

К. Т. Н. Н. Н. Шустров¹, Д. Т. Н. В. Г. Пузач¹, С. А. Безенков² (✉)¹ ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН», Москва, Россия² АО «НПО Стеклопластик», пос. Андреевка Солнечногорского района Московской обл., Россия

УДК 666.762.42:666.1.031.5

ВЛИЯНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТЕН ВАРОЧНОГО БАССЕЙНА ЭЛЕКТРОПЕЧИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

Разработан метод моделирования электрического процесса варки стекла, позволяющий получить информацию о единстве электрических и тепловых процессов в стекломассе в электрической стекловаренной печи. Варочный бассейн печи выполнен из токопроводящего хромоксида. Работу выполняли с помощью моделирования на интеграторе ЭГДА, в результате чего были построены два варианта опытных электропечей с различным направлением силовых линий и опытно-промышленная печь производительностью 7 т/сут для варки стекла Е, широко применяемого в производстве стекловолокна.

Ключевые слова: электрическая стекловаренная печь (ЭСП), электропроводность, силовые линии, моделирование, эквипотенциали, эквиградиентали.

Продолжительность кампании печей в основном обеспечивается применением более коррозионно-стойких огнеупорных материалов к расплаву стекломассы разного химического состава. Наряду со стекловаренными печами с пламенным обогревом используют электрические стекловаренные печи (ЭСП), которые имеют ряд преимуществ по сравнению с печами с пламенным обогревом [1]:

- большую эффективность электроварки, позволяющую увеличить КПД до 40–60 % по сравнению с 18–20 % в пламенных печах;
- более низкие капитальные затраты за счет увеличенных габаритов печи, отсутствия рекуператоров (регенераторов), дымовых труб и др.;
- улучшенные условия труда;
- значительно меньшие вредные выбросы в окружающую среду.

Несмотря на бесспорные преимущества электроварки широкого применения в промышленности она не получила. Одна из причин этого — низкая коррозионная стойкость огнеупорных материалов (в частности, бакора) к воздействию расплавов стекол. Известно [3, 4], что для кладки варочного бассейна применяются огнеупорные материалы на основе оксида хрома как электрических, так и пламенных печей с электрообогре-

вом. Однако огнеупорные материалы на основе оксида хрома (С 1215, ХСУ, ХЦ-45 и др.) имеют удельное электросопротивление ρ , соизмеримое с ρ щелочных стекол и значительно большее, чем у бесщелочных [5, 6].

На рис. 1 показана зависимость ρ огнеупоров, содержащих оксид хрома, от температуры

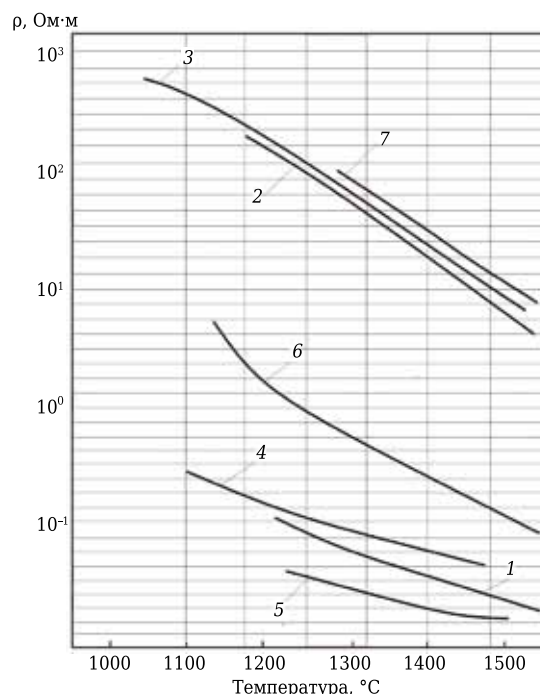


Рис. 1. Температурная зависимость ρ различных огнеупоров и стекол: 1 — огнеупор С 1215; 2 — бакор-41; 3 — ЗС 1300; 4 — ХЦ-45; 5 — стекло А; 6 — стекло Е; 7 — бакор-33



С. А. Безенков

E-mail: bezenkovsergej@yandex.ru

(кривые 1–4), а также для сравнения огнеупоров с высоким удельным сопротивлением (кривые 2, 3, 7), стекол бесщелочного Е (кривая 6) и щелочного А (кривая 5) [2]. Анализ кривых показывает, что ρ хромсодержащих огнеупорных материалов значительно ниже, чем у бесщелочного стекла, и практически на одном уровне со щелочным стеклом. Это вызывает затруднение при их использовании в ЭСП и при дополнительном электроподогреве. По данным [2], огнеупоры для печей должны обладать высоким электрическим сопротивлением при рабочих температурах. Однако значительные преимущества хромсодержащих огнеупоров по сравнению с бакоровыми делают целесообразным их применение при кладке варочного бассейна ЭСП.

В соответствии с общей задачей изучения особенностей технологии варки бесщелочных стекол в ЭСП для случаев, когда бассейн ЭСП выложен из материала с высоким электросопротивлением, т. е. когда ρ стекла $\gg \rho$ огнеупора, потребовалось исследовать электрическое поле и распределение потоков энергии с учетом проводимости стен бассейна печи. Соизмеримость электросопротивления стен варочного бассейна и стекломассы вызывает нежелательные явления, такие как перераспределение потока мощности, максимальное выделение тепла у стен, создание замкнутого электрического контура, что усиливает коррозию огнеупорного материала и увеличивает потерю мощности.

Для изучения этих нежелательных явлений рассмотрен механизм взаимодействия электрического и термического полей в общем случае. Для этой цели применена аналоговая модель, при использовании которой одни и те же дифференциальные уравнения описывают совершенно разные физические процессы. Наиболее известной из этих аналогий, находящей широкое применение в моделировании, является электрогидродинамическая аналогия (ЭГДА) [5]. Поскольку интеграторы применяются при расчете не только гидродинамических, но и тепловых явлений, то представляется возможным применять методы ЭГДА и при изучении процессов, сопровождающих электроварку стекла. Для этого необходимо разработать методы расчета электрического поля в бассейне ЭСП с однофазным и трехфазным питанием и применить их непосредственно на модели.

При электроварке стекла через стекломассу проходят токи, в результате чего выделяется джоулево тепло с разной интенсивностью удельной мощности P , которая пропорциональна квадрату плотности тока j^2 и удельному электрическому сопротивлению ρ :

$$P = \rho \cdot j^2. \quad (1)$$

Кроме того, в стекломассе происходят сложные физико-химические процессы, следствием

которых является изменение удельного сопротивления под влиянием мощности:

$$\rho = \rho(P). \quad (2)$$

Решив систему уравнений (1) и (2), путем исключения j получим

$$P = P(j). \quad (3)$$

При работе на интеграторе ЭГДА принято изображать электрическое поле в виде силовых и эквипотенциальных линий, полученных на электропроводящей бумаге, поэтому моделирование взаимодействия электрического и термического полей представлено в виде линий аналогично силовым и эквипотенциальным. При условии, что ток и мощность представлены графически в виде линий, из уравнения (3) имеем следующее: линии $j = \text{const}$ будут совпадать с линиями $P = \text{const}$. Поскольку процесс варки стекла сложный, то в соответствии с уравнением (1) приближенно можно считать, что распределение выделенной энергии соответствует распределению температур и, следовательно, линии $P = \text{const}$ являются изотермами, т. е.

$$T = T(P). \quad (4)$$

Температурное поле расплава описывается уравнением Пуассона

$$\Delta^2 T = \frac{-q_v}{\lambda}, \quad (5)$$

где Δ^2 — оператор Лапласа; q_v — удельная объемная мощность; λ — теплопроводность.

В любом случае, чтобы определить изотермы в расплаве, нужно знать распределение источников нагрева — это правая часть уравнения (5).

Известны случаи, когда изотермы в точности совпадают с линиями постоянной удельной мощности (если теплопроводность расплава постоянна). Эти случаи практически важны, например, для электрода, расположенного в центре цилиндрического бассейна с неискажающими стенами. Линии постоянной мощности и изотермы представляют собой одно и то же семейство линий — концентрические окружности. Из решения уравнения Пуассона (5) для этого варианта можно определить функцию $T(P)$ по выражению (4) и использовать ее для расчета распределения температур по распределению удельных мощностей в расплавах.

Однако не все принятые допущения полностью соблюдаются. В первом приближении можно утверждать, что в бассейнах для электрической варки стекла линии постоянной мощности совпадают с эквиградиенталями, представляющими собой линии равного модуля напряженности и являющиеся аналогом линий постоянной мощности (изотерм). Это, по существу, формирует единство электрических и тепловых

процессов при электроварке, а это означает наличие нового электротермического поля. Кроме изотерм существуют еще линии, ортогональные к ним, являющиеся во всех точках касательными к векторам термического градиента. По ним распространяются тепловые потоки. Назовем эти линии линиями теплового потока. Из приводимой выше идентичности между изотермами и эквиградиентами следует, что должен существовать электрический аналог линиям теплового потока. Таким аналогом являются изоклины, т. е. линии равного угла наклона напряженности электротермического поля.

Приведенная аналогия была положена в основу разработки метода расчета и моделирования при изучении распределения удельной мощности. Используя разработанный метод на интеграторе ЭГДА, можно найти семейство эквипотенциалей и силовых линий, иллюстрирующее распределение электрического поля между двумя стержневыми электродами однофазной системы. Для решения этой задачи была изготовлена двойная модель, состоящая из двух частей: верхней (рабочая) и нижней (вспомогательная). На модели была использована электропроводящая бумага, края которой соединены между собой электропроводным клеем высокой проводимости. Прикладывая напряжения разного значения к электродам на электропроводящей бумаге, получаем картину эквипотенциалей и силовых линий путем измерения напряжений на другой модели с инвертированными граничными условиями (вместо эквипотенциалей — силовые линии и наоборот). Затем эти картины совмещены в одной диаграмме.

На рис. 2 показана диаграмма распределения эквипотенциалей и силовых линий для двух электродов без влияния ограждающих поверхностей, которая отражает картину распределения электрического поля от -50 до $+50$ В/м. Диаграмма распределения удельной мощности показывает наличие двух областей выделения джоулева тепла, которая отражает структуру электротермического поля двухэлектродной системы без влияния ограждающей стенки с непроводящей стенкой с помощью эквиградиенталей и изотерм. Эквиградиентали показывают, что наибольшее выделение тепла происходит непосредственно у электродов, а зона одинаковой температуры охватывает как электроды, так и прилегающую область в соответствии с расположением эквипотенциалей.

Иная картина наблюдается при учете влияния ограждающих поверхностей с непроводящей стенкой вокруг электродов. На рис. 3 показана структура электротермического поля двухэлектродной системы с непроводящей стенкой. Диаграмма распределения удельной мощности показывает наличие двух областей выделения джоулева тепла, она отображает

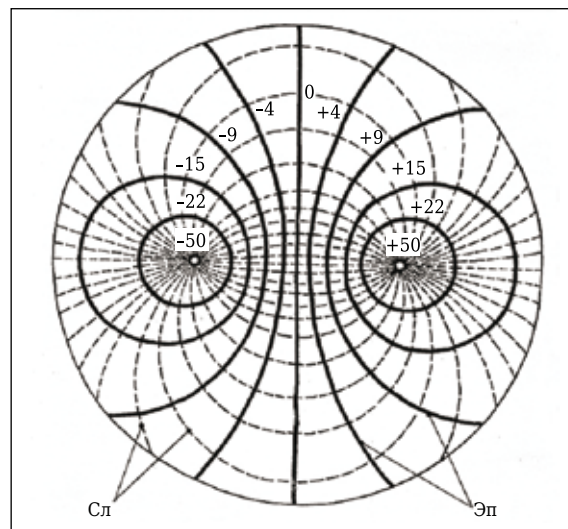


Рис. 2. Диаграмма распределения эквипотенциалей и силовых линий двухэлектродной системы без влияния ограждающей стенки: Эп — эквипотенциалы; Сл — силовые линии; цифры на кривых — напряженность электрического поля, В/м

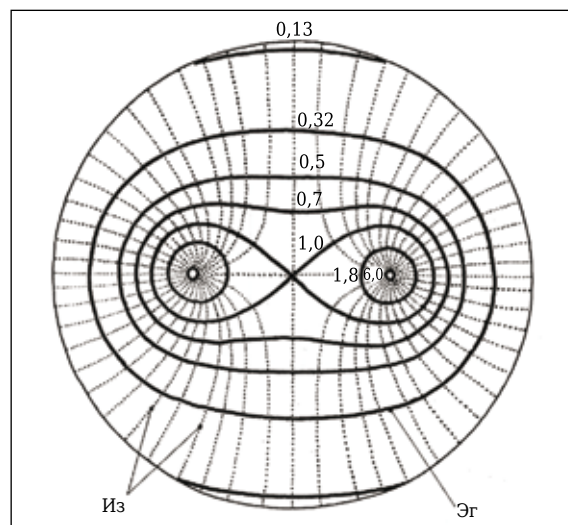


Рис. 3. Структура электротермического поля двухэлектродной системы с непроводящей стенкой: Эг — эквиградиентали; Из — изоклины; цифры на кривых — напряженность электрического поля, В/м

структуру электротермического поля двухэлектродной системы с непроводящей стенкой с помощью эквипотенциалей и изоклин. Эквиградиентали показывают, что наибольшее выделение тепла происходит непосредственно у электродов, а зона одинаковой температуры охватывает как электроды, так и прилегающую область в соответствии с расположением эквипотенциалей.

Используя разработанный метод для трехфазной системы, построено семейство эквипотенциалей и силовых линий для трех электродов так же, как и для однофазной системы. На рис. 4 показана диаграмма распределения эквипотенциалей двух моментов времени, разли-

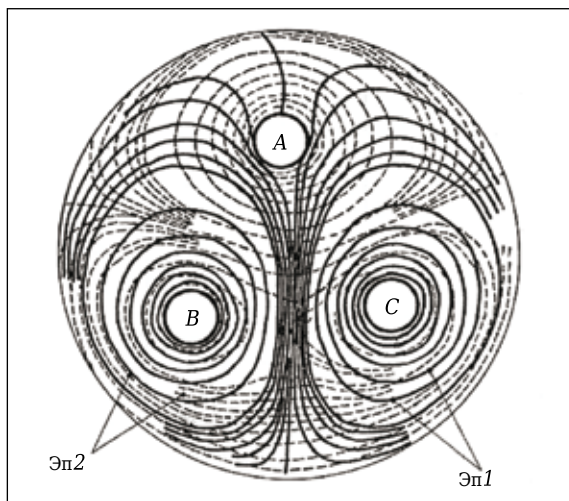


Рис. 4. Диаграмма распределения эквипотенциалей для двух моментов времени: A, B, C — электроды; Эп1, Эп2 — эквипотенциалы с интервалом 10 (1) и 2 % (2)

чающихся на $1/4$ периода. Эквипотенциалы следуют друг за другом с разницей 10 % от фазного напряжения. На рис. 4 они показаны силовыми линиями, а штриховыми линиями показано 10 % эквипотенциалей в зонах со слабым полем с разницей 2 %.

Реализовав граничные условия для той же двойной модели, что и для однофазной системы, получим диаграмму распределения эквипотенциалей, которая показывает распределение удельной мощности для системы из трех электродов с непроводящей стенкой (рис. 5). На диаграмме показаны две области выделения джоулева тепла: первая область охватывает все электроды и каждый в отдельности, вторая расположена на разных расстояниях от всех электродов.

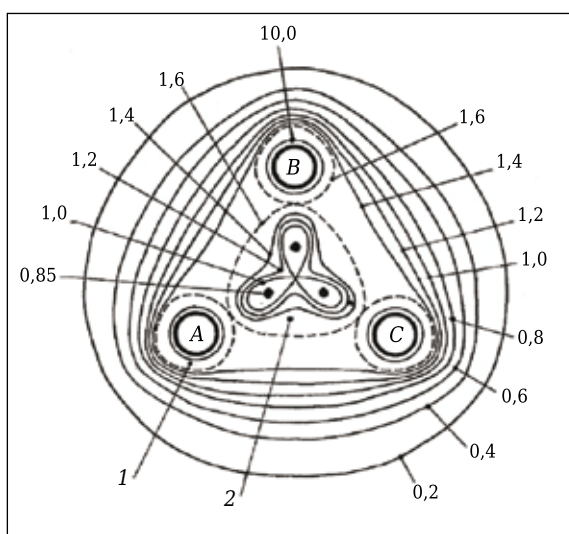


Рис. 5. Распределение линий постоянной удельной мощности двухэлектродной системы с непроводящими стенками: A, B, C — электроды; 1, 2 — области выделения тепла; цифры на кривых — напряженность электрического поля, В/м

Пространственное расположение электрического поля (плотность тока) характеризует интенсивность преобразования электрического тока в тепло. Там, где градиенты малы, наблюдается низкая интенсивность прямого выделения тепла. Эти зоны получают тепло в результате конвективного обмена и теплопроводности стекломассы; при этом электрическая энергия превращается в тепло неравномерно в разных элементах объема. На эквиградиентах линии тока одинаково уплотнены — это области, в которых тепло выделяется с одинаковой скоростью, а для адиабатического режима эти линии совпадают с изотермами. Мгновенные значения обобщенных изотерм совпадают с эквиградиентами; при этом энергия системы питания преобразуется в энергию обобщенного электротермического поля, структура которого выражена посредством эквиградиенталей и изоклин.

Для выявления полного механизма энергетического процесса необходимо иметь информацию потоков реактивной мощности в объеме. Эту информацию дает диаграмма распределения линий постоянной удельной мощности (изотерм) и линий постоянного тока (изоклин), которые показаны на рис. 3 и 5. Энергетическая диаграмма печи с изолированной стенкой построена на основе разработанного метода, с проводящими стенками — по методу качественного анализа на основе исследований, приведенных в публикации [8]. Основная особенность диаграммы для печи с проводящей стенкой, учитывающей локализацию реактивной мощности в печи, связана с тем, что образуются симметрично расположенные узлы или пучности поля, в которых происходит попарное объединение силовых линий поля. В этих областях увеличивается концентрация изоклин, а также появляются новые группы изотерм. В результате происходит существенное перераспределение обобщенного термического поля и тепловых потоков, для изменения которых возникает необходимость разрывов проводящей стенки между электродами. На рис. 6, а, б показано, что введение диэлектрических разрывов будет наиболее эффективно в узлах I–I, так как оно сопровождается обратной коммутацией изоклин и уменьшением локальных тепловых полей.

Эксперименты, проведенные на моделях, показали зависимости перераспределения электрических параметров в зависимости от проводимости ограждающих поверхностей. Традиционный подход к разработке конструкций ЭСП не учитывает этих особенностей, которые приносят дополнительные затруднения при стабилизации теплового режима, вызывают увеличение проводимости ограждающих стен ЭСП; при этом ρ огнеупора становится соизмеримым с ρ стекломассы.

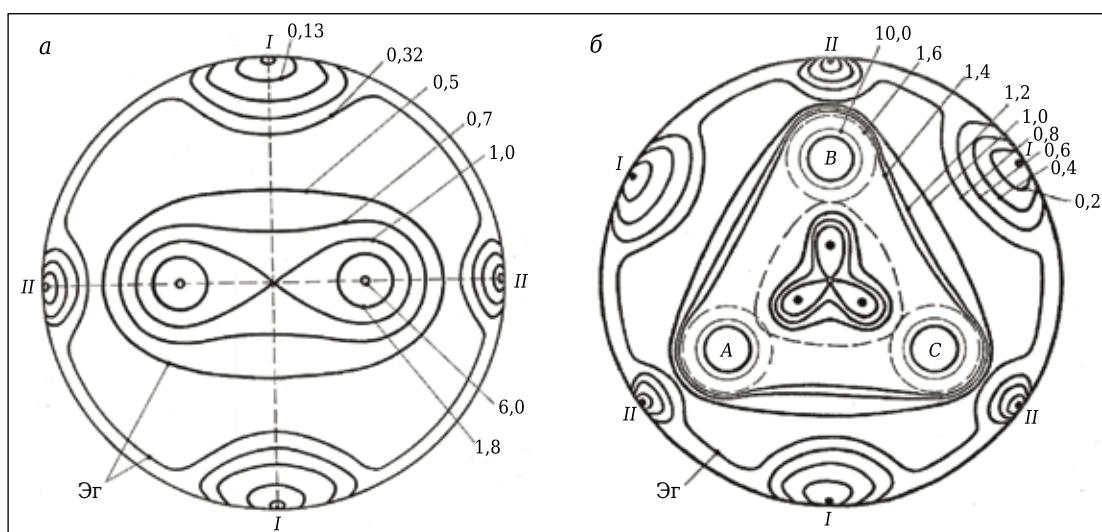


Рис. 6. Энергетическая диаграмма двух- (а) и трехэлектродной (б) систем с проводящей стенкой: I, II — узлы локального выделения энергии; Эг — эквиградиентали; A, B, C — электроды

Проведенные исследования были положены в основу конструкции ЭСП для варки алюмоборосиликатного стекла Е следующего химического состава, %: SiO_2 53,0, Fe_2O_3 0,4, B_2O_3 10,0, Al_2O_3 15,0, CaO 17,0, MgO 4,0, F_2 0,3, R_2O 0,5, TiO_2 0,08. Основной задачей при варке стекла такого химического состава является предотвращение прохождения электрического тока по замкнутому контуру варочного бассейна, выполненного из огнеупора на основе хромоксида С 1215, для чего необходимо было соблюдать следующие условия:

- электроды по периметру бассейна вдоль стенок должны быть одной фазы;
- в стенах бассейна необходимо установить разрывы контура между разноименными фазами электродов с помощью изолирующих вставок из огнеупора с большим электросопротивлением. Эти условия необходимо выполнить для устранения выделения энергии в узлах между фазами электродов (см. рис. 6, б) и преждевременного разрушения огнеупора.

Эти условия были положены в основу разработки конструкций опытных ЭСП с использованием теплоизолирующих вставок из огнеупора ZC-1300, установленных в разрывах огнеупора С 1215 между разноименными фазами. Изложены [7] конструктивные особенности двух ЭСП для варки стекла Е производительностью 3 т/сут с продольным и поперечным направлением силовых линий и разрывами проводящего контура. Результат эксплуатации этих печей в течение 10 мес показал (после остановки) хорошее состояние огнеупора С 1215 и сильное разъедание изолирующих вставок огнеупора ZC-1300, что потребовало дальнейшего усовершенствования конструкции этих печей.

На основании проведенных исследований была разработана опытно-промышленная ЭСП производительностью 7 т/сут для варки стекла типа Е (рис. 7). Варочный бассейн печи выполнен

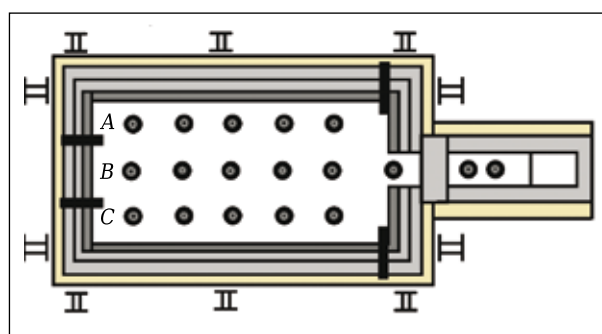


Рис. 7. Опытно-промышленная ЭСП производительностью 7 т/сут для варки стекла типа Е

из токопроводящего огнеупора С 1215, по периметру которого установлены донные электроды, присоединенные к одноименной фазе питания. Изолирующие вставки из огнеупора ZC-1300 установлены по торцевым стенкам бассейна между разноименными фазами питания электродов.

При эксплуатации печи были достигнуты следующие показатели: производительность 6,2 т/сут; съем стекломассы 980 кг/м²; удельный расход 2 кВт/кг стекла; выработочные свойства стеклянных шариков стабильны; производительность одного питателя 110–130 кг/сут; никаких локальных перегревов внутри бассейна не наблюдалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан метод моделирования электрического процесса варки стекла, позволяющий получить информацию о единстве электрических и тепловых процессов в стекломассе. Метод основан на получении сеток эквиградиенталей и изоклин обобщенного электротермического поля на проводящей бумаге при однофазном и трехфазном питании электродов.

2. С помощью разработанного метода получена на модели картина обобщенных потоков мощностей с разным расположением электродов.

3. Разработан способ изображения распределения удельной мощности в проводящей среде с однофазным и трехфазным питанием цилиндрических электродов с учетом проводимости стен.

4. Оценено эквивалентное (межэлектродное) сопротивление стекломассы, характеризующее процесс, возникающий при введении разрыва электропроводящей стенки бассейна печи.

5. Проведенные экспериментальные исследования показали, что для устранения локального выделения тепла вдоль ограждающих стен необходимо исключить прохождение тока по

электропроводящим стенам бассейна печи. Для этого вдоль боковых стен необходимо установить изолирующие вставки из менее электропроводного огнеупора между разноименными фазами или расположить электроды вдоль боковых стен с одноименной фазой. Это позволит избежать преждевременного разрушения хромоксидного огнеупора.

6. По результатам этих исследований спроектирована и построена опытно-промышленная ЭСП производительностью 7 т/сут для варки стекла Е с использованием огнеупора С 1215 с малым электросопротивлением. Положительные результаты эксплуатации ЭСП показали возможность применения в ней токопроводящих огнеупоров.

Библиографический список

1. **Шустров, Н. Н.** Электроварка алюмомагнезиальных стекол : науч. изд. / Н. Н. Шустров, Ю. Н. Писцов, Б. Н. Красильщиков // Физико-химические процессы и оборудование при стекловарении для производства стекловолокна. — М. : ВНИИСПВ, 1979. — С. 63–75.
2. **Станек, Я.** Электрическая варка стекла / Я. Станек. — М. : Легкая индустрия, 1979. — 247 с.
3. **Трунова, Т. Н.** Расчет удельного электрического сопротивления расплавов стекол / Т. Н. Трунова, Л. А. Бахвалов // Стекло и керамика. — 1981. — № 1. — С. 11, 12.
4. **Попов, О. Н.** Служба плавлено-литых хромалюмоцирконовых огнеупоров в промышленных стекловаренных печах / О. Н. Попов, В. П. Фролова // Исследование в области огнеупоров в промышленных стекловаренных печах. — М. : ГИС, 1984. — С. 59–66.
5. **Тетельбау, И. М.** Электрическое моделирование / И. М. Тетельбау. — М. : Энергия, 1963. — 237 с.
6. **Degtyareva, E. V.** New refractories for the glass furnaces of the glass-fiber sector / E. V. Degtyareva, I. G.

Orlova, Yu. I. Kolosov, Yu. N. Pistsov // Refractories. — 1977. — Vol. 18, № 9/10. — P. 610–616.

Дегтярева, Э. В. Новые огнеупоры для ванн стекловаренных печей производства стекловолокна / Э. В. Дегтярева, И. Г. Орлова, Ю. И. Колосов, Ю. Н. Писцов // Огнеупоры. — 1977. — № 10. — С. 57–62.

7. **Shustrov, N. N.** Experience of using chromium oxide materials in electric glass-melting furnaces / N. N. Shustrov, V. G. Puzach, S. A. Bezenkov // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 59, № 5. — P. 441–444.

Шустров, Н. Н. Опыт применения хромоксидных материалов в электрических стекловаренных печах / Н. Н. Шустров, В. Г. Пузач, С. А. Безенков // Новые огнеупоры. — 2018. — № 10. — С. 54–57.

8. **Матвеевич, М. Т.** Магнитный поток и его преобразование / М. Т. Матвеевич. — М. : Изд. АН СССР, 1946. — 354 с. ■

Получено 16.12.19

© Н. Н. Шустров, В. Г. Пузач,
С. А. Безенков, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

 Coalesce Research Group

3rd European Congress on Material Science & Nanotechnology

24–25 сентября, 2020 | Париж, Франция

<https://coalesceresearchgroup.com/conferences/materialresearch>