УДК 666.1.031.2: 536.24

В.М. КОШЕЛЬНИК, докт. техн. наук, ***Д.В. БЕКНАЗАРЯН***, аспирант,
Е.В. ХАВИН, НТУ «ХПИ»

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ОГНЕУПОРНОЙ КЛАДКЕ ВАРОЧНОГО БАСЕЙНА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Наведено результати рішення двомірної задачі нестаціонарної теплопровідності в огородженні скловарної печі при наявності повітряного охолодження та багатошарової ізоляції з урахуванням пристінного охолодженого шару скломаси. Виконано порівняння отриманих розрахункових даних з даними експериментальних досліджень.

The results of solving 2–D problem of heat conductivity in encluosure side of glass features of bathing type glass furnaces with taking into account layer of cooled glass, air cooling, multilayer insulation are presented. Comparison of the design data with the experimental data is made.

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, 2]. Основной 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. Ранее нами была разработана одномерная математическая модель, позволяющая определить распределение огнеупоров в различных зонах стеновых огнеупорных брусьев [3].

В данной работе, основываясь на изложенных в работах [3, 4] предпосылках, математическая модель процесса теплопереноса была уточнена учё-

том 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.

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 сочетанием с принудительным воздушным охлаждением.

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

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\text{a}(t)\frac{\partial t}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\text{a}(t)\frac{\partial t}{\partial y}\right]=c(t)\text{°}(t)\frac{\partial t}{\partial^2} \qquad (1)$$

где $\text{a}(t)$, $c(t)$, $\text{°}(t)$ – коэффициент теплопроводности, теплоёмкость и плотность материала зависящие от температуры, соответственно.

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

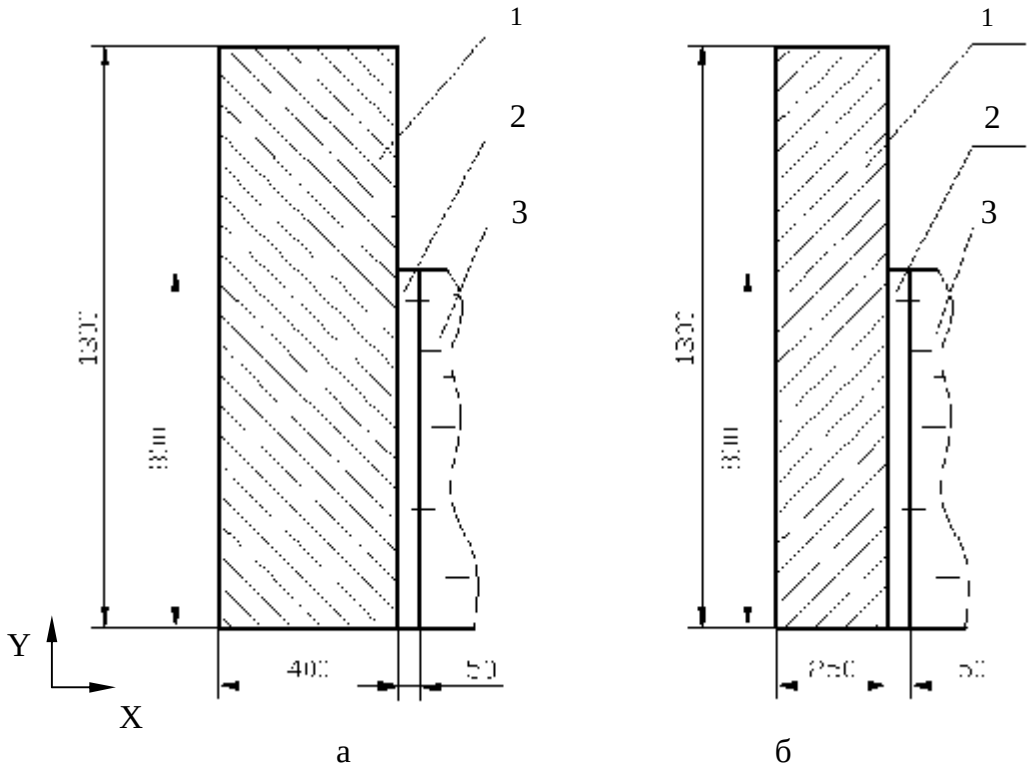
В случае если геометрия, теплофизические характеристики материалов, начальные условия, определяющие температурное поле тела при τ = 0 известны, её необходимо дополнить граничными условиями, которые выделяют конкретную задачу из всего класса задач теплопроводности. Для решения поставленной задачи мы используем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

$$t_n(x,y,^2)=f(x,y,^2) \qquad (2)$$

и третьего рода

$$\sim(x, y, ², t_n)(t_n - t_p) = ª(t)\frac{\partial t}{\partial x}. \qquad (3)$$

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



а б

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 определёна величина удельной плотности теплового потока $q_p = 2960$ Вт/м^2, через ограждения брусьев бассейна стекловаренной печи при естественном воздушном охлаждении.

На рисунке 2 представлено распределение температур по толщине огне-

упорного бруса по данным экспериментальных измерений температур в брусе [2], на основе которого рассчитана величина удельной плотности теплового потока $q_э$ = 2675 Вт/м^2.

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/(м^{2}К)	10
температура на внутренней поверхности стенки, °С	1300
средняя температура стеновых брусьев в начальный момент времени, °С	750

Таблица 2

Теплофизические свойства материалов боковых стен

Материал	Плотность, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Бакор 33	3500	$4{,}07 + 0{,}2686\cdot10^{-3}\cdot t$
Шамот	1860	$0{,}7 + 0{,}64\cdot10^{-3}\cdot t$
Ячеистый фосфатный бетон	950	$0{,}348 + 10^{-4}\ t$
Шамотоволоконная плита		
ШВП–1150	375	$0{,}130 + 10^{-4}\ t$
ШВП–1350	500	$0{,}07 + 0{,}30\cdot10^{-3}\ t$
Перлиталь	225	$0{,}068 + 0{,}9\cdot10^{-4}\ t$
Керамовермикулитовые плиты	350	$0{,}085 + 0{,}21\cdot10^{-3}\ t$

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

Найденная нами величина погрешности расчётных данных относительно

экспериментальных составляет 9,6 % и лежит в допустимом для практического использования интервале.

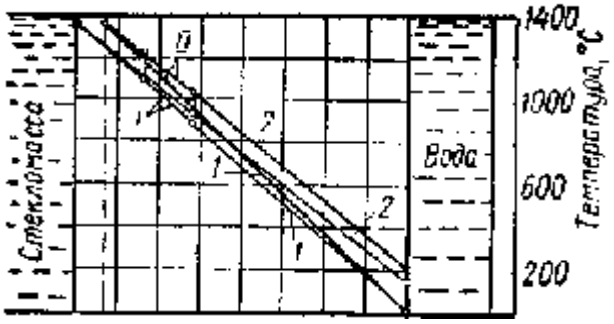


Рис. 2. Распределение температур в шамотном брусе толщиной 400 (I) и 365 мм (II) при водяном (1) и воздушном (2) охлаждении

На основе рассмотренной модели, проведён расчёт температурного поля для плавленолитого огнеупорного материала бакор 33, получившего широкое применение в строительстве стекловаренных печей. Этот материал имеет более высокую стеклостойкость про сравнению с шамотом, что позволяет уменьшить толщину стенового бруса до 250 – 300 мм. Кривые распределения температур на рисунке 3, соответствуют геометрическим соотношениям, которые представлены ранее на рисунке 1.

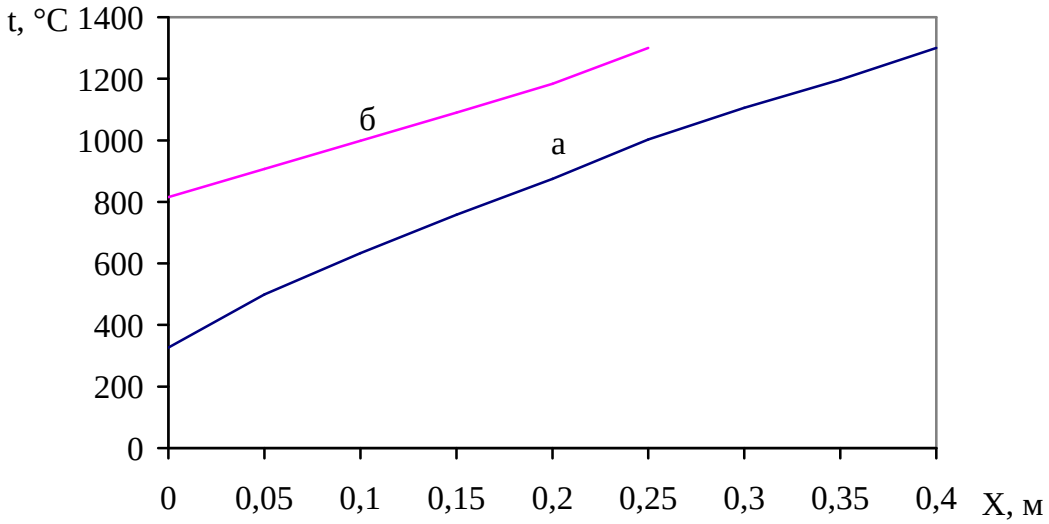


Рис. 3. Расчётное распределение температуры в стеновом брусе выполненном из шамота (а) и бакора 33(б).

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.

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.

Список литературы: 1. *Козлов А.С.* Теплотехника регенеративных стекловаренных печей. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 143 с. **2**. *Захариков Н.А.* Теплообменные процессы в стекловаренных печах. – К.: Гостехиздат, 1962. – 245 с. **3.** *Кошельник В.М., Бекназарян Д.В.* Постановка задачи оптимизации тепловой изоляции варочной зоны стекловаренной печи с учётом динамики разрушения стенового бруса. // Вестник «НТУ» ХПИ. – Харьков: «НТУ» ХПИ, 2007. – № 32. – С. 40 – 46. **4.** *Кошельник В.М., Хавин Е.В.* Постановка задачи оптимизации режима охлаждения варочного бассейна стекловаренной печи. // Вестник «НТУ» ХПИ. – Харьков: «НТУ» ХПИ, 2003. – № 11. – С. 73 – 78. **5.** *Племянніков М.М., Крупа О.А.* Хімія та теплофізика скла: Навчальний посібник. – К.: НТУУ „КПІ”, 2000. – 560 с.

Поступила в редколлегию 24.05.08