УДК 666.1.031.2: 536.24

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВАРОЧНОЙ ЗОНЫ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ С УЧЁТОМ ДИНАМИКИ РАЗРУШЕНИЯ СТЕНОВОГО БРУСА

Розглянуто особливості роботи скловарних печей ванного типу, що пов’язані з руйнуванням вогнетривкої кладки при взаємодії її з розплавом скломаси. Запропонована методика досліджень і сформульована постановка задачі для дослідження теплового стану огородження при умові використання теплової ізоляції і повітряного охолодження з урахуванням динаміки корозійного руйнування вогнетривів басейну скловарної печі.

The specific features of bathing type glass furnaces operation connected with destruction of a fire-resistant laying during its interacting with melt of glass melt are observed. The research technique is offered and the statement of problem for research of a thermal condition of a fence using a heat insulation and the air cooling is formulated. This research technique considers the dynamics of the corrosion destruction of refractories of a glass furnace basin.

Постановка задачи. Высокотемпературные плавильные агрегаты ванного типа стекольного производства характеризуются значительным уровнем тепловых потерь через наружные ограждения зоны. Их величина, по данным работ [1, 2], может превышать 20 %, что приводит к нерациональному использованию топлива – природного газа. Применение тепловой изоляции для снижения тепловых потерь через ограждения требует учета реальных условий работы агрегатов. При этом необходимо учитывать процессы, связанные с высокотемпературным физико-химическим взаимодействием огнеупорной кладки с расплавом стекломассы, которые сопровождаются разрушением слоя огнеупоров со стороны расплава [3, 4, 5].

По данным многочисленных исследований в ванных стекловаренных печах участками наиболее подверженными износу являются боковые стеновые брусья на уровне зеркала стекломассы и брусья в районе протока [1, 2, 5]. Как известно, срок службы стеновых огнеупорных брусьев варочной зоны определяет в основном длительность кампании печи.

Поэтому главной задачей по продлению периода работы является увеличение стойкости огнеупорных материалов в зонах интенсивного разрушения. В настоящее время эта задача решается с помощью различных видов

принудительного охлаждения – воздушного, водяного, реже испарительного охлаждения, а так же применением дорогостоящих стеклостойких материалов [1, 2, 5, 6, 7].

В условиях роста цен на природный газ, не менее важной задачей является повышение тепловой эффективности процесса варки стекла, что достигается путём нанесения тепловой изоляции на элементы ограждения ванны, свод и подину печи [1, 8].

Данное исследование является дальнейшим развитием серии работ, выполненных на кафедре теплотехники НТУ ХПИ, которые направлены на разработку мероприятий по повышению стойкости варочного бассейна путем применения различных способов охлаждения и определения оптимальных параметров воздушного охлаждения наружной поверхности стенового бруса стекловаренной печи в зоне интенсивной коррозии на уровне зеркала стекломассы [1, 8].

В публикациях [3, 5, 7] показано, что определяющим параметром при определении скорости коррозии огнеупоров является температура стекломассы. Немаловажную роль играет состав стекломассы и типы применяемых огнеупоров. Однако в некоторых работах отмечается, что интенсивное охлаждение стеновых брусьев приводит не только к положительному эффекту – замедлению коррозии стеновых брусьев, но и к снижению интенсификации процессов стекловарения, вследствие роста потерь теплоты. Известно, что есть основания считать, что нанесение тепловой изоляции не приводит к значительному сокращению кампании печи, но способствует повышению тепловой эффективности агрегата [8].

В тоже время в литературе практически отсутствуют сведения о характере коррозионного износа огнеупорного бруса в случае использования тепловой изоляции для ограждений печи.

Нерешённая часть проблемы. В этом случае актуальной является задача поиска выбора тепловой изоляции для стен ванны, правильный выбор которой позволит минимизировать тепловые потери в агрегате при условии применения воздушного охлаждения наружной поверхности части огнеупоров. Отличительной особенностью настоящего исследования по отношению к работам [4, 5] является постановка задачи расчета температурного состояния ограждения стекловаренной печи с учетом влияния динамики процесса коррозии огнеупорного бруса при наличии тепловой изоляции.

Таким образом, **целью данного** этапа исследования является разработка

методики расчета и выбора материалов оптимальной тепловой изоляции варочной зоны стекловаренной печи с учетом динамики разрушения огнеупоров.

Изложение основного материала. Рассмотрим схему теплового взаимодействия элементов наружного охлаждения варочного бассейна стекловаренной печи с расплавом стекломассы, с газовой и воздушной средой. Рассмотрим фрагмент теплоизолированного стенового бруса, представленный на рисунке, где показан характер разрушения огнеупоров в процессе эксплуатации.

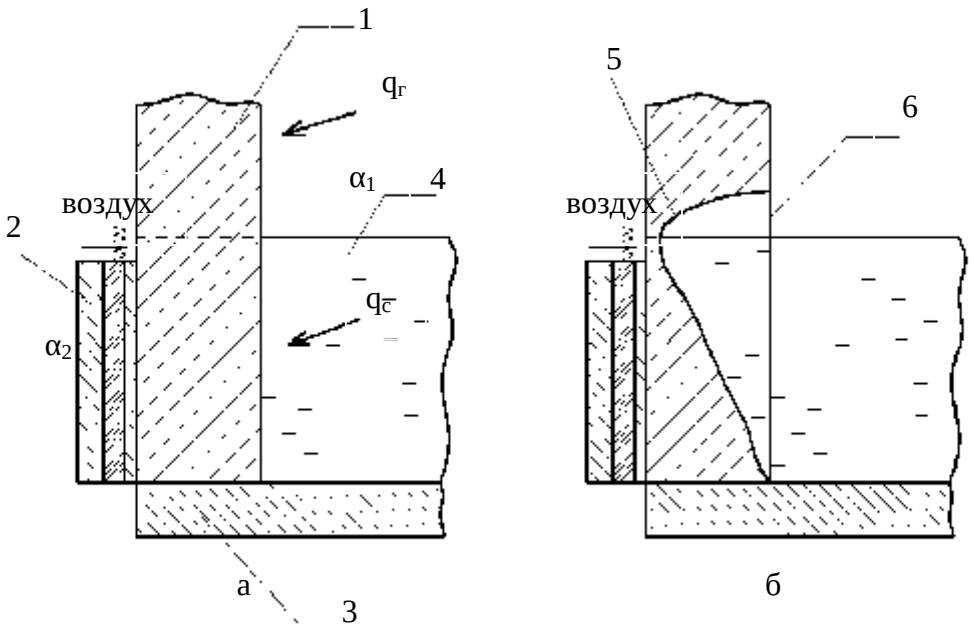

Рисунок – Ограждение рабочей зоны стекловаренной печи (а) начало эксплуатации, (б) конец эксплуатации:
1 − стеновой брус; 2 − многослойная тепловая изоляция; 3 − подина;
4 − стекломасса; 5 − профиль огнеупора на заключительном этапе кампании печи; 6− зона активной коррозии

На рисунке приняты следующие обозначения: $q_г$ – плотность теплового потока со стороны газового пространства, Вт/м^2; $q_с$ – плотность теплового потока со стороны стекломассы, Вт/м^2, α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи по газовой и воздушной сторонам соответственно.

Учитывая особенности граничных условий теплообмена для определения температурного состояния элементов ограждения с известными геометрическими параметрами необходимо решить нестационарную двухмерную задачу теплопроводности, которая, в общем виде, описывается дифференци-

альным уравнением:

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

с граничными условиями первого рода $\text{t}_{\text{П}}=\text{f}(\text{x},\text{y},\tau)$ или второго рода $\text{q}_{\text{П}}=\text{f}(\text{x},\text{y},\tau)$ на поверхности, обращенной в рабочую зону бассейна и третьего рода $\alpha(x,y,\tau,t_n)(t_n-t_p)=\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial x}$ на наружной поверхности ограждения.

Как видим, расчетный элемент состоит из нескольких основных массивов – непосредственно пакета многослойной изоляции и огнеупорного стенового бруса толщина которого изменяется в процессе эксплуатации. Решение уравнения (1) в данном случае связано с необходимостью учета изменения толщины огнеупорного бруса во времени, что связано с его разрушением при контакте с расплавом стекломассы. Зная величину скорости коррозии огнеупоров *W*, находящейся в контакте со стекломассой, как:

$$W = dL / d², \qquad (2)$$

где L – разрушаемая часть толщины стенового бруса, а ² – время, можно определить фактическую величину изменения толщины бруса за период времени $d²$ по формуле:

$$dL = W\,d², \qquad (3)$$

Общая продолжительность кампания стен бассейна определяется коррозионной устойчивостью применяемого огнеупорного материала, его толщиной, температурой и составом стекломассы, а также условиями охлаждения наружной поверхности стен бассейна:

$$T = \int_0^{L_б} dL / W(L). \qquad (4)$$

Здесь: $L_б$ – начальная толщина стенового бруса.

Следуя представленным в работах данным, скорость коррозии описывается уравнением Аррениуса [3, 4, 9]:

$$W = e^{(A^* - B/t_B^*)}, \qquad (5)$$

где $A^* = A\ ln\ 10$, $B^* = B\ ln\ 10$ – константы Аррениуса, $t^*_B = t_B + 273$ температура внутренней поверхности стенового бруса, t_B- температура внутренней поверхности стенки.

Константы A^* и B^* зависят от типа огнеупорного материала, вида стекла и определяются экспериментально [3, 4, 9]. Температура огнеупоров t_B зависит от теплофизических свойств охлаждающей среды (температура и коэффициент теплоотдачи), теплового сопротивления стенки, температуры стекломассы, причем величина t_B за период кампании печи меняется вследствие разъедания стенового бруса. Ее величина зависит также от интенсивности режима воздушного охлаждения.

Величину плотности теплового потока со стороны $q_г$ газового пространства и расплава стекла $q_с$ можно определить по методике предложенной Н.А. Захариковым в работе [5].

Распределение температур по толщине тепловой изоляции и в огнеупорном брусе в стационарном режиме можно рассчитать, используя известные уравнения теплопередачи [10], предполагая, что коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 заданы.

Удельная плотность теплового потока огнеупорной кладки без тепловой изоляции определим как

$$q = \frac{t_1 - t_2}{1/\sim_1 + ¢/a + 1/\sim_2} \qquad (6)$$

где t_1 и t_2 – температуры продуктов сгорания (стекломассы) и наружного воздуха, δ, λ – толщина и коэффициент теплопроводности стенового бруса.

В данном случае, в отличие от работы [11], учтено наличие многослойной тепловой изоляции, поэтому плотность теплового потока с учетом сум-

марного термического сопротивления $¢_i/a_i$ каждого слоя изоляции и огнеупорного бруса составит:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\sim_1} + \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{¢_i}{a_i} + \frac{¢}{a} \right) + \frac{1}{\sim_2}} \qquad (7)$$

Значение температуры внутренней поверхности огнеупорного бруса $t_{вн}$, необходимое для расчета коррозионного износа огнеупоров определим используя значение q, найденное по зависимости (7) как:

$$t_{вн} - t_2 = q\left(\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{¢_i}{a_i} + \frac{¢}{a} \right) + \frac{1}{\sim_2} \right) \qquad (8)$$

При проведении расчетов, изменяя толщину $¢_i$ и подбирая материал изоляции (коэффициент теплопроводности a_i), можно получить минимальное значение величины тепловых потерь, что приводит к увеличению тепловой эффективности работы агрегата. Необходимо учесть тот факт, что уменьшение тепловых потерь через ограждения ведёт к повышению температуры внутренней поверхности огнеупора, которая может приближаться к температуре греющих газов или расплава стекломассы. Это обстоятельство может стать определяющим при выборе способов охлаждения и тепловой изоляции.

Таким образом, на основе решения сформулированной задачи путем численного расчета периода стойкости огнеупора и теплопередачи через ограждение может быть в дальнейшем решена задача оптимальной продолжительности кампании стекловаренной печи. Для этого целесообразно учитывать технико-экономические показатели агрегата при использовании различных целевых функций, в том числе и в виде величины прибыли с учетом стоимости ремонта стекловаренной печи [12].

Выводы. Рассмотрены особенности работы огнеупорной кладки варочного бассейна стекловаренной печи. Показано, что выбор материала и толщины тепловой изоляции варочной зоны стекловаренной печи необходимо производить с учетом коррозионного износа огнеупорной кладки. Предложенное решение задачи теплопроводности в такой постановке позволит про-

гнозировать срок службы огнеупоров в случае применения различного сочетания огнеупорных и изоляционных материалов с воздушным охлаждением для вновь проектируемых печей и проводить диагностику ресурса работы действующих стекловаренных печей ванного типа.

Список литературы: 1. *Гойхман В.Ю., Руслов В.Н., Костыря В.А.* Печная теплотехника в производстве стекла. – Харьков: Факт, 1997. – 288 с. **2**. *Козлов А.С.* Теплотехника регенеративных стекловаренных печей. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 143 с. **3.** *Павловский В.К., Соболев Ю.С* Влияние температуры на коррозию огнеупоров в расплавах стёкол. // Стекло и керамика. – 1991. – № 12. – С. 12 – 14. **4**. *Попов О. Н.* О кинетике взаимодействия плавленолитых огнеупоров с расплавами промышленных стекол. // Исследования в области огнеупоров для стекловаренных печей. – М, – 1984. – С. 8 – 17. **5**. *Захариков Н.А.* Теплообменные процессы в стекловаренных печах. – К.: Гостехиздат, 1962. – 245 с. **6.** *Гущин С.Н., Кутьин В.Б., Бондар П.Н.* Совершенствование тепловой работы стекловаренных печей. // Стекло и керамика. – 2000. – № 6. – С. 6 – 8. **7**. *Кошельник В.М. Селихов Ю.А., Кошельник А.В., Долженко Е.Ю.* Совершенствование конструктивных элементов системы охлаждения высокотемпературных агрегатов ванного типа // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2004. − № 2. − С. 22 − 27. **8.** *Фокин В.В., Кондрашов В.И. и др.* Опыт эксплуатации стекловаренной печи с теплоизолированным варочным бассейном. // Стекло и керамика. – 2000. – № 2. – С 8 – 9. **9.** *Павловский В.К., Соболев Ю.С.* Температурные зависимости коррозии огнеупоров в расплавах бариевоборсиликатных стёкол. // Стекло и керамика. – 1992. – № 6. – С 14 – 15. **10.** *Михеев М. А., Михеева И.М*. Основа теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с. **11.** *Кошельник В.М., Хавин Е.В.* Постановка задачи оптимизации режима охлаждения варочного бассейна стекловаренной печи. // Вестник «НТУ» ХПИ Сборник научных трудов «Химія, химічна технологія та екологія». – Харьков «НТУ» ХПИ, 2003. – № 11. – С. 73 – 78.. **12.** *Кошельник В.М., Кошельник А.В., Хавин Е.В.* Оптимизация процессов струйно–воздушного охлаждения варочного бассейна реактора для производства стекломассы. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 3/2 (15). – С. 115 – 121.

Поступила в редколлегию 29.10.07