

УДК 669.183.213: 666.1.031.2

А.В. Кошельник, канд. техн. наук, доц., ИПМаш
НАН Украины, г. Харьков,
В.М. Кошельник, д-р. техн. наук, проф., Нац.
техн. ун-т "ХПИ", г. Харьков,
Е.Ю. Долженко, науч. сотрудник, ООО "Экотерм",
г. Харьков

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА ГОРЕНИЯ НА РАБОТУ ВАННОЙ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

О.В. Кошельник, В.М. Кошельник, Е.Ю. Долженко. **Методика оцінки впливу регенеративного підігріву повітря горіння на роботу ванної скловарної печі.** Розроблено методику розрахунку впливу зміни температури нагріву повітря в регенераторах на температурний режим роботи плавильних печей. Визначено вплив режимних параметрів регенераторів на теплову ефективність роботи скловарної печі ванного типу.

A.V. Koshelnik, V.M. Koshelnik, E.Yu. Dolzhenko. **Procedure of evaluating the regenerative air preheating influence on tank glass melting furnace.** The procedure of calculating of the regenerative air preheat temperature influence on the fuel furnaces termal conditions is developed. The influence of regenerators operation variables on the tank glass melting furnace termal efficiency is determined.

Высокотемпературные технологические процессы, реализуемые в реакторах различного целевого назначения, широко используются во многих отраслях промышленности, включая черную и цветную металлургию, производство стройматериалов [1...4]. В большинстве технологических агрегатов в качестве источника тепловой энергии используется дорогостоящий природный газ. Несмотря на значительный объем исследований, направленных на совершенствование конструкций агрегатов, эффективность использования теплового потенциала топлива остается низкой из-за высокого уровня тепловых потерь в окружающую среду через ограждения и с отходящими продуктами горения [2, 3]. Пламенные печи имеют низкий КПД, который составляет всего 15...30 %, величина тепловых потерь с уходящими продуктами сгорания может достигать 70 %. Поэтому научные исследования и разработки по энергосбережению, учитывая современную тенденцию роста стоимости энергоносителей, весьма актуальны.

Повышение эффективности использования топлива в высокотемпературных технологических установках (ВТУ) может быть достигнуто разными способами, в т.ч. и путем уменьшения тепловых отходов, регенеративного использования теплового потенциала отходов, внешнего использования отходов в технологических и энергетических целях.

Особенно важно второе направление, которое связано с регенеративным использованием теплового потенциала отходов топливных печей и, прежде всего, теплового потенциала продуктов сгорания, температурный уровень которых за рабочей зоной может превышать 500, а в ряде агрегатов и 1000 °С. Анализ тепловых схем ВТУ с топливным источником энергии, в т.ч. с регенеративным теплоиспользованием, в общем виде выполнен [1].

Следует отметить, что во многих промышленных производствах технологические агрегаты содержат группу регенераторов для высокотемпературного (свыше 700 °С) подогрева воздуха горения. Причем регенераторы могут иметь автономную систему отопления, например, воздухонагреватели доменных печей. Вместе с тем, существует широкая номенклатура агрегатов, таких как мартеновские печи, печи коксохимического производства, стекловаренные печи ванного типа, которые оборудуются регенеративными теплообменниками для нагрева воздуха горения уходящими дымовыми газами. Причем эти регенераторы по сравнению с доменными воздухонагревателями имеют относительно небольшие размеры, однако отличаются большим разнообразием конструкций, а их эксплуатация и температурные режимы технологически связаны с условиями работы топливных печей. Конструктивные особенности этих регенераторов,

их расположение, тип используемых огнеупорных материалов, температурные режимы в значительной степени зависят от конструкции основного технологического агрегата, его параметров и вида выпускаемой продукции. Указанные обстоятельства значительно затрудняют разработку методик теплотехнических расчетов, влияют на трудоемкость проведения исследований.

Это привело к тому, что исследованиям этой группы регенераторов, в отличие от доменных воздушнонагревателей, уделялось мало внимания, чем объясняется недостаточная эффективность их работы, низкий уровень температуры нагрева воздуха горения, недостаточная стойкость огнеупорной насадки. Следует особенно выделить сложные условия работы регенераторов высокотемпературных технологических реакторов (ВТР) ванного типа, которые в настоящее время и на перспективу остаются основным типом реакторов для промышленного производства стекла. Их работа имеет специфические особенности, которые значительно усложняют исследование тепловых процессов в отличие, например, от нагревательных и термических печей. Поэтому требуется проведение дальнейших исследований по совершенствованию их конструктивных и режимных параметров.

Рассмотрим методику определения теплотехнических параметров стекловаренной печи с системой регенеративного подогрева воздуха и оценка влияния температуры нагрева воздуха горения в двухкамерных регенераторах на тепловой режим работы стекловаренной печи, отапливаемой природным газом [5...7], с учетом изменения коэффициента избытка воздуха по тракту (рис. 1). В данном случае имеет место сложный режим движения теплоносителей — продуктов сгорания и воздуха — при условии изменения их объемов из-за наличия присосов холодного воздуха.

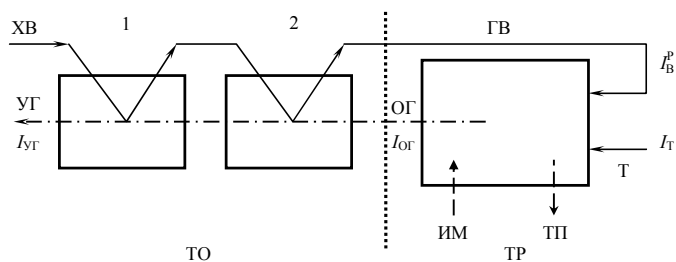


Рис. 1. Тепловая схема ванной стекловаренной печи с двухкамерным регенератором: ТО — теплообменник; ТР — технологический реактор; ИМ — исходные материалы (шихта); ТП — технологический продукт; Т — топливо; ГВ — горячий воздух; ХВ — холодный воздух; ОГ — отходящие газы; УГ — уходящие газы; I, II — насадочные камеры

Для определения температуры горения топлива в печи используют уравнение теплового баланса. Для установившегося теплового состояния агрегата располагаемая теплота, вносимая в топочное пространство рабочей камеры при использовании газообразного топлива,

$$Q_p = Q_n^c + I_B + I_T, \quad (1)$$

где Q_n^c — теплота сгорания газообразного топлива;

I_B — теплота, вносимая подогретым воздухом горения;

I_T — теплота, вносимая с подогретым топливом.

В общем случае, при работе агрегатов без подогрева топлива величина $I_T = 0$, а без подогрева воздуха горения $I_B = 0$. Для адиабатических условий, предполагая, что потери теплоты от химической и механической неполноты сгорания топлива отсутствуют, а его сжигание происходит при теоретически необходимом количестве воздуха (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$), можно определить теоретическую температуру горения топлива как

$$t_a = \frac{Q_p}{C'_{пг} V_{Г}(\alpha)},$$

где $C'_{pГ}$ — величина объемной удельной изобарной теплоемкости продуктов сгорания;

$V_{Г}(\alpha)$ — объем продуктов сгорания при соответствующем коэффициенте α избытка воздуха.

В реальных условиях работы стекловаренной печи действительная температура горения топлива в рабочей зоне

$$t_{гд} = \frac{Q_p - Q_{дис} - \sum Q_{пот}}{C'_{pГ} V_{Г}(\alpha)}, \quad (2)$$

где $Q_{дис}$ — теплота диссоциации трехатомных газов;

$\sum Q_{пот}$ — суммарная величина тепловых потерь, представляющая собой количество теплоты, воспринятое материалами плавки и теряемое через ограждения рабочей зоны печи.

Для плавильных печей особый интерес представляет оценка возможности повышения теплового потенциала топлива Q_p (1) за счет увеличения количества теплоты I_B , вносимой с нагретым в регенераторах воздухом горения.

Определение значений действительных температур для реальных объектов представляет довольно трудоемкую задачу. Поэтому в теплотехнических расчетах во многих случаях ограничиваются определением средних балансовых температур или используют модель “идеальной печи” в предположении отсутствия всех тепловых потерь, кроме потерь теплоты с уходящими дымовыми газами [4]. Для приближенной оценки влияния температуры нагрева воздуха на температуру горения следует считать, что диссоциация газов и тепловые потери отсутствуют, т.е. исключены из формулы (2) величины $Q_{дис}$ и $\sum Q_{пот}$. В этом случае действительная температура горения топлива в рабочей зоне

$$t_{гд} = \frac{Q_p}{C'_{pГ} V_{Г}(\alpha)} = \frac{Q_n^c + I_B + I_{Г}}{C'_{pГ} V_{Г}(\alpha)}. \quad (3)$$

При сжигании природного газа с теплотой сгорания Q_n^c без его подогрева из выражения (3) следует, что при нагреве воздуха горения в регенераторе или использовании холодного воздуха, уровень действительной температуры горения $t_{гд}$ зависит от изменения величин I_B и $V_{Г}$, последний, в свою очередь, зависит от величины коэффициента избытка воздуха α и состава топлива.

Особенностью работы регенеративных стекловаренных печей является то, что в процессе их эксплуатации может в широком диапазоне изменяться расход продуктов сгорания и воздуха горения за счет присосов холодного воздуха по тракту агрегата и в регенераторе [7]. С учетом этого, количество теплоты I_B , вносимой с подогретым воздухом, равно сумме теплоты, вносимой с подогретым воздухом, проходящим через регенератор I_B^p , и теплоты, вносимой с холодным воздухом, который поступает в рабочее пространство печи через ограждения I_B^{of} . Таким образом, для определения величин, которые входят в выражение (3), необходимо знать, кроме температуры t_x и t_r воздуха на входе в регенератор и на выходе из регенератора, соответственно, также объем воздуха V_B^p , проходящего последовательно насадочные камеры регенератора, и объем воздуха V_B^{of} , поступающего в рабочее пространство печи через проемы и неплотности в огнеупорной кладке ограждения.

Расход воздуха V_B^p на входе в насадочную камеру I регенератора можно определить прямыми измерениями на воздушном клапане или найти из уравнения материального баланса горения топлива

$$V_B^p = \alpha_n V^0,$$

где $\alpha_{\text{п}}$ — коэффициент избытка воздуха с учетом присосов;

V^0 — теоретически необходимый объем воздуха.

Объем холодного воздуха, который поступает в рабочую зону печи через ограждения,

$$V_{\text{В}}^{\text{оз}} = (\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{р}})V^0,$$

где $\alpha_{\text{р}}$ — коэффициент избытка воздуха после регенератора.

Окончательно выражение для определения количества теплоты, поступившей в рабочую зону печи с подогретым воздухом,

$$I_{\text{В}} = \alpha_{\text{р}}V^0C'_{\text{рг}}t_{\text{г}} + (\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{р}})V^0C'_{\text{рх}}t_{\text{х}},$$

где $C'_{\text{рг}}$ и $C'_{\text{рх}}$ — соответственно объемные удельные изобарные теплоемкости нагретого и холодного воздуха;

$t_{\text{г}}$ и $t_{\text{х}}$ — соответственно температуры нагретого и холодного воздуха.

Приращение температуры горения с учетом значения изменения располагаемой теплоты за счет подогрева воздуха

$$\Delta t_{\text{г}} = \frac{\Delta Q_{\text{р}}^{\text{п}}}{V_{\text{г}}(\alpha)C'_{\text{рг}}} = \frac{I_{\text{г}} - I_{\text{х}}}{V_{\text{г}}(\alpha)C'_{\text{рг}}}.$$

Для расчета величины $\Delta Q_{\text{р}}^{\text{п}}$ необходимо располагать данными о значениях температуры (энтальпии) нагреваемого воздуха на выходе из насадки регенератора и параметров холодного воздуха.

В этом случае при одинаковой производительности стекловаренной печи величину экономии топлива $\Delta \mathcal{E}_{\text{т}}$ при подогреве воздуха горения можно определить, сравнивая работу агрегата при использовании холодного и нагретого в регенераторе воздуха. При этом заданными должны быть значения удельного расхода топлива на единицу шихты b_1 и b_2 при работе на холодном и горячем воздухе горения, соответственно [5],

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{т}} = \frac{b_1 - b_2}{b_1} = 1 - \frac{Q_{\text{н}}^{\text{с}} - I_{\text{В}}^{\text{ог}}}{Q_{\text{н}}^{\text{с}} - I_{\text{уг}}}. \quad (4)$$

Представленная методика определения теплотехнических параметров стекловаренной печи с системой регенеративного подогрева воздуха может быть использована для диагностики тепловых режимов работы агрегатов при наличии данных, характеризующих работу отдельных камер и регенератора в целом. Необходимые для расчетов параметры воздуха на выходе из регенератора определялись при помощи уточненной универсальной математической модели регенератора, которая позволяет прогнозировать их работу с любым количеством камер в сочетании с различными типами насадок и огнеупорных материалов [8].

Выполнены теплотехнические расчеты для плавильной печи при использовании природного газа с теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 35,6$ МДж/м³ (рисунки 2 и 3). Температура нагрева воздуха горения $t_{\text{г}}$ в регенераторе принималась постоянной как средняя за период, температура природного газа принята $t_{\text{газ}} = 30$ °С.

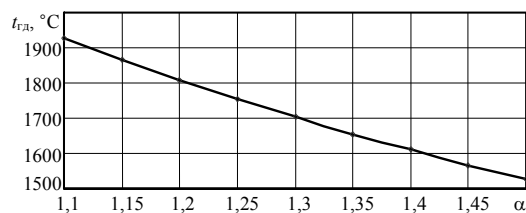
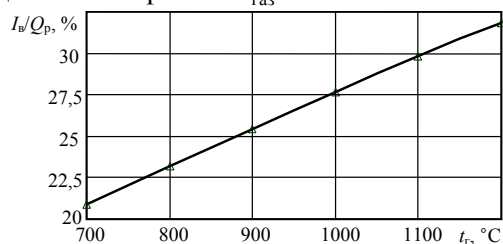


Рис. 2. Изменение доли теплоты I_g/Q_p , вносимой в стекловаренную печь с воздухом горения, в зависимости от температуры подогрева воздуха

Рис. 3. Зависимость температуры $t_{гд}$ в рабочей зоне стекловаренной печи от коэффициента избытка воздуха α

Исследовано влияние подогрева воздуха горения на тепловой режим стекловаренной печи. С использованием результатов моделирования тепловой работы регенераторов выполнены теплотехнические расчеты количества теплоты, вносимого в рабочее пространство печи с топливом и воздухом горения. Диапазон изменения температуры нагрева воздуха $t_{гд}$ составил 700...1200 °С, что соответствует возможному диапазону температуры нагрева воздуха в двухкамерных регенеративных теплообменниках при изменении расходов теплоносителей. Коэффициент избытка воздуха α изменяется в диапазоне 1,0...1,5.

Установлено, что повышение температуры нагрева воздуха $t_{гд}$ в регенераторах способствует увеличению в располагаемой теплоте доли, вносимой с воздухом горения I_B/Q_p , что приводит к росту температуры горения $t_{гд}$ до 1900...2400 °С. Увеличение коэффициента избытка воздуха α приводит к изменению температурного режима печи.

При варьировании режимных параметров регенератора может быть достигнута величина экономии топлива в печи от 20 до 50 %, рассчитанная для “идеального” агрегата по формуле (4) при температурах газов на входе в насадку регенератора 1000...1200 °С.

Полученные данные определили целесообразность повышения эффективности работы регенераторов стекловаренных печей с целью обеспечения температуры нагрева воздуха горения выше 1000...1100 °С. В результате исследований установлена возможность определения влияния параметрических характеристик регенератора на температурный режим горения и величину экономии топлива в стекловаренной печи.

Разработана методика оценки влияния расхода и температуры воздуха горения на температурный режим ВТУ ванного типа, используемой для промышленного производства стекломассы.

Путем математического моделирования исследованы тепловые режимы агрегата при использовании двухкамерных регенераторов для нагрева воздуха горения. Определено влияние температуры нагрева воздуха при условии изменения коэффициента избытка воздуха на температурный режим работ агрегата в широком диапазоне изменения параметров, характерном для промышленных стекловаренных печей.

Разработанная методика и результаты исследования могут быть использованы для диагностики тепловых режимов теплотехнологических комплексов промышленных предприятий стекольной и металлургической промышленности.

Литература

1. Ключников А.Д. Энергетика теплотехнологии и вопросы энергосбережения. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 128 с.
2. Ключников А.Д. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ключников А.Д., Кузьмин В.Н., Попов С.К. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 176 с.
3. Гойхман В.Ю. Печная теплотехника в производстве стекла / Гойхман В.Ю., Руслов В.Н., Костыря В.А. — Харьков: Факт, 1997. — 288 с.
4. Сорока Б.С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах. — К.: Наукова думка, 1992. — 416 с.
5. Кошельник В.М. Исследование и разработка рекомендаций по повышению эффективности работы системы стекловаренная печь — регенератор / Кошельник В.М., Кошельник А.В., Долженко Е.Ю. // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2004. — №3. — С.13 — 18.
6. Кошельник О.В. Методика створення універсального обчислювального комплексу для моделювання регенеративних теплообмінників високотемпературних плавильних агрегатів // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2007. — № 2/3 (26). — С. 47 — 50.

7. Экспериментальные исследования тепловых режимов регенераторов ванной стекловаренной печи / Кошельник А.В., Кошельник В.М., Ковтун В.Б. и др. // Вестник ХГПУ. — 2000. — Вып. 104. — С. 6 — 10.
8. Кошельник А.В. Математическая модель многокамерных регенераторов плавильных агрегатов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2007. — № 1/2 (25). — С. 51 — 54.

Поступила в редакцию 1 октября 2007 г.

