

ласти. В области IV, в которой также наблюдается большое содержание стекла (40–70%), деформация образцов при обжиге не наблюдается ввиду высокой вязкости стекла.

Таким образом, уплотнение образцов происходит в результате появления непосредственного контакта между частицами кварцевого песка. Этот контакт образуется за счет избыточного давления в прослойке смачивающей жидкости, вызванного силами поверхностного натяжения жидкой фазы, расположенной между твердыми частицами кварцевого песка и имеющей форму линзы. На определенном этапе процесса спекания линзы расплава с различных контактных участков постепенно смыкаются между собой, перекрывая свободные каналы системы. При этом вытеснение газовой среды (воздуха) из внутренних областей спекаемого тела к его наружной поверхности затрудняется. Одновременно появляются поры внутри участков, занятых жидкой фазой. Процесс уплотнения и упрочнения начинает лимитироваться удалением воздуха из системы и скоростью "заплыwania" образовавшихся пор. Заплывание происходит под влиянием действующего на границе воздушных пор поверхностного натяжения. Результирующая сила поверхностного натяжения направлена внутрь воздушных пор. Внутреннее давление в заплывающих порах растет в соответствии с уменьшением их объема и замедляет сжатие, сближение частиц. При наступлении равновесия между действием сил поверхностного натяжения и внутренним давлением воздуха объем воздушных пор стабилизируется). Практический интерес представляет заштрихованный участок на диаграмме, отвечающий содержанию стекла, при котором исключается деформация керамики. В этой области можно получить достаточно прочную стеклокремнеземистую керамику (до $556 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$) при сравнительно невысокой температуре (800–850°С) обжига и содержания стекла 20–35%.

Я.В. Шкляр

СЛОЖНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ВАННЫХ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧАХ ПРЯМОГО НАГРЕВА

Одним из основных показателей эффективности работы ванн стекловаренных печей является тепловосприятие шихты и стекломассы. Повышение производительности печных агрегатов

и снижение удельных норм расхода топлива должно основываться на анализе тепловых процессов, протекающих в пламенном пространстве печи и в расплаве стекломассы.

В печах прямого нагрева передача тепла от движущихся излучающих продуктов сгорания топлива к поверхности шихты и стекломассы происходит путем радиационно-конвективного переноса в условиях струйного и рециркуляционного течения дымовых газов, турбулентной и молекулярной диффузии, а также излучения, поглощения и переизлучения энергии.

Рассмотрим систему уравнений, описывающую процессы, протекающие в пламенном пространстве печи. Будем полагать, что все процессы являются установившимися в тепловом и аэродинамическом отношении, а в пламенное пространство поступают продукты полного сгорания топлива. Поток продуктов сгорания будем считать несжимаемой жидкостью, условия движения — стационарными, а существенным для данного случая движения только действие сил внутреннего трения и инерционных, пренебрегая при этом силами давления, деформацией среды и гравитационными эффектами в потоке. Кроме того, полагаем, что вектор радиационного переноса теплоты имеет интегральное определение, так как результирующий поток лучистой энергии в каждом месте пространства определяется в зависимости от первичного излучения энергии со всех мест окружения. Продукты сгорания топлива, движущиеся в пламенном пространстве печи, обладают значительным тепловым излучением и большим дифференциальным коэффициентом поглощения. Поэтому для них можно с достаточной степенью точности принять диффузионное представление о векторе радиационного переноса энергии и записать его в градиентной форме [1, 2].

С учетом принятых предпосылок уравнения движения, неразрывности потока и переноса энергии соответственно можно представить в виде:

$$\mu \nu^2 \vec{w} - \rho (\vec{w}, \text{grad } T_r) \vec{w} = 0; \quad (1)$$

$$dw (\rho \vec{w}) = 0; \quad (2)$$

$$\vec{w} \rho C_p T_r - \lambda \text{grad } T_r - \lambda_{\text{л}} \text{grad } T_r = 0, \quad (3)$$

где w и T_{Γ} - соответственно скорость и температура продуктов сгорания топлива; μ , λ , C_p и ρ - соответственно коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности, теплоемкость и плотность продуктов сгорания топлива; σ_0 и $a(T_{\Gamma})$ - соответственно константа излучения абсолютно черного тела и эффективный спектральный коэффициент поглощения дымовых газов;

$\lambda_{\text{л}} = \frac{\sigma_0 T_{\Gamma}^3}{a(T_{\Gamma})}$ - коэффициент радиационной теплопровод-

ности дымовых газов.

В качестве условий однозначности примем соответствующие для каждой технологической зоны печи геометрические, температурные и скоростные краевые условия, а также уравнения теплового баланса пламенного пространства и передачи тепла от движущихся излучающих дымовых газов к поверхности шихты или стекломассы.

1. Геометрическая форма и размеры поверхности теплообмена F_1 , поперечного сечения печи F_2 и горелочных фурм F_3 .

2. Скоростное поле дымовых газов в печном объеме, которое задается полем средних значений скорости w , отнесенных к поверхности F_2 .

3. В качестве начальной температуры потока дымовых газов принимается теоретическая температура горения топлива T_0 ; в соответствии со спецификой работы печей прямого нагрева температуры T_{Γ} и поверхности теплообмена $T_{\text{ст}}$ считаем величинами постоянными.

4. Уравнение теплового переноса от продуктов сгорания топлива к тепловоспринимающей поверхности

$$Q_{\text{сл}} = \alpha_{\text{сл}} (T_{\Gamma} - T_{\text{ст}}) F_1 = \left[q_{\text{л}}^{\text{рез}} + \alpha_{\text{к}} (T_{\Gamma} - T_{\text{ст}}) \right] F_1 \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{сл}} = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}$ - соответственно коэффициенты сложного, лучистого и конвективного теплообмена; результирующий лучистый поток

$$q_{\text{л}}^{\text{рез}} = \varepsilon_{\text{ст}} (T_{\text{ст}}) (q_{\text{л}}^{\text{пад}} - \sigma_0 T_{\text{ст}}^4) F_1, \quad (5)$$

где $\epsilon_{\text{ст}}(T_{\text{ст}})$ - степень черноты поверхности стекломассы как функция температуры $T_{\text{ст}}$; $q_{\text{л}}^{\text{пад}}$ - лучистый поток, падающий на поверхность стекломассы.

5. Условия теплообмена на границе дымовые газы - ограждающие поверхности задаем параметрически (на основании опытных данных) как потерю тепла через кладку $Q_{\text{кл}}$.

6. Уравнение теплового баланса печи

$$G_{\text{ш}} C_{\text{ш}} T_{\text{ш}} + BV_{\text{г}} C_{\text{р}} (T_{\text{о}} - T_{\text{г}}) = G_{\text{ст}} C_{\text{ст}} T_{\text{ст}} + Q_{\text{кл}}, \quad (6)$$

где $G_{\text{ш}}, C_{\text{ш}}, T_{\text{ш}}$ - соответственно количество, теплоемкость и температура шихты, загружаемой в печь; $B, V_{\text{г}}$ - расход топлива и удельный объем дымовых газов; $G_{\text{ст}}, C_{\text{ст}}$ - производительность печи по стекломассе и теплоемкость стекломассы.

7. Принимаем, что значения всех физических параметров, содержащихся в исходной системе уравнений и краевых условиях, известны.

Совокупность системы уравнений (1-3) и принятых условий однозначности дает достаточно полное аналитическое описание процесса внешнего теплообмена для рассматриваемой задачи. При этом внешняя задача теплообмена (в пламенном пространстве) стыкуется с внутренней задачей (теплообмен в расплаве стекломассы) путем задания граничных условий четвертого рода - полей температур и тепловых потоков на поверхности стекломассы.

Система уравнений (1-3) и принятые условия однозначности были обработаны методами теории подобия, что позволило получить соответствующую критериальную зависимость в виде:

$$\frac{T_{\text{ст}}}{T_{\text{о}}} = f\left(\frac{T_{\text{г}}}{T_{\text{о}}}; \frac{T_{\text{ш}}}{T_{\text{о}}}; \frac{wl\rho}{\mu}; a(T_{\text{г}}); \epsilon_{\text{ст}}(T_{\text{ст}}); \frac{\sigma_{\text{о}} T_{\text{г}}^3}{\lambda}; \frac{\alpha_{\text{к}}}{\sigma_{\text{о}} T_{\text{о}}^3}; \frac{\nu_{\text{г}}}{a_{\text{г}}}; \frac{BV_{\text{г}} C_{\text{р}}}{\sigma_{\text{о}} T_{\text{г}}^3}; \frac{q_{\text{кл}}}{\sigma_{\text{о}} T_{\text{о}}^4}; \frac{G_{\text{ст}} \cdot C_{\text{ст}}}{\sigma_{\text{о}} T_{\text{о}}^3}\right). \quad (7)$$

В уравнении (7), кроме вышеуказанных, приняты обозначения:

1 - определяющий размер (эквивалентный диаметр поперечного сечения пламенного пространства печи); $a_{\text{г}}$ и $\nu_{\text{г}}$ - соответ-

венно коэффициенты температуропроводности и кинематической вязкости дымовых газов.

Введем следующие обозначения:

$$\theta_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{ст}}}{T_0}; \theta_{\Gamma} = \frac{T_{\Gamma}}{T_0}; \pi_k = \frac{\alpha_k}{\sigma_0 T_0^3}; \pi_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{\sigma_0 T_0^4}; \pi_{\text{ст}} = \frac{G_{\text{ст}} C_{\text{ст}}}{\sigma_0 T_{\Gamma}^3 l^2}$$

Тогда с учетом традиционного обозначения критериев подобия уравнения (7) можно записать в виде

$$\theta_{\text{ст}} = f(\theta_{\Gamma}; Re; Bu; \epsilon_{\text{ст}}(T_{\text{ст}}); I_w; \pi_k; Pr; Bo; \pi_{\text{кл}}; \pi_{\text{ст}}) \quad (8)$$

В этом уравнении опущена безразмерная температура шихты, так как температура поверхности $T_{\text{ст}}$ является в общем случае достаточно надежной оценкой температурного поля на поверхности нагрева.

Известно, что соблюдение полного подобия процесса сложного теплообмена требует точного выполнения всех условий, характеризующих этот процесс. Однако реализовать такие условия на практике невозможно. Поэтому для рассматриваемой задачи примем метод локального приближенного моделирования с реализацией наиболее существенных для процесса явлений. Для этого проведем упрощение критериального уравнения (8) с помощью метода физического элиминирования [1].

Как показали результаты опытов, проведенных на промышленных стекловаренных печах прямого нагрева [3], условия теплообмена в пламенном пространстве этих печей являются автомодельными по критерию Рейнольдса Re , и этот критерий можно исключить из зависимости (8).

Из этой зависимости можно также исключить критерий Бугера Bu и Прандтля Pr , ибо при сжигании в печах с примерно равной производительностью природного газа с одинаковыми избытками воздуха (как правило, оптимальная величина коэффициента избытка составляет 1,05) физические параметры продуктов сгорания топлива изменяются незначительно.

Как показали специальные опыты [2], критерий Иванцова I_w , представляющий собой критерий лучисто-кондуктивного переноса тепла в потоке дымовых газов, заметно не сказывается на теплообмене (даже при значительном изменении начальной температуры газа). Таким образом, и этот критерий можно исключить. При выработке стекломассы одного состава из рас-

смотрения возможно исключить и величину степени черноты ее поверхности $\epsilon_{\text{ст}} (T_{\text{ст}})$.

Потери тепла в окружающую среду, которые оцениваются критерием $\Pi_{\text{кл}}$, для заданной конструкции печи при известном температурном уровне процесса остаются неизменными и их можно задать параметрически. Балансовые соотношения по стекломассе, которые учитываются критерием $\Pi_{\text{ст}}$, рассчитываем отдельно (на основании теплового и материального балансов печи). С учетом принятых упрощений зависимость (8) примет вид

$$\theta_{\text{ст}} = f_1 (Bo; \Pi_{\text{к}}; \theta_{\text{г}}). \quad (9)$$

В первом приближении уравнение (9) может быть аппроксимировано выражением, которое было получено нами ранее для условий адиабатической камеры [3]:

$$\frac{\epsilon_b}{Bo} \left[(\tau \theta_{\text{г}}^2 - \theta_{\text{ст}}^4) + \frac{\lambda_{\text{к}}}{\epsilon_b \sigma_o T_o^3} (m \theta_{\text{г}}^{0,5} - \theta_{\text{ст}}) \right] + \theta_{\text{г}} - 1 = 0, \quad (10)$$

где ϵ_b - видимая степень черноты дымовых газов; τ и $m(\tau)$ - опытные коэффициенты, характеризующие температурное поле в пламенном пространстве печи.

Уравнение (10) с применением указанных выше обозначений может быть записано в виде

$$\epsilon_b \left[\frac{1}{Bo} (\tau \theta_{\text{г}}^2 - \theta_{\text{ст}}^4) + \frac{1}{\epsilon_b} \frac{\Pi_{\text{к}}}{Bo} (m \theta_{\text{г}}^{0,5} - \theta_{\text{ст}}) \right] + \theta_{\text{г}} - 1 = 0. \quad (11)$$

Учитывая, что критерий Стентона, оценивающий конвективный перенос тепла от движущихся продуктов сгорания топлива к поверхности нагрева, возможно определить по выражению

$$St_{\text{к}} = \frac{\lambda_{\text{к}}}{w \rho C_p},$$

а критерий Больцмана (критерий радиационно-конвективного теплообмена)

$$Bo = \frac{w \rho C_p}{\sigma_o T_o^3},$$

уравнение (11) примет вид

$$\frac{\varepsilon_b}{Bo} (\zeta \theta_{\Gamma}^2 - \theta_{\text{ст}}^4) + St_k (m \theta_{\Gamma}^{0,5} - \theta_{\text{ст}}) + \theta_{\Gamma} - 1 = 0. \quad (12)$$

Нами было произведено решение уравнения (12) для широкого диапазона изменения температурных и нагрузочных характеристик процесса [5]. Результаты решения были сопоставлены с экспериментальными данными по исследованию сложного теплообмена в промышленных стекловаренных печах прямого нагрева с площадью зеркала варочной части 8,45 [3] и 52 м² [5]. В процессе экспериментального исследования производилось измерение всех величин, необходимых для изучения закономерностей теплового переноса в соответствии с зависимостью (8). Разделение сложного теплообмена на лучистую и конвективную составляющие выполнялось по методике [6]. В табл. 1 приводятся некоторые результаты этих экспериментальных исследований.

Из таблицы видно, что величина конвективной составляющей в сложном теплообмене до 25%, и, следовательно, имеются реальные возможности дальнейшей интенсификации теплообмена за счет воздействия на нее.

Таким образом, проведенное аналитическое и экспериментальное исследование сложного теплообмена позволило получить некоторые расчетные характеристики этого процесса. Накопление необходимого числа экспериментальных данных по теплообмену в стекловаренных печах и их обработка в соответствии с

Табл. 1. Результаты эксперимента

Показатели	Численное значение величин
Безразмерная температура льмовых газов θ_{Γ}	0,73 - 0,79
Безразмерная температура поверхности стекломассы $\theta_{\text{ст}}$	0,70 - 0,76
Коэффициент лучистого теплообмена $\alpha_{\text{л}}$, Вт/м ² , град	550 - 912
Коэффициент конвективного теплообмена $\alpha_{\text{к}}$, Вт/м ² , град	185 - 303
Критерий Стентона (критерий конвективного теплообмена) St_k	0,39 - 0,61
Критерий Больцмана Bo	0 - 0,57
Доля конвекции в сложном теплообмене	0,25

уравнением (9) могут послужить базой для создания инженерного метода теплового расчета печей прямого нагрева.

Л и т е р а т у р а

1. Андрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. М., 1972. 2. Шорин С.Н. Теплопередача. М., 1964. 3. Шкляр Я.В. и др. - В сб.: Теплообмен и эксплуатация стекловаренных печей в производстве стекловолокна. М., 1971. 4. Лебедев В.И., Шкляр Я.В. - "Изв. вузов. Сер. "Энергетика" 1966, №12. 5. Шкляр Я.В. Теоретическое и экспериментальное исследование внешнего теплообмена в установках производства стекловолокна. Отчет по научно - исследовательской работе. Витебск, 1975. 6. Лебедев В.И., Шкляр Я.В. В сб.: Теплообмен в печах и котельных установках, № 70. М., 1970.

С.Г. Ковчур, А.П. Гайдук

К ВОПРОСУ О КОМПЛЕКСНОМ ПОДХОДЕ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ И УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВА СТЕКЛА

Актуальными вопросами для стекольной промышленности являются повышение эффективности работы стекловаренных печей и улучшение качества стекломассы и готовой продукции.

На Борисовском стеклозаводе им.Ф.Э.Дзержинского в течение многих лет проводились систематические исследования по изучению влияния технологического топлива на технологию варки стекла в ванной печи [1]. Установлено, что образующиеся вследствие сгорания моторного топлива ДТ-1 красящие примеси железа, хрома, никеля, ванадия, кобальта и меди, соприкасаясь с поверхностью стекломассы, окрашивают ее. Причем верхние окрашенные слои стекломассы, и нижние, бесцветные имеют разную плотность и вязкость, т.е. в варочной части печи возникает слабая конвекция. Это является одной из основных причин образования свили, физической и химической неоднородности, изменения твердости, а в конечном итоге приводит к постепенному ухудшению колера стекломассы в рабочей части печи.