

УДК 66.041: 666.1.031.2

Кошельник В.М., Кошельник А.В., Долженко Е.Ю.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Высокотемпературные теплотехнологические комплексы и установки (ВТУ) широко применяются при производстве различных материалов в металлургии, при производстве строительных материалов и т.д. Решению различных вопросов повышения эффективности использования топлива в ВТУ, промышленных печах различного назначения посвящены исследования ряда авторов, таких как Щукин А.А., Семененко Н.А., Ключников А.Д., Еринов А.Е., Сорока Б.С., Пиоро Л.С., Лисиенко В.Г. [1–4].

Особенно остро проблема энергосбережения стоит в стекольном производстве, где основным типом технологических реакторов являются ванны регенеративные печи, КПД которых составляет менее 25-30 % [3,4]. Это приводит к дополнительным затратам топлива на производство стеклоизделий. В ближайшие десятилетия конструкции ванн стекловаренных печей не претерпят принципиальных изменений [4].

Элементами систем технологических систем ВТУ являются теплообменники различных назначений, конструкций и размеров. Известно, что подогрев воздуха горения для ВТУ может обеспечить экономию топлива свыше 35 % [1]. Зачастую на практике в промышленных комплексах реализуются не самые удачные конструктивные и режимные решения, что приводит к перерасходу энергоресурсов и к трудностям при оптимизации технологических схем. Авторы работ [3,4] указали на несоответствие во многих случаях тепловой мощности регенераторов и плавильных агрегатов. Их согласование требует проведения диагностики и оптимизации технико – экономических показателей (ТЭП) системы регенерации тепла. Во многих работах отмечена эффективность применения для этих целей математического моделирования для ВТУ [5].

В данной статье, в развитие ранее выполненных исследований в НТУ «ХПИ» [6], представлены практические результаты по использованию математических моделей для диагностики технико-экономических показателей системы регенерации ванны стекловаренной печи. Авторами была разработана серия алгоритмов и математических моделей, включенных в программный комплекс для моделирования тепловых режимов системы «стекловаренная печь – регенератор» с заданными геометрическими размерами насадочной камеры регенератора. Это позволяет выполнять диагностику параметров применительно к реальным промышленным объектам.

Основу вычислительного комплекса составил базовый модуль по расчету температурных полей насадки и теплоносителей в регенераторе с использованием метода элементарных тепловых балансов, что позволило создать конечно-разностную математическую модель с хорошим быстродействием [7]. Для этого насадка регенератора по высоте разбивалась на элементарные объёмы с высотой Δx , для которых составляли тепловой баланс при заданном временном шаге Δt . Вычисление температуры каждого расчетного элемента насадки связано с составлением и решением системы энергоданса в соответствии с явной конечно-разностной схемой последовательно для всех n участков, начиная с $i = 1$ до $i = n$, для каждого момента времени j с шагом Δt в цикле нагрев-охлаждение насадки в виде

$$\sum_{i=1}^n Q_{i,j}^k = G_i \cdot C_H(t_{i,j}) \cdot [t_{i,j+1} - t_{i,j}]. \quad (1)$$

Левая часть уравнения (1) представляет собой сумму тепловых потоков $Q_{i,j}^k$ через теплообменные поверхности i -го расчетного элемента для j -го момента времени. Правая часть уравнения соответствует изменению теплосодержания насадки за расчетный период времени. При реализации алгоритма расчетные формулы преобразованы с использованием вспомогательных коэффициентов A, B, D , которые рассчитывали для всех элемента в каждый момент времени в цикле нагрев-охлаждение насадки

$$t_{i,j+1} = B_1 \cdot t_{i,j} + B_2 \cdot t_{i,j} + B_3 \cdot t_{i,j}^c + B_4 \cdot t_{i+1,j}. \quad (2)$$

Температуру теплоносителя $t_{i,j}^c$ в (1)-(2) определяли при нагреве (газ) и охлаждении (воздух) насадки для каждого расчетного участка из уравнений баланса тепла между теплоносителем и изменением теплосодержания расчетного элемента насадки.

В последующем комплекс был дополнен блоками, уточняющими расчет системы регенерации. Для регенераторов стекловаренных печей эти уточнения связаны с наличием пылевого уноса. Удельная концентрация пыли, дисперсный состав, плотность, которые зависят от конструкции агрегата и сорта стекломассы. Получена расчетная зависимость коэффициента ослабления лучей в каналах регенератора от температуры.

Для определения показателей, характеризующих эффективность работы ВТУ для производства стекла с регенеративным нагревом воздуха горения (рис.1) при отоплении его газом с теплотой сгорания Q_i^n в качестве критерия эффективности может быть выбрана величина максимально возможной экономии топлива $\Delta \dot{Y}_O$, или увеличение производительности агрегата ΔG , которые могут быть получены без учета тепловых потерь в окружающую среду.

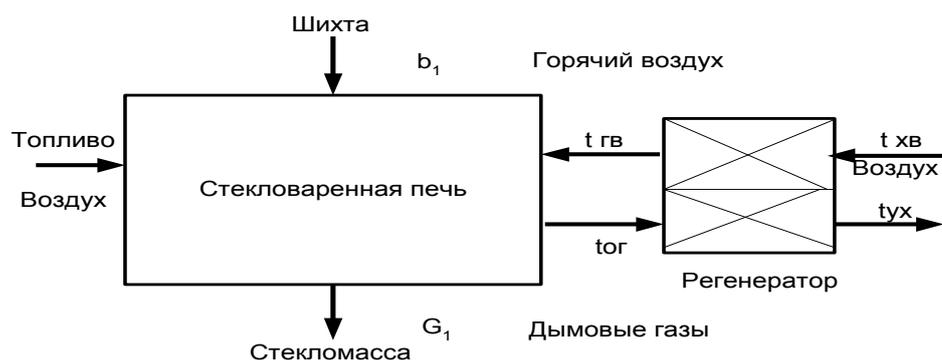


Рисунок 1 – Схема регенерации тепла ВТУ ванного типа при производстве стекломассы

При использовании холодного и подогретого в регенераторе воздуха горения, удельный расход топлива будет составлять b_1 и b_2 , соответственно, а производительность агрегата по стекломассе – G_1 и G_2 . Количество теплоты, переданное в рабочей зоне печи стекломассе при работе агрегата без подогрева и с подогревом воздуха в регенераторе соответственно без учета тепловых потерь в окружающую среду, равно

$$Q_1 = G_1 b_1 (Q_i^{\bar{N}} - I_{0\bar{A}}); Q_2 = G_2 b_2 ((Q_i^{\bar{N}} - I_{0\bar{A}}) + (I_{0\bar{A}} - I_{0\bar{O}})) = G_2 b_2 (Q_i^{\bar{N}} - I_{0\bar{O}}), (3)$$

где $(I_{0\bar{A}} - I_{0\bar{O}})$ – количество теплоты, затраченное на нагрев воздуха в регенераторе, выраженное через значения энтальпий продуктов горения в регенераторе.

Из равенства величин $Q_1 = Q_2$ найдем удельный расхода топлива b_2 . При производительности агрегата $G_1 = G_2$ величина максимальной относительной экономии топлива $\Delta \dot{Y}_{\bar{O}}$ при подогреве воздуха в регенераторе составит,

$$\Delta \dot{Y}_{\bar{O}} = (1 - b_2 / b_1) \cdot 100 = (1 - (Q_i^{\bar{N}} - I_{0\bar{A}}) / (Q_i^{\bar{N}} - I_{0\bar{O}})) \cdot 100, \% . (4)$$

Эффективность работы регенератора оценим по значению коэффициента регенерации тепла r по значениям энтальпии газов $r = (I_{0\bar{A}} - I_{0\bar{O}}) / I_{0\bar{A}}$.

Увеличение производительности агрегата за счет подогрева воздуха горения $\Delta G = (G_2 - G_1) / G_1$, выраженное в процентах может быть найдено из уравнений (3)-(4), при условии сохранения расхода топлива для данных вариантов.

Выполнена диагностика тепловых режимов системы регенерации тепла стекловаренной печи с подковообразным факелом, топливо – природный газ. Объём насадки регенератора – 71,28 м³, размер каналов – 270x150 мм. Варьировались значения температуры газов на входе в насадку, скорости газов и нагреваемого воздуха, длительности периодов нагрева и охлаждения насадки.

Установлено, что с повышением температуры дымовых газов на входе в насадку $t'_{\bar{A}}$ от 1000 до 1400 °С на каждые 100 °С увеличивается средняя температура нагреваемого воздуха на 50-70 °С. Так, при повышении температуры газов на входе в насадку регенератора с 1200 до 1300 °С на 66 °С возрастает температура уходящих газов, при коэффициенте $r = 34,57$ %. Величина максимальной экономии топлива $\Delta \dot{Y}_{\bar{O}}$ возрастает с 42,15 до 49,99 %, т.е. ее прирост достигает 7,84 %. Анализ результатов численного эксперимента с изменением скорости газов $w_{\bar{A}}$ и воздуха $w_{\bar{A}}$ в каналах насадки показал, что при изменении $w_{\bar{A}}$ в каналах насадки с 0,2 до 0,4 м/с для различной температуры газов на входе достигается увеличение средней температуры уходящих газов на 205-250 °С, при этом имеет место повышение средней температуры нагрева воздуха на 70-80 °С. Увеличение скорости воздуха $w_{\bar{A}}$ в каналах регенератора с 0,1 до 0,3 м/с приводит к снижению средней температуры уходящих газов на 250-300 °С и к снижению средней температуры воздуха на 290-330 °С.

Путем обобщения результатов численного эксперимента с использованием программы Statistica созданы имитационные модели системы регенерации ВТУ для определения средних значений температуры нагрева воздуха и величины экономии топлива при использовании подогретого воздуха в ВТУ при производстве стекломассы

$$\bar{T}_{\bar{A}} = 224 + 0,897 \cdot \bar{T}_{\bar{A}} + 0,042279 \cdot \bar{T}_{\bar{A}} - 846 \cdot W_{\bar{A}} - 843 \cdot W_{\bar{A}} + 638 \cdot W_{\bar{A}}^2 + 1142 \cdot W_{\bar{A}}^2, (5)$$

$$\Delta \dot{Y}_o = -32,2164 + 0,1184 \cdot T_A'' - 0,0705 \cdot \dot{O}_{\text{АНД}}'' - 0,0822 \cdot (\dot{O}_{\text{АНД}}'' - \dot{O}_A'') \cdot W_A, \% \quad (6)$$

По данным (6) рассчитана также экономия затрат на топливо для ВТУ. Зависимости, аналогичные (6) получены для определения увеличения производительности по стекломассе ΔG при условии сохранения расхода газа на отопление агрегата.

Таким образом, применение разработанных математических моделей позволило выполнить диагностику основных технико-экономических показателей системы регенерации теплоты ВТУ ванного типа при производстве стекломассы. Результаты исследования могут быть также использованы для диагностики технико-экономических показателей и тепловых режимов систем регенерации теплоты дымовых газов ВТУ различного целевого назначения. Математические модели могут быть реализованы также при создании систем оптимального управления ВТУ с регенеративным теплоиспользованием.

Литература

1. Сорока Б.С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах.– К.: Наукова думка, 1992. – 416 с.
2. Пиоро Л.С. Экономия топлива в производстве стекла.– К.: Наукова думка.– 1981.–140 с.
3. Козлов А.С. Теплотехника регенеративных стекловаренных печей.– М.: Легпромбытиздат, 1990.– 143 с.
4. Гойхман В.Ю., Руслов В.Н., Костыря В.А. Печная теплотехника в производстве стекла. –Харьков: Факт, 1997. – 288 с.
5. Бухмиров В.В. Разработка и использование моделей для решения актуальных теплотехнических задач металлургического производства: автореф. дисс. д-ра техн. наук: 05.16.02.– Москва, 1998.– 47 с.
6. Кошельник А.В. Универсальный вычислительный комплекс для моделирования тепловых процессов в регенераторах стекловаренных печей // Інтегровані технології та енергозбереження. – №2. – 1999. – С.88-95.
7. Кошельник А.В. Повышение эффективности теплоиспользования на основе совершенствования параметрических характеристик системы регенерации стекловаренной печи: дисс. канд. техн. наук: 05.14.06.– Харьков, – 2001. – 176 с.

УДК 66.041: 666.1.031.2

Кошельник В.М., Кошельник А.В., Долженко Е.Ю.

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЩОДО ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ РЕГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК

Обґрунтовано необхідність проведення робіт з енергозбереження в теплотехнології виробництва скла. Викладено методику застосування математичних моделей для діагностики параметрів систем регенеративного підігріву повітря горіння у високотемпературних установках. Представлено практичні результати діагностики теплотехнічних і економічних параметрів на прикладі ванної регенеративної скловарної печі. Від-

значено реальну можливість зниження витрати палива або підвищення продуктивності агрегату за рахунок удосконалення теплових режимів системи регенерації.