

*Губинский В.И. – д-р техн. наук, проф., НМетАУ*

*Воробьева Л.А. – мл. научн. сотр., НМетАУ*

## БАЛАНСОВЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ИМПУЛЬСНОЙ ТРУБКЕ МНОГОТРУБНОГО ПУЧКА

*В результате испытания минирегенератора с насадкой из металлических трубок предложен балансовый способ определения локальной скорости теплоносителей внутри и снаружи импульсной трубки, т.е. в месте измерения их температур. Корректировочные коэффициенты для определения локальной скорости находят путем сопоставления двух значений расхода газа на единицу массы труб: среднего по сечению насадки и локального, который вычисляют с использованием тепловых балансов в системах «дымовые газы – насадка» и «насадка – воздух».*

### Постановка задачи

Кафедрой теплотехники и экологии металлургических печей НМетАУ в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы проведено экспериментальное исследование работы трубчатого минирегенератора [1, 2]. По результатам экспериментального исследования теплообмена и аэродинамического сопротивления в насадке из жаропрочных металлических трубок был составлен тепловой баланс работы регенератора по следующему уравнению:

$$V_{\text{д}} \cdot \left( \bar{c}_{\text{д}}^{\bar{t}_{\text{д.ВХ}}} \cdot \bar{t}_{\text{д.ВХ}} - \bar{c}_{\text{д}}^{\bar{t}_{\text{д.ВЫХ}}^{\text{СМ}}} \cdot \bar{t}_{\text{д.ВЫХ}}^{\text{СМ}} \right) \cdot \tau_{\text{д}} = V_{\text{в}} \cdot \left( \bar{c}_{\text{в}}^{\bar{t}_{\text{в.ВЫХ}}^{\text{СМ}}} \cdot \bar{t}_{\text{в.ВЫХ}}^{\text{СМ}} - \bar{c}_{\text{в}}^{\bar{t}_{\text{в.ВХ}}} \cdot \bar{t}_{\text{в.ВХ}} \right) \cdot \tau_{\text{в}} \quad (1)$$

где  $V_{\text{д}}$ ,  $V_{\text{в}}$  – общий расход дыма и воздуха при н.у., м<sup>3</sup>/с;  
 $\bar{c}_{\text{д}}^{\bar{t}_{\text{д.ВХ}}}$ ,  $\bar{c}_{\text{д}}^{\bar{t}_{\text{д.ВЫХ}}^{\text{СМ}}}$  и  $\bar{c}_{\text{в}}^{\bar{t}_{\text{в.ВХ}}}$ ,  $\bar{c}_{\text{в}}^{\bar{t}_{\text{в.ВЫХ}}^{\text{СМ}}}$  – средние удельные теплоемкости дыма и воздуха в интервале температур от 0 °С до  $\bar{t}_{\text{д.ВХ}}$ ,  $\bar{t}_{\text{д.ВЫХ}}^{\text{СМ}}$  и  $\bar{t}_{\text{в.ВХ}}$ ,  $\bar{t}_{\text{в.ВЫХ}}^{\text{СМ}}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К) [3];  $\bar{t}_{\text{д.ВХ}}$  и  $\bar{t}_{\text{в.ВХ}}$  – средние, за период, температуры дыма и воздуха на входе в насадку, °С;  $\bar{t}_{\text{д.ВЫХ}}^{\text{СМ}}$  и  $\bar{t}_{\text{в.ВЫХ}}^{\text{СМ}}$  – средние, за период, температуры дыма и воздуха на выходе из насадки, которые соответствуют температурам смеси потоков дыма и воздуха,

исходящих из каналов внутри и снаружи трубок, °С;  $\tau_d, \tau_v$  – длительность дымового и воздушного периодов, с.

Балансовое уравнение (1) показало, что количество теплоты, воспринимаемое воздухом, оказалось на 29,7 % больше, чем количество теплоты, отдаваемое дымовыми газами. Источником ошибки служит неравномерное распределение потоков теплоносителей по сечению насадки.

Достоинством проведенного испытания является достаточно точное определение общего расхода теплоносителей, а также их температур внутри и в межтрубном пространстве импульсной трубки (трубка, в которой были установлены термодатчики). Недостатком эксперимента можно считать измерение температур в одной из  $143^x$  трубок насадки, при этом локальные расходы воздуха и дыма в месте расположения импульсной трубки не измерялись.

Для достоверного исследования процесса теплообмена в трубной насадке и оценки равномерности распределения потоков теплоносителей необходимо определить локальную скорость дыма и воздуха в импульсной трубке по измеренному общему расходу теплоносителя и его температурам.

#### Решение поставленной задачи

Введем понятие удельного расхода теплоносителя на 1 кг трубной насадки. Средний удельный расход теплоносителя, при равномерном распределении потока по сечению насадки  $V_{\text{ср.нас}}$ ,  $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ , определяется по измеренному общему расходу теплоносителя  $V_T$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  при н.у. и по известной массе трубной насадки  $G$ , кг:

$$V_{\text{ср.нас}} = \left( \frac{V_T}{G} \right)_{\text{нас}}. \quad (2)$$

Запишем уравнения теплового баланса для системы «теплоноситель – насадка» за период:

– для дымовых газов:

$$V_d \cdot \left( \bar{c}_d^{\bar{t}_{d,\text{вх}}} \cdot \bar{t}_{d,\text{вх}} - \bar{c}_d^{\bar{t}_{d,\text{вых}}^{\text{см}}} \cdot \bar{t}_{d,\text{вых}}^{\text{см}} \right) \cdot \tau_d = G \cdot \bar{c}_{\text{нас}}^t \cdot \Delta \bar{t}_{\text{ср.нас}}, \quad (3)$$

где  $\bar{c}_{\text{нас}}^t$  – средняя по высоте удельная теплоемкость трубной насадки,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\Delta \bar{t}_{\text{ср.нас}}$  – средняя по высоте разность температур стенки трубки в конце дымового и в конце воздушного периодов, °С;

– для воздуха:

$$V_B \cdot \left( \bar{c}_B^{\bar{t}_{B,ВЫХ}^{CM}} \cdot \bar{t}_{B,ВЫХ}^{CM} - \bar{c}_B^{\bar{t}_{B,ВХ}} \cdot \bar{t}_{B,ВХ} \right) \cdot \tau_B = G \cdot \bar{c}_{нас}^t \cdot \Delta \bar{t}_{ср,нас} \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) определим фактический локальный удельный расход теплоносителя в месте расположения импульсной трубки:

– для дымовых газов:

$$\left( \frac{V_D}{G} \right)_{\text{трубка}} = \frac{\bar{c}_{нас}^t \cdot \Delta \bar{t}_{ср,нас}}{\left( \bar{c}_D^{\bar{t}_{D,ВХ}} \cdot \bar{t}_{D,ВХ} - \bar{c}_D^{\bar{t}_{D,ВЫХ}^{CM}} \cdot \bar{t}_{D,ВЫХ}^{CM} \right) \cdot \tau_D}, \quad \frac{M^3}{\text{кг} \cdot c} \quad (5)$$

– для воздуха:

$$\left( \frac{V_B}{G} \right)_{\text{трубка}} = \frac{\bar{c}_{нас}^t \cdot \Delta \bar{t}_{ср,нас}}{\left( \bar{c}_B^{\bar{t}_{B,ВЫХ}^{CM}} \cdot \bar{t}_{B,ВЫХ}^{CM} - \bar{c}_B^{\bar{t}_{B,ВХ}} \cdot \bar{t}_{B,ВХ} \right) \cdot \tau_B}, \quad \frac{M^3}{\text{кг} \cdot c} \quad (6)$$

При этом средние, за период, температуры дыма и воздуха на выходе из насадки рассчитываются по следующим формулам:

$$\bar{t}_{D,ВЫХ}^{CM} = \frac{V_D^{ВН} \cdot \bar{c}_D^{\bar{t}_D^{ВН}} \cdot \bar{t}_D^{ВН} + V_D^{нар} \cdot \bar{c}_D^{\bar{t}_D^{нар}} \cdot \bar{t}_D^{нар}}{V_D \cdot \bar{c}_D^{\bar{t}_{D,ВЫХ}^{CM}}}, \quad (7)$$

и

$$\bar{t}_{B,ВЫХ}^{CM} = \frac{V_B^{ВН} \cdot \bar{c}_B^{\bar{t}_B^{ВН}} \cdot \bar{t}_B^{ВН} + V_B^{нар} \cdot \bar{c}_B^{\bar{t}_B^{нар}} \cdot \bar{t}_B^{нар}}{V_B \cdot \bar{c}_B^{\bar{t}_{B,ВЫХ}^{CM}}}, \quad (8)$$

где  $V_D^{ВН}$ ,  $V_D^{нар}$  и  $V_B^{ВН}$ ,  $V_B^{нар}$  – расход дыма и воздуха внутри и снаружи труб,  $m^3/c$  при н.у.;  $\bar{t}_D^{ВН}$ ,  $\bar{t}_D^{нар}$  и  $\bar{t}_B^{ВН}$ ,  $\bar{t}_B^{нар}$  – средние, за период, температуры охлажденного дыма и нагретого воздуха внутри и снаружи труб на выходе из насадки,  $^{\circ}C$ ;  $\bar{c}_D^{\bar{t}_D^{ВН}}$ ,  $\bar{c}_D^{\bar{t}_D^{нар}}$  и  $\bar{c}_B^{\bar{t}_B^{ВН}}$ ,  $\bar{c}_B^{\bar{t}_B^{нар}}$  – средние удельные теплоемкости дыма и воздуха в интервале температур от  $0^{\circ}C$  до  $\bar{t}_D^{ВН}$ ,  $\bar{t}_D^{нар}$  и  $\bar{t}_B^{ВН}$ ,  $\bar{t}_B^{нар}$ ,  $kJ/(m^3 \cdot K)$ .

Распределение потока теплоносителя по каналам внутри и снаружи труб происходит в зависимости от аэродинамического сопротивления этих каналов [2]. При этом эквивалентный диаметр каналов принимался равным гидравлическому:  $d_{гидр} = 4 \cdot S_{ж.с.} / \Pi$ , м; где  $S_{ж.с.}$  – площадь живого сечения,  $m^2$ ;  $\Pi$  – смоченный периметр поперечного сечения, м.

При равномерном распределении потоков дымовых газов и воздуха по сечению насадки величина фактического локального расхода теплоносителя будет сопоставима с величиной среднего удельного расхода, а температуры, измеренные в месте расположения импульсной трубки, будут справедливы для всех трубок насадки. В случае же неравномерного распределения потоков дыма и воздуха по сечению насадки, удельный локальный и удельный средний расходы теплоносителей будут отличаться друг от друга.

Для оценки равномерности распределения потоков дыма и воздуха по сечению трубной насадки сравниваем средний удельный расход теплоносителя, равномерно распределяемого по сечению насадки, с локальным, в месте расположения импульсной трубки, определив корректировочные коэффициенты ( $k_d$ ,  $k_v$ ):

– для дымовых газов:

$$k_d = \left( \frac{V_d}{G} \right)_{\text{трубка}} / \left( \frac{V_d}{G} \right)_{\text{нас}} \quad (9)$$

– для воздуха:

$$k_v = \left( \frac{V_v}{G} \right)_{\text{трубка}} / \left( \frac{V_v}{G} \right)_{\text{нас}} \quad (10)$$

С учетом корректировки локальной скорости дымовых газов в импульсной трубке определим теплоту, отдаваемую дымовыми газами за период:

– внутри труб

$$Q_d = W_{d0}^{вн} \cdot S_{вн} \cdot k_d \cdot \left( \bar{c}_d^{\text{вн}} \bar{t}_{д.вх}^{\text{вн}} \cdot \bar{t}_{д.вх}^{\text{вн}} - \bar{c}_d^{\text{вн}} \bar{t}_{д.вых}^{\text{вн}} \cdot \bar{t}_{д.вых}^{\text{вн}} \right) \cdot \tau_d; \quad (11)$$

– в межтрубном пространстве

$$Q_d = W_{d0}^{\text{нар}} \cdot S_{нар} \cdot k_d \cdot \left( \bar{c}_d^{\text{нар}} \bar{t}_{д.вх}^{\text{нар}} \cdot \bar{t}_{д.вх}^{\text{нар}} - \bar{c}_d^{\text{нар}} \bar{t}_{д.вых}^{\text{нар}} \cdot \bar{t}_{д.вых}^{\text{нар}} \right) \cdot \tau_d, \quad (12)$$

где  $W_{d0}^{вн}$ ,  $W_{d0}^{\text{нар}}$  – скорость дыма внутри и снаружи труб при н.у., м/с;  
 $S_{вн}$ ,  $S_{нар}$  – площадь поперечного сечения внутри одной трубки и одного канала межтрубного пространства,  $\text{м}^2$ ;  $k_d$  – корректировочный коэффициент для определения локальной скорости дымовых газов;  
 $\bar{c}_d^{\text{вн}}$ ,  $\bar{c}_d^{\text{нар}}$  и  $\bar{t}_{д.вх}^{\text{вн}}$ ,  $\bar{t}_{д.вых}^{\text{вн}}$  и  $\bar{t}_{д.вх}^{\text{нар}}$ ,  $\bar{t}_{д.вых}^{\text{нар}}$  – средние, за период, температуры дыма на входе и выходе из внутренних и наружных каналов в месте расположения импульсной трубки,  $^{\circ}\text{C}$ .

Теплота, воспринимаемая холодным воздухом за период, с учетом корректировки локальной скорости воздуха, рассчитывается аналогичным образом.

### Обработка результатов эксперимента

*Исходные данные:*

- Топливо: природный газ. При горении природного газа с тепловой сторания  $Q_H^p = 35,4 \text{ МДж/м}^3$  получен следующий расчетный состав продуктов горения:  $\text{CO}_2 = 3,84 \%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 7,62 \%$ ;  $\text{O}_2 = 12,54 \%$ ;  $\text{N}_2 = 76,0 \%$ .
- Общий расход дыма и воздуха  $V_d = 0,05634 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V_B = 0,05417 \text{ м}^3/\text{с}$ .
- Масса насадки  $G = 71,41 \text{ кг}$ .
- Длительность периодов нагрева и охлаждения  $\tau_d = \tau_B = 60 \text{ с}$ .
- Средняя, за период, температура дымовых газов в верхней части насадки внутри трубок получена, равной  $\bar{t}_{\text{Д,ВХ}}^{\text{ВН}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ , снаружи –  $\bar{t}_{\text{Д,ВХ}}^{\text{НАР}} = 770 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Средняя, за период, температура дымовых газов в нижней части насадки внутри трубок получена, равной  $\bar{t}_{\text{Д,ВЫХ}}^{\text{ВН}} = 554 \text{ }^\circ\text{C}$ , снаружи –  $\bar{t}_{\text{Д,ВЫХ}}^{\text{НАР}} = 382 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Средняя по высоте разность температур стенки импульсной трубки в конце дымового и в конце воздушного периодов  $\Delta t_{\text{ср.нас}} = 33,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Средняя, за период, температура воздуха в верхней части насадки внутри трубок получена, равной  $\bar{t}_{\text{В,ВЫХ}}^{\text{ВН}} = 570 \text{ }^\circ\text{C}$ , снаружи –  $\bar{t}_{\text{В,ВЫХ}}^{\text{НАР}} = 730 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Средняя, за период, температура воздуха в нижней части насадки внутри трубок получена, равной  $\bar{t}_{\text{В,ВХ}}^{\text{ВН}} = 228 \text{ }^\circ\text{C}$ , снаружи –  $\bar{t}_{\text{В,ВХ}}^{\text{НАР}} = 326 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Результаты расчета*

- Средние, за период, температуры смеси потоков дыма и воздуха на выходе из насадки определяли по формулам (7) и (8) и составили:  $\bar{t}_{\text{Д,ВЫХ}}^{\text{СМ}} = 549 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\bar{t}_{\text{В,ВЫХ}}^{\text{СМ}} = 573 \text{ }^\circ\text{C}$ .

- Средний удельный расход дыма при равномерном распределении потока по сечению насадки рассчитывали по выражению (2), который составил  $0,00079 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ .
- Локальный удельный расход дыма в месте расположения импульсной трубки определялся из уравнения (5) и получен, равным  $0,00087 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ .
- Корректировочный коэффициент для определения локальной скорости дымовых газов согласно выражению (9) составил  $k_{\text{д}}=1,097$  (т.е. локальная скорость дымовых газов в месте расположения импульсной трубки на 9,7 % больше, чем в среднем по сечению насадки).
- Локальная скорость дымовых газов при н.у. с учетом корректировочного коэффициента внутри труб составила 4,43 м/с, снаружи – 0,197 м/с.
- Средний удельный расход воздуха по сечению насадки из выражения (2) получен, равным  $0,00076 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ .
- Локальный удельный расход воздуха, в месте расположения импульсной трубки составил  $0,00069 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ .
- Корректировочный коэффициент для определения локальной скорости воздуха согласно выражению (10) получен равным,  $k_{\text{в}}=0,91$  (т.е. локальная скорость воздуха в месте расположения импульсной трубки на 9 % меньше, чем в среднем по насадке).
- Локальная скорость воздуха при н.у. с учетом корректировочного коэффициента внутри труб составила 3,57 м/с, снаружи труб – 0,1 м/с.

В результате определения локальных скоростей и расходов теплоносителей в импульсной трубке тепловой баланс для нагревающего и нагреваемого теплоносителей по уравнению (1) соблюдается с погрешностью 0,15 %.

### **Выводы**

Предложен балансировочный способ определения локальной скорости теплоносителя в месте расположения импульсной трубки. Корректировочные коэффициенты для определения локальной скорости находят путем сопоставления двух значений удельного расхода газа на единицу массы труб: среднего по сечению насадки и локального, в месте измерения температур теплоносителей и стенки труб, который

вычисляют с использованием тепловых балансов в системах «дым-  
вые газы – насадка» и «насадка – воздух».

### **Список литературы**

1. Воробьева Л.А., Затопляев Г.М., Губинский В.И. и др. Исследование теплообмена и гидравлического сопротивления в металлическом трубчатом регенераторе // *Металлургическая теплотехника*: Сб. научн. тр. Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: НМетАУ, 2007. – С. 71 – 77.

2. Воробьева Л.А., Губинский В.И. Сравнительные характеристики минирегенераторов с шариковой и трубной насадкой // *Металлургическая теплотехника*: Сб. научн. тр. Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: НМетАУ, 2008. – С. 55 – 68.

3. Е.И. Казанцев Промышленные печи / Е.И. Казанцев // М.: «Металлургия», 1975. – 368 с.

*Рукопись поступила 02.07.2009 г.*