

А. Ф. МЕЛИК-АХНАЗАРОВ, К. М. ТАТЕВОСЯН

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ ЭЛЕКТРОСТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

При расчете электрической части электрических стекловаренных печей основной трудностью является определение электрического сопротивления. Величина эта зависит от многих факторов, как-то: геометрических параметров печи, количества, формы и взаимного расположения электродов, а также температуры и состава стекломассы.

Существующие формулы, для определения электрического сопротивления стекломассы между двумя электродами в печи, дают приближенные значения его, иногда отличающиеся от действительного в 1,5—2 раза. Так, для двух стержневых цилиндрических электродов теорией электростатического поля дается формула [1]

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{d}{r}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление;  
 $l$  — длина стержня;  
 $d$  — расстояние между электродами;  
 $r$  — радиус электрода.

Однако формула в таком виде неприменима, так как не учитывает влияние ограждающих поверхностей.

Более правильно будет формулу выразить в виде:

$$R = n_1 \cdot n_2 \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{d}{r}, \quad (1')$$

где  $n_1$  — коэффициент температурной неоднородности стекломассы. По данным Н. И. Шелудякова  $n_1 = 1,05-1,1$  [2];

$n_2$  — коэффициент, учитывающий влияние всех ограждающих поверхностей.

И. П. Борелем [3] рекомендуется другая формула [2], учитывающая влияние пода и зеркала стекломассы:

$$R = \frac{\rho \left\{ \ln \frac{d-r}{r} + \frac{1}{2} \ln \left[ 1 + \left( \frac{d}{2(h-r-S)} \right)^2 \right] \right\}}{l \left[ \operatorname{arctg} \frac{2(2h-r-S)}{d} + \operatorname{arctg} \frac{2(S+r)}{d} \right]}. \quad (2)$$

Сопротивления по формуле (2) определяются более точно, но все же превышают действительные значения на 20—30%.

Указанные формулы применимы лишь для определения сопротивления между двумя электродами, расположенными в ванне прямоугольного сечения простой конфигурации и при отсутствии влияния

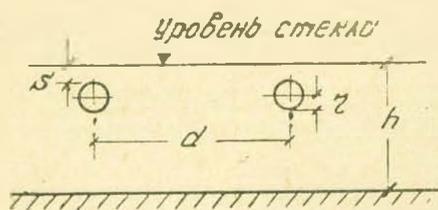


Рис. 1.

других пар электродов. При сложной же конфигурации печи и при наличии совместно действующих нескольких пар электродов определение сопротивления по этим формулам практически невозможно.

Как показали исследования, проведенные в лаборатории стекла НИИ химии СНХ Армянской ССР,

при проектировании и испытании полупромышленных печей электроварки стекла, сопротивление между электродами наиболее точно определяется в электролитической модели. О применении моделирования для определения сопротивления в печи имеется указание у Э. Бореля [4].

Основой для моделирования электрического поля является геометрическое и физическое подобия систем [5]. При определении сопротивлений стекломассы в печи на основе модели необходимо иметь полное геометрическое подобие в отношении линейных размеров печи и электролитической ванны и подобие удельных сопротивлений стекла и электролита. Для прямоугольной ванны размерами  $l_1 \times b_1 \times h_1$  и модели размерами  $l_2 \times b_2 \times h_2$ , коэффициент геометрического подобия  $m_1 = \frac{l_1}{l_2} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{h_1}{h_2}$ , а отношение удельных сопротивлений стек-

ломассы и электролита  $m_2 = \frac{\rho_1}{\rho_2}$ . Постоянная электролитической мо-

дели и постоянная печи находятся в отношении  $\frac{C_1}{C_2} = \frac{1}{m_1}$ , сопротив-

ления — в отношении  $K = \frac{m_2}{m_1}$ .

При наличии нескольких электродов необходимо также подобие напряжения между электродами в печи и в электролитической ванне

$$m = \frac{E_1'}{E_2'} = \frac{E_1''}{E_2''} = \frac{E_1'''}{E_2'''} - \dots$$

Величина „постоянной“ между электродами в этом случае отражает также взаимное влияние электродов. Метод моделирования был применен для определения сопротивления стекломассы между электродами в опытной печи № 5 для варки боросиликатного стекла. Печь была сооружена по принципу глубинного освещения с вертикальным движением стекломассы. Электроды — стержневые, молибденовые, диаметром 16 мм. Схема печи и расположения электродов приведены на рис. 2.

Для производства измерений сопротивлений была изготовлена ванна, пропорционально соответствующая формам и размерам проектируемой печи с коэффициентом геометрического подобия, равным 4. Ванна была вылита из парафина в деревянном кожухе. Electroдами

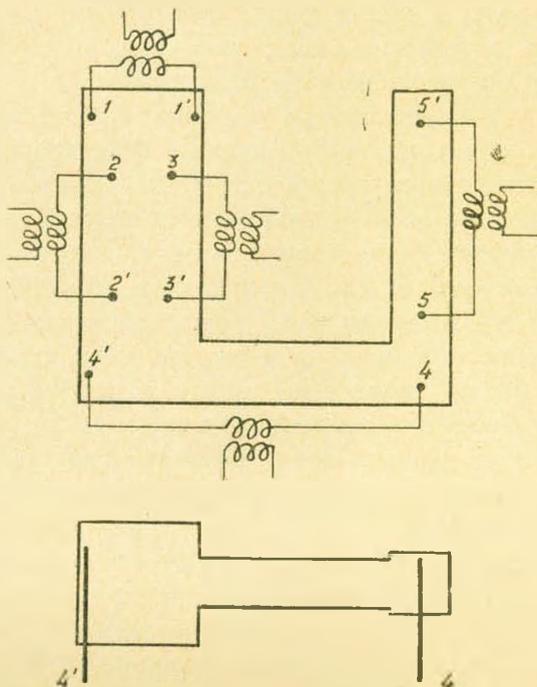


Рис. 2.

служили медные цилиндрические стержни, расположенные аналогично электродам в проектируемой печи. В качестве электролита бралась вода, исходя из того, что она обладает большим удельным сопротивлением. При этом добавочное сопротивление, вызываемое сопротивлением поляризации, составляет ничтожную долю от сопротивления между электродами в модели, и практически им можно пренебречь, а прохождение малых токов через электролит не влияет на его температуру в процессе производства измерений, что устраняет необходимость специального термостатирования модели. Опыты проводились при комнатной температуре — 18°C.

Удельное сопротивление воды определялось в ячейке, электродами для которой служили два concentрических полых цилиндра из медной фольги с отношением диаметров  $d_{в} : d_{н} = 1/2$  [6], вложенные один в другой. Последние вставлялись в стакан, дно которого было покрыто слоем парафина (рис. 3).

Удельное сопротивление воды вычислялось по формуле:

4. Изв. ТН, № 5

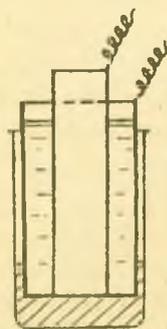


Рис. 3.

$$\rho = R_x \frac{2\pi h}{\ln \frac{d_n}{d_v}} \quad (3)$$

где  $R_x$  — сопротивление воды в ячейке в омах;

$h$  — высота воды в ячейке в см;

$d_n$  — диаметр наружного электрода в см;

$d_v$  — диаметр внутреннего электрода в см.

Измерения  $R_x^*$  производились как мостом Витстона, при частоте 5000 герц, где источником энергии являлся генератор звуковой частоты и нуль инструментом служил электронный осциллограф, так и при 50 герц — применением электростатического вольтметра и астатического миллиамперметра. Измерения показали, что при  $T^0 = 18^\circ \text{C}$ .  $R_x$  при 5000 герц равняется 68 ом, а при 50 герц  $R_x = 67,5$  ом.

Измерение сопротивления воды между электродами в модели\*\* для каждой пары электродов в отдельности (при остальных отключенных) производилось также при частоте 50 и 5000 герц.

Результаты измерений приведены в табл. 1.

Из приведенных данных сопротивлений при различных частотах следует, что влияние поляризации на их величины как в ячейке, так и в модели незначительное.

Измерение сопротивления в модели между электродами при их совместной работе производилось лишь при низкой частоте—50 герц (табл. 2).

Таблица 1

Пары электродов	Ч а с т о т а			
	50 герц			5000 герц
	V	I	R	
1—1'	22	0,0303	824	820
2—2'	25	0,0315	794	790
3—3'	25	0,0310	807	805
4—4'	75	0,0125	6000	6000
5—5'	50	0,0140	3570	3550

Таблица 2

Пары электродов	V	I	R
2—2'	25	0,024	1040
3—3'	25	0,022	1140
4—4'	70	0,0125	6000
5—5'	50	0,0139	3600

„Постоянные“ между электродами в печи, определенные на модели, приведены в табл. 3.

Незначительное отличие „постоянных“ электродов 2—2' и 3—3', расположенных симметрично относительно ограждений и определенных при отключении всех пар электродов, кроме данной, объясняется неточностью их установки.

\* Во избежание получения искаженных результатов до производства измерений необходимо очистить от  $\text{CuO}$  медные электроды как ячейки, так и модели слабым раствором соляной кислоты.

\*\* Электрическая схема модели соответствовала схеме печи, т. е. каждая пара электродов питалась отдельно от своего трансформатора (рис. 2).

Таблица 3

Пары электродов	Данные пары при остальных отключенных электродах			При совместной работе всех электродов		
	сопротивление между электродами	постоянные между электродами в модели	постоянные, приведенные к параметрам печи	сопротивление между электродами	постоянные между электродами в модели	постоянные, приведенные к параметрам печи
1—1'	820	0,1416	0,0354	830	0,1435	0,0359
2—2'	790	0,1365	0,0342	1040	0,180	0,045
3—3'	805	0,1992	0,0348	1140	0,197	0,0493
4—4'	6000	1,038	0,2595	6000	1,038	0,2595
5—5'	3550	0,615	0,154	3600	0,624	0,156

При совместной работе всех пар „постоянные“ электродов 1—1'; 4—4' и 5—5' почти не изменяются. Значительное изменение „постоянных“ электродов 2—2' и 3—3' объясняется взаимным влиянием этих пар, действующих параллельно и расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Расхождение же между ними обуславливается влиянием электродов 1—1'.

Электрическое сопротивление между электродами в проектируемой печи определялось по формуле:

$$R_1 = c_1 \cdot \rho_1, \tag{4}$$

где  $\rho_1$  — удельное сопротивление боросиликатного стекла 3С—5К, определяемое по кривой зависимости  $\rho' = f(t)$  (рис. 4);

$c_1$  — „постоянная“ между электродами в печи.

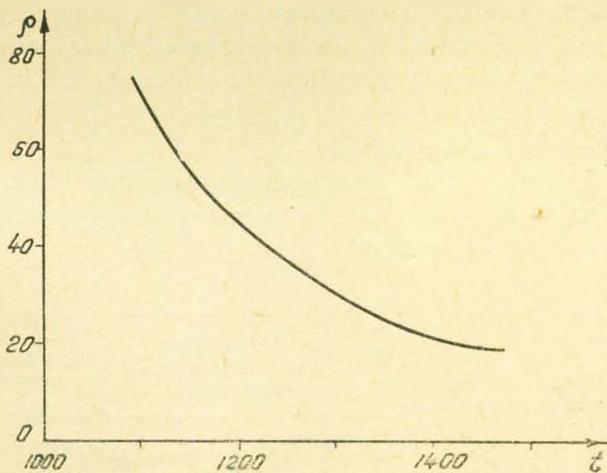


Рис 4

В табл. 4 приведены расчетные значения сопротивлений стекломассы между электродами в печи, удельное сопротивление которой определялось по заданным температурам.

Электрические сопротивления стекломассы между электродами в этой же печи при эксплуатации (сопротивление определялось по

Таблица 4

Пары электродов	Расчетная температура в °С	Удельное сопротивление стекла 2С-5К в $\Omega \cdot \text{см}$	Данная пара при остальных отключенных электродах		При совместной работе всех электродов	
			постоянные между электродами в печи	сопротивление между электродами в печи	постоянные между электродами в печи	сопротивление между электродами в печи
1—1'	1350	25	0,0354	0,885	0,0359	0,896
2—2'	1400	21	0,0342	0,719	0,045	0,945
3—3'	1400	21	0,0348	0,730	0,0493	1,035
4—4'	1300	30,5	0,2595	7,9	0,2595	7,9
5—5'	1250	37	0,154	5,7	0,156	5,76

показаниям электрических измерительных приборов) в условиях нормального режима приведены в табл. 5.

Таблица 5

Пары электродов	1—1'	2—2'	3—3'	4—4'	5—5'
Сопротивления между электродами в печи	0,96—1,15	0,88—1,0	1,0—1,1	7,2—8,5	8,5—10

Как видно из таблиц 4 и 5, сопротивления в печи между парами электродов 2—2', 3—3' и 4—4' достаточно близко совпадают с расчетными сопротивлениями, определенными по модели при совместной их работе. Разница в сопротивлениях в зонах расположения электродов 1—1' (варочная) и 5—5' (выработочная), обусловливается тем, что температуры стекломассы в этих зонах, как показали измерения, были ниже расчетной—для электродов 1—1' на 30—40°С, а для электродов 5—5' на 100—140°С.

В табл. 6 даны сопротивления стекломассы между электродами, рассчитанные по модели и измеренные непосредственно в печи при фактических температурах:

Таблица 6

Пары электродов	Фактическая температура	Удельное сопротивление стекла 3С-5К	Данная пара при остальных отключенных электродах		При совместной работе всех электродов	
			сопротивление между электродами по модели	сопротивление в печи	сопротивление по модели	сопротивление в печи
1—1	1320	23,5	1,01	1,09	1,02	1,09
2—2	1400	21	0,719	0,742	0,945	0,91
3—3	1400	21	0,72	0,714	1,035	1,03

В зоне электродов 1—1' верхние неповаренные слои повышают значения сопротивления на 5—10% [2] по сравнению с расчетным по

модели. На остальных электродах эта разница меньше, ввиду большей температурной однородности стекломассы.

Результаты проведенных исследований показали, что при определении „постоянных“ между электродами на электрической модели ошибка измерения не превышает 5% и является наиболее точным для производства расчета.

Для сравнения в табл. 7 приведены данные, полученные в печи по модели и по формулам (1, 2).

Таблица 7

Пары электродов	В печи	По модели	По формуле 2	По формуле 1
1—1'	0,0368	0,0354	0,0408	0,026
2—2'	0,0357	0,0342	0,0196	0,0269
3—3'	0,0352	0,0348	0,0496	0,0269
4—4'	0,262	0,2595	—	—
5—5'	0,154	0,154	0,229	0,061

В опытной печи производился систематический контроль температуры стекломассы по его сопротивлению между электродами. При этом величина „постоянных“, определенных в электролитической модели, уточнялась непосредственно в печи при оптимальном режиме производства.

На основании уточненных „постоянных“ и измерения сопротивлений между электродами определялась температура стекломассы в зонах расположения электродов. На рис. 5 приведено распределение

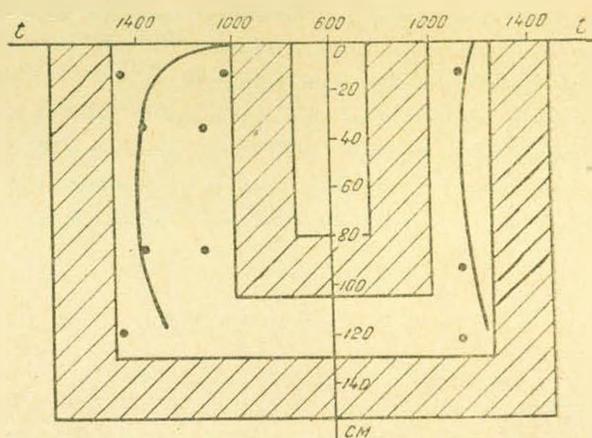


Рис. 5.

температур в печи, рассчитанное по сопротивлениям и „постоянным“ между электродами. Указанный способ дал возможность определять температуры и поддерживать оптимальный режим действующей печи № 5 за всю ее кампанию, лишь изредка прибегая к непосредственным замерам температуры в стекломассе с применением термпары для уточнения „постоянных“.

Ա. Յ. ՄԵԼԻՔ-ՀԱԽՆԱԶԱՐՅԱՆ, Կ. Մ. ՔԱԳԵՎՈՍՅԱՆ

ԱՊԱԿՈՒ ԷԼԵԿՏՐԱՀԱՆՄԱՆ ՎԱՌԱՐԱՆԻ ԷԼԵԿՏՐՈՂՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ,  
ԵՂԱԾ ԳԻՄԱԳՐՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՄՈԳԵԼԱՑՄԱՆ ՄԻՋՈՑՈՎ

Ա մ փ ո փ ո ո մ

Ապակու էլեկտրահանուման վառարաններում երկու էլեկտրողների միջև ընկած ապակեմասսայի էլեկտրական դիմադրությունն որոշման համար գոյություն ունեցող բանաձևերը (1, 2) տալիս են մոտավոր արժեքներ, որոնք երբեմն տարբերվում են իրականից 1, 5—2 անգամ: Դիմադրությունների հաշվումը զործսոց էլեկտրողների մի քանի զույգերի ապակյություն կամ վառարանների բարդ կոնֆիգուրացիաների դեպքում, այս բանաձևերով գործնականորեն հնարավոր չէ:

ՀՍՍՒ ԺՏՈՒ-ի ՔԳԻ ինստիտուտում էլեկտրական վառարաններ նախագծելիս էլեկտրողների միջև ընկած ապակեմասսայի էլեկտրական դիմադրություն հաշվման պրակտիկայում կիրառվել և կիրառվում է նրա որոշումը էլեկտրոլիտիկ վաննաներում մոդելացման միջոցով:

Ապակեմասսայի դիմադրության չափումները էլեկտրողների միջև անմիջականորեն փորձարկելու № 5 վառարանում ցույց ափեցին համարյա լրիվ համընկում (տե՛ս աղյուսակ № 5) էլեկտրոլիտիկ վաննայի չափումներից ստացված տվյալների հետ:

№ 5 փորձնական վառարանի փորձարկման ժամանակ նրա օպտիմալ սեփմը պահպանվել է էլեկտրողների միջև ընկած ապակեմասսայի դիմադրությունը սխատեմատիկաբար հսկողության ենթարկելով, այսինքն  $S = f(l)$  կորով և (4) բանաձևով, պահպանվել է համապատասխան անհրաժեշտ շերտատիճան էլեկտրողների գասավորման զոնաներում:

Վերոհիշյալի հիման վրա առաջարկվում է՝

1. էլեկտրողների միջև ընկած ապակեմասսայի դիմադրությունը որոշել մոդելացման միջոցով էլեկտրոլիտիկ վաննայում, որպես ամենաճշգրիտ եղանակ:

2. Վառարանի օպտիմալ սեփմը պահպանել էլեկտրողների միջև ընկած ապակեմասսայի դիմադրությունը սխատեմատիկ հսկողության ենթարկելով:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Пейшес И. *Journ. Soc. Glass, Techn.*, 1948, 32, с. 399.
2. Научно-технический информационный бюллетень ВНИИС, № 5, 1952.
3. Отчет по научной поездке в Швейцарию. Под редакцией Макарова, 1958.
4. Борель Э. „Практические стороны электрической варки стекла“. Информационный бюллетень 4 (21), 1957.
5. Венников. „Моделирование в электротехнике“. Госэнергоиздат, 1948.
6. Корсак С. П. „Электрические водонагреватели и паровые котлы“. Госэнергоиздат, 1954.
7. Корнелиус И. „Электрическая варка стекла“. Информационный бюллетень 4 (21), 1958.