

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ КОМПАКТНЫХ РЕГЕНЕРАТОРОВ С УЧЁТОМ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ И УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА В НАДНАСАДОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Фёдоров С.С., Шевченко Г.Л., Губинский М.В.

Национальная металлургическая академия Украины

В работе представлена математическая модель компактного регенератора, учитывающая потери теплоты через ограждения и влияние теплообмена в наднасадочном пространстве. Сравнительный анализ численных и экспериментальных результатов показал, что учёт новых факторов повысил точность модели.

Ключевые слова

Модель, теплообмен, регенератор, слой.

Условные обозначения

F_n – сечение камеры, заполненной насадкой, m^2 ; P_n – периметр камеры, заполненной насадкой; $H_{нп}$ – высота наднасадочного пространства, м; H_n – высота насадки; $R_{нас}$ – радиус насадки регенератора, м; $c_n, c_{ф}, c_{ст}$ – теплоёмкость материала насадки, материала футеровки наднасадочного пространства и боковой стенки регенератора, Дж/(кг·К); c_g – теплоёмкость газа, Дж/(m^3 ·К); h – текущая высота насадки, м; $\Delta h_{ф}$ – расчётный шаг по толщине футеровки наднасадочного пространства, м; Δh_n – расчётный шаг по высоте насадки, м; $\Delta h_{ст}$ – расчётный шаг по толщине боковой стенки регенератора, м; q_n – результирующий тепловой поток на поверхность насадки в наднасадочном пространстве регенератора, Вт/(m^2 ·К); $q_{ст}$ – тепловой поток от газов на боковую стенку регенератора, Вт/(m^2 ·К); q_o' – тепловой поток от наружной стенки наднасадочного пространства регенератора в окружающую среду, Вт/(m^2 ·К); q_o'' – тепловой поток от наружной боковой стенки регенератора в окружающую среду, Вт/(m^2 ·К); $q_{ф}$ – результирующий тепловой поток на футеровку наднасадочного пространства, Вт/(m^2 ·К); q_v – тепловой поток от газа к насадке в слое, Вт/ m^3 ; r – текущий радиус насадки, м; $t_n, t_{ф}, t_{ст}, t_g$ – текущая температура насадки, футеровки наднасадочного пространства, боковой стенки регенератора и газа, °С; $t_{окр}$ – температура окружающего воздуха, °С; w_0 – скорость газа на свободное сечение камеры, заполненной насадкой при н.у., м/с; $\alpha_{окр}$ – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности регенератора в окружающую среду, Вт/(m^2 ·°С); $\alpha_{вн}$ – коэффициент теплоотдачи от газов к внутренней стенке регенератора, Вт/(m^2 ·°С); α_v – объёмный коэффициент теплоотдачи в слое, Вт/(m^3 ·°С); $\delta_{ф}$ – толщина футеровки наднасадочного пространства, м; $\delta_{ст}$ – боковой стенки регенератора, м; $\lambda_{эф}$ – коэффициент эффективной продольной теплопроводности слоя, Вт/(м·К), [1]; $\lambda_{ф}, \lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала футеровки наднасадочного пространства и боковой стенки регенератора, Вт/(м·К); $\rho_n, \rho_{ф}, \rho_{ст}$ – насыпная плотность материала насадки, материала футеровки наднасадочного пространства и боковой стенки регенератора, кг/ m^3 ; τ – текущее время, с.

Введение

При проектировании регенеративных систем отопления энерготехнологических агрегатов необходимо знать влияние на их работу ряда факторов, таких как: начальная температура, скорость и соотношение водяных эквивалентов теплоносителей; длительность цикла; материал, форма и геометрические размеры насадки регенератора.

Рядом авторов при моделировании работы компактных регенераторов [2-4] учитывается продольный перенос теплоты теплопроводностью в насадке, в газе и потери теплоты через ограждения, однако не учитывается влияние на работу насадки условий теплообмена в наднасадочном пространстве регенератора.

Практические результаты, полученные при экспериментальных исследованиях работы опытного стенда компактного регенератора на кафедре промышленной теплоэнергетики НМетАУ [5] показали, что существенное влияние на работу компактного регенератора оказывают условия теплообмена в наднасадочном пространстве. Это выражается в снижении температуры дымовых газов на входе в насадку, против расчётных значений.

Принятые допущения и постановка задачи

Исходя из существующего опыта моделирования процессов теплообмена в компактных регенераторах и практических результатов работы этих аппаратов [2-6], предлагается математическая модель, основана на допущениях: перекидка клапанов осуществляется безинерционно; элементы насадки считаются термически тонкими с введением поправки на массивность в расчёте коэффициента теплоотдачи; скорость газов и структура слоя насадки постоянны по сечению; отвод тепла к стенкам регенератора

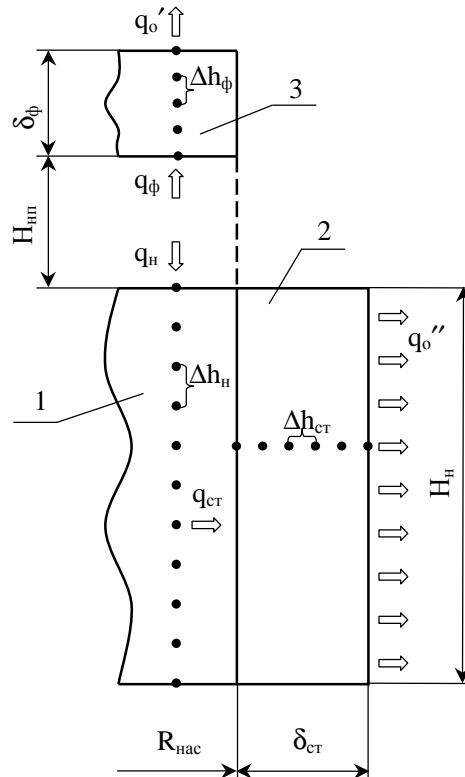


Рисунок 1. Расчётная схема математической модели тепловой работы компактного регенератора

1 – насадка регенератора; 2 – футеровка боковой стенки регенератора; 3 – футеровка наднасадочного пространства регенератора

осуществляется в результате взаимодействия их с газовым потоком [7]; перенос тепла теплопроводностью в газе на основании оценок [8] не учитывается. Задача теплопроводности в футеровке наднасадочного пространства рассчитывается отдельно от задачи теплопроводности в боковой стенке регенератора (рис. 1).

С учётом указанных допущений и принятой схемы теплообмена математическая постановка задачи теплообмена в компактном регенераторе включает в себя: уравнения теплообмена в насадке регенератора (1), теплопроводности для футеровки наднасадочного пространства (2), теплопроводности для боковой стенки регенератора (3), уравнение энергии для газа в слое (4) и в наднасадочном пространстве (5); начальные условия (6); граничные условия III рода для футеровки наднасадочного пространства внутри (7) и снаружи (8) регенератора; граничные условия III рода для боковых стенок внутри (9) и снаружи (10) регенератора; граничные условия III рода на поверхности слоя (11).

$$\rho_H \cdot c_H \cdot \frac{\partial t_H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial h} \cdot \left(\lambda_{\text{ЭФ}} \cdot \frac{\partial t_H}{\partial h} \right) + q_V, \quad h \in (\delta_{\Phi} + H_{\text{НП}}, \delta_{\Phi} + H_{\text{НП}} + H_H) \quad (1)$$

$$\rho_{\Phi} \cdot c_{\Phi} \cdot \frac{\partial t_{\Phi}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial h} \cdot \left(\lambda_{\Phi} \cdot \frac{\partial t_{\Phi}}{\partial h} \right), \quad h \in (0, \delta_{\Phi}) \quad (2)$$

$$\rho_{\text{СТ}} \cdot c_{\text{СТ}} \cdot \frac{\partial t_{\text{СТ}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\text{СТ}} \cdot r \cdot \frac{\partial t_{\text{СТ}}}{\partial r} \right), \quad r \in (R_{\text{НАС}}, R_{\text{НАС}} + \delta_{\text{СТ}}) \quad (3)$$

$$-c_{\Gamma} \cdot w_0 \cdot \frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial h} = q_V + q_{\text{СТ}} \cdot \frac{P_H}{F_H} \quad (4)$$

$$-c_{\Gamma} \cdot w_0 \cdot F_H \cdot \partial t_{\Gamma} = q_{\Phi} \cdot F_{\Phi} + q_H \cdot F_H \quad (5)$$

$$t_H(h) = t_{\Phi}(h) = t_{\text{СТ}}(h, r) = t_0 \quad (6)$$

$$q_{\Phi} = -\lambda_{\Phi} \cdot \frac{\partial t_{\Phi}}{\partial h} \Big|_{h=\delta_{\Phi}} \quad (7)$$

$$\alpha_{\text{ОКР}} \cdot (t_{\text{ОКР}} - t_{\Phi}(h=0)) = -\lambda_{\Phi} \cdot \frac{\partial t_{\Phi}}{\partial h} \Big|_{h=0} \quad (8)$$

$$\alpha_{\text{ВН}} \cdot (t_{\Gamma} - t_{\text{СТ}}(h, r=R_{\text{НАС}})) = -\lambda_{\text{СТ}} \cdot \frac{\partial t_{\text{СТ}}}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{НАС}}} \quad (9)$$

$$\alpha_{\text{ОКР}} \cdot (t_{\text{ОКР}} - t_{\text{СТ}}(h, r=R_{\text{НАС}} + \delta_{\text{СТ}})) = -\lambda_{\text{СТ}} \cdot \frac{\partial t_{\text{СТ}}}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{НАС}} + \delta_{\text{СТ}}} \quad (10)$$

$$q_H = -\lambda_{эф} \cdot \frac{\partial t_H}{\partial h} \Big|_{h = \delta_{\phi} + H_{НП}} \quad (11)$$

где

$$q_V = \alpha_V \cdot (t_{Г} - t_{М}), \quad h \in (\delta_{\phi} + H_{НП}, \delta_{\phi} + H_{НП} + H_{Н}) \quad (12)$$

Численное моделирование и адаптация математической модели

Поставленная задача решена методом конечных разностей с использованием неявной нелинейной схемы [9]. Для определения результирующих тепловых потоков на футеровку наднасадочного пространства q_{ϕ} и поверхность насадки q_H (рис.1) использовался зональный метод расчёта лучистого теплообмена [10].

Адекватность математической модели, проверена путём сравнения показателей работы экспериментальной установки с расчётными значениями, рис. 2-3. Краткая характеристика установки: материал насадки – корундовые шары диаметром 20 мм; высота насадки – 0,75 м; диаметр насадки – 0,2 м; высота наднасадочного пространства – 0,3 м; огнеупорная изоляция – шамотный кирпич толщиной 0,1 м; расход природного газа на горение в дымовом периоде – 3,7 м³/ч; расход воздуха на горение в дымовом периоде – 53,3 м³/ч; расход воздуха в воздушном периоде – 54,1 м³/ч; длительность периода – 180 с. При заданных условиях коэффициент расхода воздуха на горение α составил 1,52, калориметрическая температура горения газозвушной смеси – 1480 °С. Скорость газов w_0 в дымовом периоде равнялась 0,52 м/с, в воздушном – 0,48 м/с.

При расчёте компактного регенератора без учёта влияния теплообмена в наднасадочном пространстве температура в верхней части насадки превышала экспериментальные значения на 50 – 70 °С.

Согласованность экспериментальных и расчётных данных рис. свидетельствует об адекватности математической модели. В дальнейшем планируется использование данной модели при разработке конструкций компактных регенераторов.

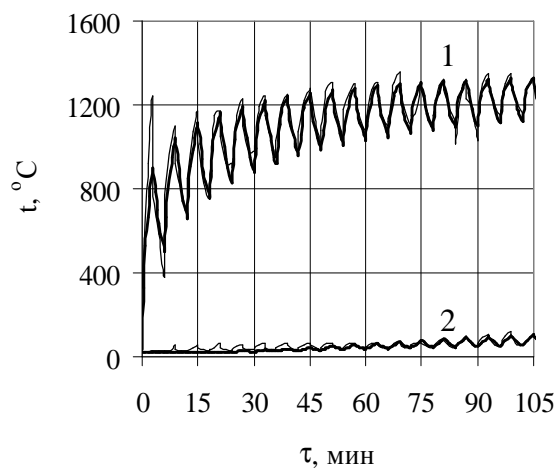


Рисунок 2. Изменение температуры вверху (1) и внизу насадки (2)

— расчёт
 - - - эксперимент

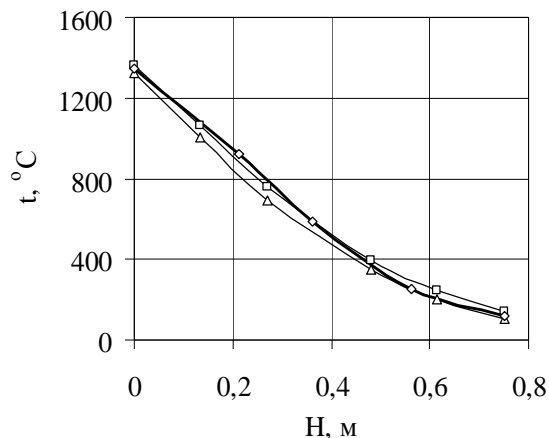


Рисунок 3. Распределение температур по высоте насадки в конце дымового периода

- △— насадка (расчёт)
- газ (расчёт)
- ◇— эксперимент

Выводы:

Разработана и реализована на ЭВМ математическая модель компактного регенератора, учитывающая влияние процессов теплообмена в наднасадочном пространстве регенератора, потери теплоты в окружающую среду через ограждения, продольный перенос теплоты в слое, переменные теплофизические свойства теплоносителей и материала; Учёт теплообмена в наднасадочном пространстве повысил точность расчёта.

Л и т е р а т у р а

1. Абзалов Ю.М., Невский А.С. Изучение теплопроводности кускового материала. – Изв. Вузов. Чёрная металлургия. – 1971. – № 2. – С.142 – 145.
2. Особенности тепловой работы компактных слоевых регенераторов / Б.А. Тихонов, Я. М. Гордон и др. // Изв. Вузов. Чёрная металлургия. – 1984. – № 6. – С. 108 – 110.
3. Попов С.К. Математическая модель компактного регенератора // Промышленная теплотехника. – 2001. № 10. – С. 39 – 40.
4. Затопляев Г.М. Расчёт основных параметров шариковой насадки регенеративной горелки // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – С. 103 – 105.
5. Шевченко Г.Л. Эффективные режимы работы и конструкции компактных регенераторов // Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук. – Днепропетровск: НМетАУ. – 2001. 147 с.
6. Фёдоров С.С., Шевченко Г.Л., Губинский М.В. Моделирование работы компактных регенераторов // Металлургическая теплотехника. – Днепропетровск: НМетАУ. – 2003. – Т. 9. – С. 87 – 92.
7. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: "Химия", 1968. – 510 с.
8. Тепло- и массообмен в плотном слое / Китаев Б.И., Тимофеев В.Н. и др. М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
9. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Дульнев Г.Н. и др. М.: Высшая школа, 1991. – 207 с.
10. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках. – М.: Металлургия, 1971. – 440 с.