусоиды.

Рассмотрим случай, когда имеется также индуктивность короткой сети. При анализе дифференциального уравнения, составленного для приведенной схемы замещения

$$U_m \sin \omega t = ir_k + L_k \frac{di}{dt} + i \frac{r_m \cdot r_g(i)}{r_m + r_g(i)}$$

можно заметить, что параметр  $L_k$  влияет на форму кривой тока, деформируя ее симметричность в полупериоде относительно оси ординат. Как ток шихты, так и индуктивность стремятся сгладить изломы кривой тока в начале и конце полупериода, т. е. при прохождении тока через нулевые значения, уменьшая при этом быстроту изменения силы тока. Ясно, что при прямолинейной вольт-амперной характеристике дугового промежутка, ток печи и напряжение дуги синусоидальны; если же вольт-амперная характеристика дугового промежутка не прямолинейна и короткая сеть обладает достаточным сопротивлением, то ток и напряжение на дуге несинусоидальны. При относительно малом сопротивлении короткой сети напряжение на дуге, даже при нелинейной вольт-амперной характеристике, может быть синусоидальным.

При сравнении формы кривой тока фазы «В» при нормальной работе и при сливе печи можно заметить, что ток этой фазы при сливе претерпевает большие искажения. Это сказывается и на вольт-амперной характеристике. Наблюдаемое явление еще раз подтверждает высказанную

мысль [5], что при благоприятных тепловых условиях дуга не может резко влиять на форму кривой тока. Таким образом, резкое нарушение формы кривой тока фазы «В» во время слива печи целиком объясняется нарушением теплового режима дугового разряда. Этому может содействовать, в частности, изменение плотности и давления газов подэлектродного про-

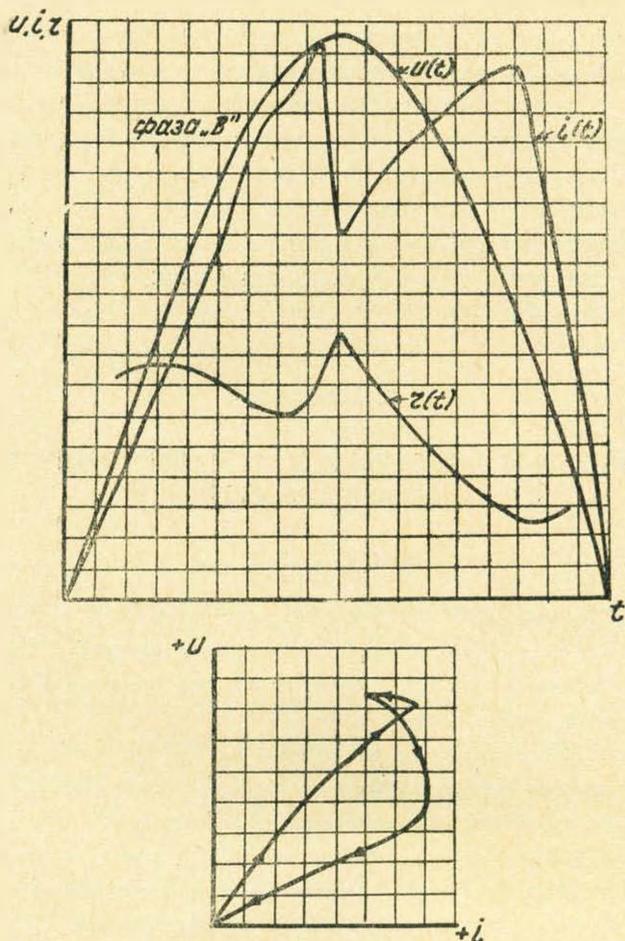


Рис. 6.

странства, а также другие явления, связанные с понижением температуры печи. На рис. 6 дана вольт-амперная характеристика фазы «В» при сливе. При каждом сливе вольт-амперная характеристика имела одну и ту же форму гистерезисной петли. Это нарушение формы кривой тока относительно мало заметно на остальных фазах, так как слив на исследуемой печи производился из-под средней фазы.

**Выводы.** 1. Вольт-амперные характеристики для общего рабочего сопротивления исследуемых нами карбидных печей имеют гистерезисную петлю, что полностью следует приписать дуге.

2. Вольт-амперные характеристики, являющиеся суммарной характеристикой дуги и шунта (шихты), для отдельных фаз печи различны, так

как сопротивление каждой фазы в течение периода изменяется по разным законам.

3. Резкое изменение вольт-амперной характеристики фазы «В» при сливе следует приписать быстрым изменениям теплового режима дугового промежутка (изменение температуры, плотности и давления газов и т. п.).

4. Для контроля за нормальным горением дуги может быть рекомендовано держать на пульте управления на каждой фазе печи катодный осциллограф, включенный по схеме петли (для фигур Лиссажу), или же с переключающим устройством — один для всей печи. Напряжение для вертикальных пластинок осциллографа надо брать с участка короткой сети, а для горизонтальных — от пода и электрода.

Схема эта может быть использована в качестве дополнительного контролирующего элемента при регулировании печи.

Институт электротехники  
АН Армянской ССР

Поступило 2.II. 1961

Ռ. Ա. ՇՈՒՂՈՒՐՅԱՆ

ԿԱՐԳԻԿ ՎԱՌԱՐԱՆՆԵՐՈՒՄ ՏԵՂԻ ՈՒՆԵՑՈՂ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ  
ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ա. մ փ ո փ ու լ մ

Հոդվածում բննարկվում են կարրիդի վառարանների աշխատանքի էլեկտրական ռեժիմների մի շարք հարցեր: Ստացված արդյունքները և եզրակացությունները հիմնված են Ս. Մ. Կիրովի անվան գործարանում կատարված հետազոտական աշխատանքների վրա:

Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ նշված վառարանները աշխատում են էլեկտրական աղեղի ռեժիմի առկայությունը պայմաններում: Այդ հաստատվում է ստացված վոլտ-ամպերային բնութագրերով: Չնայած նրան, որ վոլտ-ամպերային բնութագիրը հանդիսանում է բովանդակառարկի և աղեղի համար դումարային բնութագիր, այնուամենայնիվ բնութագրի հիստերեզիսի օղակի լրիվ հաստատում է աղեղի ռեժիմի առկայությունը: Դեռ ավելին. այդ օղակի փոփոխման և վառարանի աշխատանքային ռեժիմի միջև կոյություն ունի օրինաչափություն: Առաջարկվում է այդ օրինաչափությունը հաշվի առնել վառարանների կարգավորման հարցերը լուծելիս, որպես լրացուցիչ տեղեկություն վառարանի աշխատանքի մասին:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Максименко М. С. Основы электрохимии. ОНТИ, 1934.
2. Бингам. И. Производство карбида кальция, ОНТИ, 1934.
3. Вочке Н. Электроплавильные печи, 1934.
4. Тельный С. И. и Жердев И. Т. „Теория и практика металлургии“, № 9, 1937.
5. Сисоян Г. А. Электрическая дуга в руднотермической печи, 1954.
6. Kluss E. Die Probleme des elektrischen Lichtbogen und Widerstandsofens. 1951.
7. Paussig R. Die Industrie des Kalzium Karbides, 1940.
8. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей, 1959.
9. Канцов Н. А. Электрические явления в газах и в вакууме, 1950.