

¹Кошельник В.М., д-р техн. наук,²Бекназарян Д.В.,¹НТУ «ХПИ», г. Харьков²ГК «Вокэнергомаш», г. Нижний Новгород

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ОГНЕУПОРНОЙ КЛАДКЕ ВАРОЧНОГО БАССЕЙНА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

В ваннх пламенных стекловаренных печах одним из основных факторов, который определяет длительность работы агрегата, является срок службы бокового ограждения варочного бассейна. Под воздействием высокотемпературного расплава, а также продуктов сгорания топлива, возникает процесс физико-химической коррозии материалов огнеупорных брусьев кладки бассейна печи. Чем выше уровень температур, тем быстрее происходит процесс разрушения кладки. Наиболее действенным методом снижения скорости данного процесса, является принудительное охлаждение наружной поверхности варочного бассейна в точке раздела трёх фаз, то есть на линии зеркала стекломассы, где соприкасаются все три среды, которые участвуют в процессе варки стекла – твёрдая (огнеупорный брус), жидкая (расплав стекломассы), газообразная (продукты сгорания). На заключительном этапе работы печи, в результате такого охлаждения на внутренней поверхности огнеупорного бруса может образовываться гарниссаж – пристенный слой охлаждённой (относительно общего уровня) стекломассы. Наличие такого слоя резко снижает негативное воздействие расплава на ограждение, что способствует повышению срока службы печи в целом. Приведены результаты решения двумерной задачи нестационарной теплопроводности в ограждении стекловаренной печи при наличии воздушного охлаждения, многослойной изоляции с учётом пристенного охлаждённого слоя стекломассы. Выполнено сравнение полученных расчётных данных с данными экспериментальных исследований.

Ключевые слова: нестационарная теплопроводность, стекловаренная печь, пристенный слой стекломассы.

Постановка задачи. Срок службы топливных стекловаренных печей ванного типа ограничивается, в основном, стойкостью огнеупоров варочного бассейна на уровне зеркала стекломассы и в районе протока. Стойкость огнеупорных материалов обусловлена скоростью их коррозионного износа, величина которого зависит от многих факторов, таких как сорт стекломассы, вид огнеупоров, температурный режим варки стека, зону расположения участка, и т.д. Высокий уровень температур, механическое, физико-химическое взаимодействие, а так же влияние агрессивных соединений и компонентов шихтовых материалов на элементы конструкции бассейна считают определяющими при определении скорости разрушения огнеупорных материалов [1–4]. Основным способ снижения скорости коррозии огнеупоров – снижение температуры огнеупоров, что достигается применением воздушного, водяного или испарительного охлаждения стеновых брусьев [2].

В этой связи актуальной задачей является продление срока службы огнеупоров при сохранении тепловой эффективности стеклоплавильного агрегата. Нами была разработана математическая модель, позволяющая определить распределение огнеупоров в различных зонах стеновых огнеупорных брусьев в двумерной постановке.

В данной работе, основываясь на изложенных в работах [5, 6] предпосылках, математическая модель процесса теплопереноса была уточнена путём учёта влияния слоя охлаждённой стекломассы, который образуется при соприкосновении расплава с внутренней поверхностью охлаждённых огнеупоров ограждения варочного бассейна.

Наличие такого слоя оказывает существенное влияние на формирование температурного поля огнеупора и тепловой изоляции варочного бассейна, что требует более точного учета его влияния на эксплуатационные параметры работы стекловаренной печи. [7–9].

При этом одной из наиболее важных задач, является выбор огнеупорного материала для варочного бассейна печи

Кроме того, существенное влияние на процесс варки стекломассы и длительность работы агрегата в целом, оказывает наличие системы охлаждения стекловаренной печи. В частности, нами учтено влияние принудительного воздушного охлаждения наружной поверхности огнеупорного бруса на линии зеркала стекломассы [10], как наиболее распространённого на производстве.

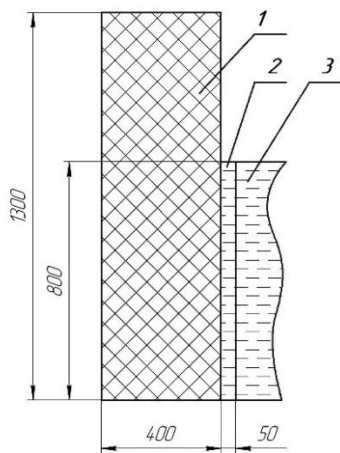
Нерешённая часть проблемы. В настоящее время отсутствуют многомерные математические модели, позволяющие определить температурное состояние огнеупорной кладки при наличии тепловой изоляции в сочетании с воздушным охлаждением стеновых брусьев варочного бассейна стекловаренных печей.

Цель работы – разработка математической модели с использованием метода конечных элементов для определения двумерного температурного поля в огнеупорных материалах ограждения, которая учитывает влияние охлаждённого пристенного слоя стекломассы и применение тепловой изоляции в сочетании с принудительным воздушным охлаждением.

Изложение основного материала. Математическая постановка задачи связана с решением в общем виде нестационарной двумерной задачи теплопроводности, которая описывается уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right] = c(t) \rho(t) \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где $\lambda(t)$, $c(t)$, $\rho(t)$ – коэффициент теплопроводности, теплоёмкость и плотность материала, зависящие от температуры, соответственно.



На рисунке 1 представлены геометрические параметры модели для реализации предложенной методики [3].

В случае если геометрия, теплофизические характеристики материалов, начальные условия, определяющие температурное поле тела при $\tau = 0$ известны, её необходимо дополнить граничными условиями, которые выделяют конкретную задачу из всего класса задач теплопроводности. Для решения поставленной задачи мы используем граничные условия первого рода:

$$t_i(x, y, \tau) = f(x, y, \tau), \quad (2)$$

и третьего рода

$$\alpha(x, y, \tau, t_i)(t_i - t_o) = \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (3)$$

Нами составлена и реализована программа, с помощью которой осуществляется решение поставленной задачи методом конечных элементов. Тип элементов разбиения исследуемого объекта – равносторонний треугольник с длиной ребра 10 мм. Учёт влияния пристенного слоя стекломассы выполнялся путём деформации температурного поля шамота под воздействием изменяющихся теплофизических свойств стекломассы.

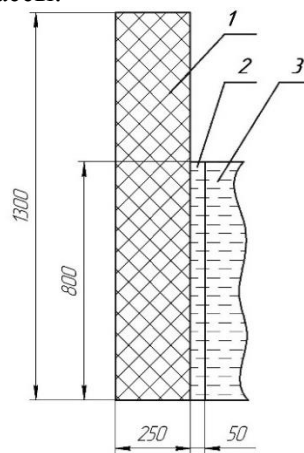


Рис. 1. Геометрические параметры расчётных моделей:
а – шамот, б – бакор 33: 1 – огнеупор; 2 – пристенный слой стекломассы; 3 – расплав стекла

Исходные данные, которые необходимы для решения данной задачи, приведены ниже в таблицах 1-3.

По результатам проведенных расчётов была определена величина удельной плотности теплового потока $q_p = 2960$ Вт/м, через ограждения брусьев бассейна стекловаренной печи при естественном воздушном охлаждении.

По данным экспериментальных измерений температур в бруссе [2], рассчитана величина удельной плотности теплового потока $q_p = 2675$ Вт/м².

Найденная нами величина погрешности расчётных данных относительно экспериментальных [2] составляет 9,6 % и лежит в допустимом для практического использования интервале.

На основе рассмотренной модели, проведён расчёт температурного поля для плавленого огнеупорного материала бакор 33, получившего широкое применение в строительстве стекловаренных печей. Этот материал имеет более высокую стеклостойкость по сравнению с шамотом, что позволяет уменьшить толщину стенового бруса до 250–300 мм. Кривые распределения тем-

ператур на рисунке 3, соответствуют геометрическим соотношениям, которые представлены ранее на рис. 1.

Установлено, что вследствие уменьшения толщины бруса и учитывая тот факт, что коэффициент теплопроводности бакора значительно выше по сравнению с шамотом (табл. 2), общее термическое сопротивление бруса уменьшается. Это приводит к резкому повышению температуры наружной поверхности стенки с 326 °С до

815 °С. В этом случае очевидной является необходимость снижения тепловых потерь, связанных с увеличением плотности теплового потока, проходящего через боковое ограждение ванны стекловаренной печи путём нанесения тепловой изоляции, которая позволяет уменьшить плотность теплового потока и уровень температур наружной поверхности бруса при использовании воздушного охлаждения.

Таблица 1

Исходные данные для расчёта

| Наименование величины | Параметры |
|--|-----------------|
| Материал кладки | шамот; бакор 33 |
| Толщина, мм | 400; 250 |
| Температура воздуха, °С | 30 |
| Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенки к воздуху, Вт/(м²К) | 10 |
| Температура на внутренней поверхности стенки, °С | 1300 |
| Средняя температура стеновых брусев в начальный момент времени, °С | 750 |

Таблица 2

Теплофизические свойства огнеупорных материалов боковых стен и теплоизоляции

| Материал | Плотность, кг/м³ | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) |
|----------------------------|------------------|--|
| Бакор 33 | 3500 | $4,07 + 0,2686 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| Шамот | 1860 | $0,7 + 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| Ячеистый фосфатный бетон | 950 | $0,348 + 10^{-4} t$ |
| Шамотоволоконная плита | | |
| ШВП-1150 | 375 | $0,130 + 10^{-4} t$ |
| ШВП-1350 | 500 | $0,07 + 0,30 \cdot 10^{-3} t$ |
| Перлиталь | 225 | $0,068 + 0,9 \cdot 10^{-4}$ |
| Керамовермикулитовые плиты | 350 | $0,085 + 0,21 \cdot 10^{-3} t$ |

Таблица 3

Зависимость коэффициента теплопроводности PbO-содержащих стёкол от температуры [5]

| Марка стекла | Температура, °С | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|-----|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 |
| ЛФ-5 | 5,0 | 7,5 | 18,33 | 35 | 63,4 | 115 | 148,3 | 126,7 | 116,7 |
| Ф-8 | 3,4 | 8 | 13,2 | 20 | 34 | 47,8 | 39,2 | 42,8 | 46,6 |
| ТФ-1 | 3,4 | 8,2 | 13 | 20,4 | 34 | 44 | 39 | 27,3 | 15,5 |

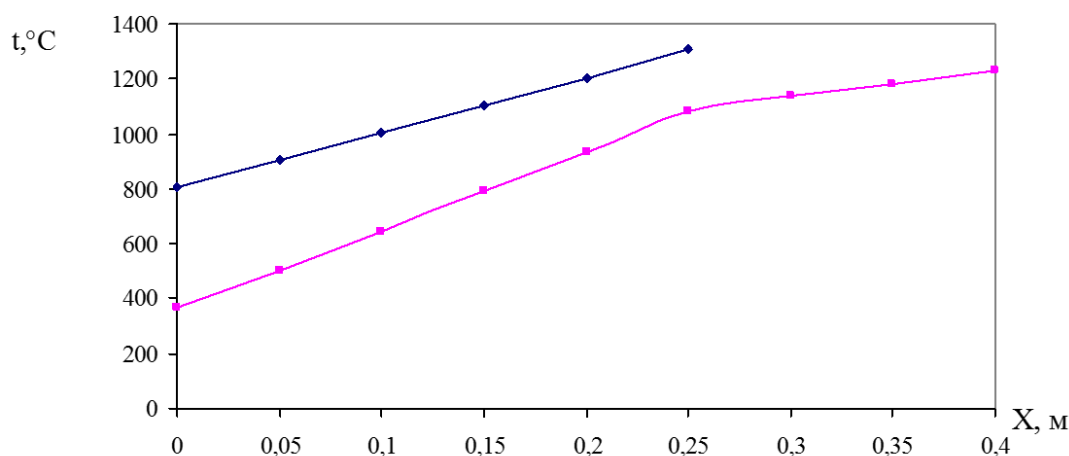


Рис. 3. Расчётное распределение температуры в стеновом бруске выполненном из шамота (—◆—) и бакора 33(—▲—)

Выводы. Разработана методика расчёта температурного состояния ограждения варочного бассейна стекловаренной печи с учетом наличия тепловой изоляции в сочетании с воздушным охлаждением наружной поверхности огнеупорной кладки.

Проведён сравнительный анализ величин удельных тепловых потоков полученных на основе расчётов по предложенной методике [3] и измеренных опытным путём. Величина рассчитанной погрешности составила 9,6 %, что позволяет сделать вывод о возможности использования данной модели для расчётов более сложных конфигураций боковых ограждений. Предложенная уточнённая модель, учитывающая характерные особенности работы огнеупорной кладки варочного бассейна стекловаренной печи может быть использована для решения задач выбора оптимального варианта многослойной тепловой изоляции в сочетании с принудительным воздушным охлаждением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов А.С. Теплотехника регенеративных стекловаренных печей. М.: Легпромбытиздат, 1990. 143 с.
2. Захариков Н.А. Теплообменные процессы в стекловаренных печах. Киев: Гостехиздат, 1962. 245 с.
3. Павловский В.К., Соболев Ю.С. Влияние состава силикатных стекол на стеклоустойчивость огнеупорных материалов. Исследования в области огнеупоров для стекловаренных печей: Сб. науч. тр. М.: ГИС. 1984. С. 82–86.
4. Павловский В.К., Петров В.К. Взаимодействие огнеупоров с расплавом боросиликатного стекла Стекло и керамика. 1990. № 10. С. 17–19.
5. Племянников М.М., Крупа О.А. Хімія та теплофізика скла: Навчальний посібник. К.: НТУУ „КПІ”, 2000. 560 с.
6. Попов О.Н. О кинетике взаимодействия плавнелитых огнеупоров с расплавами промышленных стекол // Исследования в области огнеупоров для стекловаренных печей: Сб. науч. тр. М.: ГИС, 1984. С. 8–17.
7. Фервонер О., Берндт К. Огнеупорные материалы для стекловаренных печей.; Пер. с нем. О.Н. Попова; Под ред. А.С. Власова. М.: Стройиздат, 1984. 261 с.
8. Галдина Н.М., Чернина Л.Л. Электроплавленные огнеупоры для стекловаренных печей. М.: Стройиздат, 1975. 182 с.
9. Бадан Г.О. О повышении срока службы стекловаренных печей // Стекло мира. 2002. № 4. С. 73 – 77.
10. Кошельник В.М., Хавин Е.В. Выбор рациональных конструкционных параметров соплового аппарата систем струйно–воздушного охлаждения бассейнов стекловаренных печей // Восточноевропейский журнал передовых технологий. 2006. № 2/2 (20). С. 94–97.

Информация об авторах

Кошельник Вадим Михайлович, доктор технических наук, профессор.
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт».
Украина, 61002, Харьков, ул. Кирпичёва, д. 2.

Бекназарян Давид Владимирович, начальник бюро теплотехнических и прочностных расчётов.
E-mail: david_beck@mail.ru; beknazaryan@vokem.ru
Группа компаний «Вокэнергомаш».
Россия, 603029, Нижний Новгород, ул. Памирская, д. 11 Ф.

Поступила в июне 2018 г.

© Кошельник В.М., Бекназарян Д.В., 2018

Koshelnik V.M., Beknazaryan D.V.

TO THE DETERMINATION OF THE TEMPERATURE FIELD IN THE REFRACTORY MASONRY OF THE MELTING TANK OF THE GLASS FURNACE

In the bath type flame glass melting furnaces, one of the main factor that determines the duration of the unit operation is the service life of the side enclosure of the melting tank. Under the influence of high-temperature melt, as well as combustion products of fuel, a process of physicochemical corrosion of refractory bar material occurs in furnace bath. The higher the temperature level, the faster the masonry destruction process takes place. The most effective method of reducing the speed of this process is forced cooling of the outer surface of the melting tank at the point of separation of the three phases, that is on the line of the glass mirror, where all three media that participate in the glass melting process are solid (refractory bar), liquid (melt), gaseous (combustion products). At the final stage of the furnace operation as a result of such cooling, a garnet-

wall layer of the cooled glass mass (relative to the general level) may form on the inner surface of the refractory bar. The presence of such a layer sharply reduces the negative impact of the melt on the enclosure, which contributes to an increase in the life of the furnace as a whole. The results of solving the two-dimensional problem of non-stationary thermal conductivity in the enclosure of the glass furnace are presented in the presence of air cooling, multilayer insulation, taking into account the cooled wall layer of glass mass. A comparison of the calculated data with the data of experimental studies is made.

Keywords: non-stationary thermal conductivity, glass furnace, wall-near layer of cooled glass.

REFERENCES

1. Kozlov A.S. Heat engineering of regenerative glass furnaces. Moscow: Legprombytizdat, 1990, 143 p.
2. Zaharikov N.A. Heat exchange processes in glass furnaces. Kiev: Gostekhnizdat, 1962, 245 p.
3. Pavlovskiy V.K., Sobolev Y.S. Influence of temperature on refractories corrosion in glass melts. Glass and ceramics. 1991. № 12. pp. 12–14.
4. Pavlovskiy V.K., Petrov V.K., Interaction of refractories with borosilicate glass melt. Glass and ceramics, 1990, no. 10, pp. 17–19.
5. Pleminnikov M.M., Krupa O.A. Chemistry and thermophysics of glass: Tutorial. Kiev: NTUU "KPI", 2000, 560 p.
6. Popov O.N. About kinetics of interaction of melt-molded refractories with industrial glass melts. Research in the field of refractories for glass furnaces. Moscow: 1984, pp. 8–17.
7. Fevoner O., Berndt K., Refractories for glass furnaces. Translation from German Popov O.N. edited by Vlasov A.S. Moscow. Stroyizdat. 1984, 261 p.
8. Galdina N.M., Chernina L.L. Electrofused refractories for glass furnaces. Moscow. Stroyizdat, 1975, 182 p.
9. Badan G.O. About increasing the service life of glass melting furnaces. Glass of the world, 2002, no. 4, pp. 73–77.
10. Koshelnik V.M., Havin E.V. Choice of rational design parameters of nozzle apparatus of jet-air cooling for melt tank. Eastern-European journal of advanced technologies, 2006, no. 2/2 (20), pp. 94–97.

Information about the author

Vadim M. Koshelnik, PhD, professor.

National Technical University "Kharkov Politechnic Institute".
Ukraine, 603029, Kharkov, st. Kirpichova, 2.

David V. Beknazaryan, head of the bureau of heat engineering and strength calculations.

E-mail: david_beck@mail.ru; beknazaryan@vokem.ru

Group of companies "Vokenergomash"

Russia, 603029, Nizhny Novgorod, st. Pamirskaya, 11 F.

Received in June 2018

Для цитирования:

Кошельник В.М., Бекназарян Д.В. К определению температурного поля в огнеупорной кладке варочного бассейна стекловаренной печи // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №9. С. 93–97. DOI: 10.12737/article_5bab4a1faf4647.89808411

For citation:

Koshelnik V.M., Beknazaryan D.V. To the determination of the temperature field in the refractory masonry of the melting tank of the glass furnace. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 9, pp. 93–97. DOI: 10.12737/article_5bab4a1faf4647.89808411