

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ НАГРЕВА ВОЗДУХА ПРИ ПРЯМОМ КОНТАКТЕ С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены особенности методики расчета, динамики теплообмена в воздухоподогревателе новой конструкции, в котором теплопередача осуществляется непосредственно при контакте воздушной струи и спутного потока дымовых газов. Показано, что происходит значительное увеличение скорости теплопередачи за счет отсутствия теплообменных поверхностей и неоднократного повторного сжатия воздушной струи и соответственно уменьшение удельного расхода металла на изготовление струйного воздухоподогревателя по сравнению с известными конструкциями.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что одним из способов повышения эффективности котельных агрегатов является снижение температуры дымовых газов. Так, при снижении температуры дымовых газов на $(12-14)^\circ\text{C}$ КПД котельного агрегата повышается на 1 % [1]. При этом также известно, что при охлаждении дымовых газов до температуры ниже точки росы существенно облегчается задача их очистки от окислов серы (SO_x) и окислов азота (NO_x) [2], [3]. В то же время при охлаждении дымовых газов до температуры ниже точки росы происходит конденсация водяных паров, содержащихся в них, с образованием коррозионноактивного конденсата, что ведет к быстрому коррозионному износу теплообменных поверхностей и выходу из строя воздухоподогревателей котельных агрегатов. Для обеспечения возможности работы воздухоподогревателей в агрессивной среде их теплообменные поверхности изготавливают из коррозионностойких материалов, например из стекла, но при этом снижается скорость теплопередачи, соответственно увеличивается ее площадь, усложняется конструкция и увеличивается стоимость аппарата.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ СТРУЙНОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

На основании анализа турбулентных струй и известных конструкций воздухоподогревателей [1], [4], [5], [6] на кафедре «Теплогазоснабжение и вентиляция» Курского государственного технического университета автором разработаны конструкции струйных воздухоподогревателей [7], [8], одна из которых представлена на рис. 1.

Корпус опытного воздухоподогревателя представляет собой короб, изготовленный из стального листа толщиной 2-3 мм, снабженный штуцерами входа и выхода дымовых газов, коллекторами хо-

лодного и нагретого воздуха, соединенными с рядом первичных сопел и конечным рядом ловушек, расположенных внутри короба соответственно и тремя рядами промежуточных сопел-ловушек, также помещенных внутри короба.

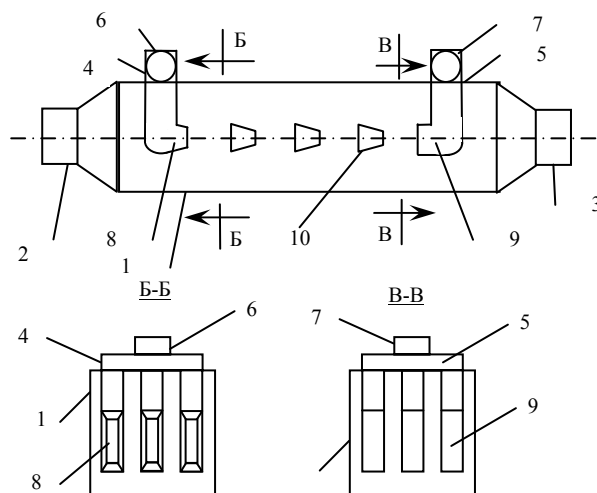


Рис. 1. Принципиальная схема струйного воздухоподогревателя:

1 – короб; 2 – штуцер горячих дымовых газов; 3 – штуцер обратных дымовых газов; 4 – коллектор холодного воздуха; 5 – коллектор нагретого воздуха; 6 – штуцер холодного воздуха; 7 – штуцер нагретого воздуха; 8 – первичное сопло; 9 – конечная ловушка; 10 – вторичное сопло-ловушка

В основу работы струйного воздухоподогревателя положены свойства свободной затопленной турбулентной струи воздуха, в частности плоской струи, которая, распространяясь в направлении истечения, перемешивается в пути на граничной поверхности с окружающей газовой средой, причем перемешивание сопровождается вовлечением в воздушную струю масс газовой среды, сообщением периферийной части газовой среды движения, совпадающего с направлением струи. При этом наряду с перемешиванием граничных слоев воздушной струи и газовой среды происходит интенсивный теплообмен между ними, значительно превышающий скорость теплопередачи через стенку, так как в этом случае отсутствует термическое сопротивление стенки с загрязнениями, конвективный теплообмен осуществляется непосредственной между частицами воздуха и газа и начинает играть существенную роль лучистый теплообмен, что приводит

к быстрому выравниванию температуры воздушной струи и газовой среды [9], [10].

Кроме того, частичное смешение нагреваемого воздуха с дымовыми газами и последующее использование полученной смеси для горения позволяет снизить содержание в дымовых газах NO_x и SO_x [1]. Для уменьшения перемешивания воздушной струи с дымовыми газами с одновременным обеспечением высокой температуры ее нагрева используется повторное сжатие одной и той же воздушной струи, что позволяет снизить градиент скорости на оси струи и соответственно примеси дымовых газов в ней, а также уменьшить толщину струи [11].

3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СТРУЙНОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Процесс нагрева воздуха дымовыми газами в струйном воздухоподогревателе осуществляется следующим образом. Дымовые газы при разрежении, соответствующем режиму работы котельного агрегата или промышленной печи, поступают в газовый короб 1, куда также вентилятором высокого давления по коллектору холодного воздуха 2 через входные патрубки 3 из щелевых сопл 4, количество которых выбирается, исходя из условия создания устойчивых плоских струй со скоростью воздуха, достаточной для последующих сжатий и образования повторных струй, воздух подают в виде параллельных плоских струй, нагреваемых со всех сторон движущимися дымовыми газами, увлекаемыми этими струями, которые далее попадают в промежуточные ловушки-конфузоры 5. При этом в пограничных слоях происходят частичное перемешивание и вовлечение в воздушные струи некоторой части дымовых газов, интенсивный конвективный и лучистый теплообмен между дымовыми газами и воздухом и соответственно быстрый нагрев воздушных струй и охлаждение дымовых газов. Нагретые до промежуточной температуры и частично смешанные с дымовыми газами воздушные струи в промежуточных ловушках-конфузорах 5, расстояние до которых X определяется исходя из условий обеспечения достаточной кинетической энергии струи для повторного сжатия и истечения повторных струй при заданном промежуточном смешении и соответствующей ему температуре нагрева, сжимаются и истекают из промежуточных сопл 6 в виде повторных плоских струй. При этом площадь входных сечений ловушек-конфузоров 5 должна соответствовать заданному расходу воздуха при скорости струи на расстоянии от сопла X , а площади сечений промежуточных сопл 6 — созданию устойчивых поворотных плоских струй со скоростью воздуха меньшей, первоначальной струи, но достаточной для последующего сжатия и истечения, которые взаимодействуют с дымовыми газами аналогично вышеописанному. Нагретые до требуемой температуры воздушные струи с некоторой примесью дымовых газов, количество которых задают из требуемой рециркуляции, попадают в прямоугольные входные отверстия ловушек горячих струй 7,

расположенных аналогично ловушкам-конфузорам 5, с площадью, соответствующей расходу горячего воздуха при скорости входа струи в ловушки 7, откуда через выходные патрубки 8, коллектор горячего воздуха 9, воздух подают для проведения процесса горения в топку котельного агрегата или промышленную печь, а охлажденные дымовые газы выводят из газового короба 1 со скоростью, большей, чем на входе в него, что обусловлено передачей им части энергии воздушных струй.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Технологические и конструктивные параметры струйного воздухоподогревателя привязываются к параметрам дымовых газов котельного агрегата и дутьевого воздуха.

Для опытного образца были приняты следующие параметры дымовых газов и воздуха: температура горячих газов $t_2 = 150$ °С; скорость движения дымовых газов в коробе воздухоподогревателя $u_n = 10$ м/с; температура холодного воздуха $t_{хв} = 25$ °С; конечная концентрация дымовых газов в воздухе $x_k = 20$ % об.; скорость истечения воздуха из сопла 1-й ступени $u_0 = 60$ м/с (принимается по давлению, развиваемому вентилятором); ширина щели сопла $2B = 0.02$ м; длина щели сопла $h = 0.08$ м (окончательные размеры входного сечения сопла устанавливаем из расчета геометрических размеров воздушной струи), число сопл в ряду ступени $N = 3$ (величины $2B$, h , N принимаем, исходя из номинальной производительности вентилятора и начальной скорости истечения воздуха).

Расчет параметров воздушных струй, истекающих из сопл и концентрации в них дымовых газов проводим по уравнениям, приведенным в литературе [1], [9-13].

Нижние пределы длины струи

$$X_{\min} = m^2 2B, \quad (1)$$

$$\text{или } X_{\min} = n^2 2B, \quad (2)$$

где комплексные коэффициенты $m = 2.62$ и $n = 2.49$.

Относительная осевая температура струи на расстоянии X

$$\theta_x = \frac{n\theta_0 \sqrt{2B}}{\sqrt{X}}, \quad (3)$$

где θ_0 — относительная осевая температура в начальном сечении струи, °С.

Действительная температура воздушной струи на расстоянии X

$$t_x = T_0 + (\theta_0 - \theta_ч). \quad (4)$$

Температура дымовых газов после контакта с воздушной струей на расстоянии X находится из уравнения теплового баланса

$$V_{гг}(T_{гг} - T_{гк}) = V_{вг}(T_x - T_0) \quad (5)$$

Температуру воздушной струи после прохождения через сопло находим из совместного решения уравнений теплопередачи через стенку сопла и теплового баланса:

$$Q = K \Delta t F, \quad (6)$$

$$T' = T_x + \frac{Q}{c_p V_{\Gamma}}, \quad (7)$$

где Q – количество тепла, переданного воздушной струей через стенку сопла, кДж/с; K – коэффициент теплопередачи от дымовых газов к воздуху через стенку сопла, Вт/(м²·К); Δt – температурный напор, К; F – площадь стенок сопла, м² (принимаем по расчетным размерам сопла),

$$K = \xi \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad (8)$$

где $\xi = 0.85$ – коэффициент загрязнения.

Осевая скорость струи на расстоянии X

$$u_x = \frac{m u_o \sqrt{2B}}{\sqrt{X}}. \quad (9)$$

Ширина струи на расстоянии X

$$T_s = 2(2.4aX / B_o + 1) B_o. \quad (10)$$

Высота струи на расстоянии X

$$T_h = 2 \left(2.4aX / \frac{h}{2} + 1 \right) \frac{h}{2}. \quad (11)$$

Скорость на периферии струи на расстоянии X

$$u = u_{\max} \cdot \left(1 - \frac{y^{1.5}}{b} \right)^2, \quad (12)$$

где y – расстояние от оси струи по длине X , м; b – полутолщина струи на расстоянии X , м.

Площадь входного сечения ловушки

$$F_{\text{л}} = \frac{V_{\text{в}}}{u_{\text{ср}}}, \quad (13)$$

где $u_{\text{ср}}$ – средняя скорость на входе в ловушку, м/с.

Размеры ловушки

$$h = \frac{F_{\text{л}}}{b}. \quad (14)$$

Изменение концентрации дымовых газов по длине воздушной струи на расстоянии X

$$\Delta \bar{x} = \frac{x_x - x_H}{x_0 - x_H}. \quad (15)$$

В то же время безразмерная избыточная концентрация воздуха в струе на расстоянии X

$$\Delta \bar{x} = k_x \Delta \bar{u}_m, \quad (16)$$

где

$$\Delta \bar{u}_m = \frac{u_x - u_H}{u_o - u_H}, \quad (17)$$

k_x – поправочный коэффициент,

$$k_x = \frac{\Delta \bar{T}_m}{\bar{u}_m}, \quad (18)$$

где \bar{u}_m – безразмерное изменение скорости струи на расстоянии X ;

$$\bar{u}_m = \frac{u_x}{u_o}, \quad (19)$$

$\Delta \bar{T}_m$ – относительное изменение температуры струи на расстоянии X

$$\Delta \bar{T}_m = \frac{T_x - T_H}{T_o - T_H}. \quad (20)$$

Уменьшение скоростного напора

$$\Delta H = \zeta \frac{u_x^2}{2}, \quad (21)$$

где ζ – коэффициент сопротивления сопла.

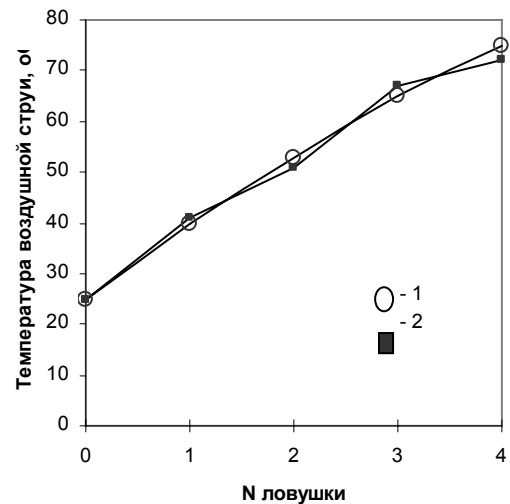
Действительный динамический напор струи на выходе из сопла

$$H = \frac{u_x^2}{2} - \Delta H. \quad (22)$$

Скорость истечения воздуха из сопла

$$u_o = \sqrt{2H}. \quad (23)$$

Результаты технологического расчета и опытные данные приведены на рис. 2, 3.



Рис/ 2. Профиль температур воздушной струи по длине струйного воздухоподогревателя °С: 1 – расчетные данные; 2 – опытные данные

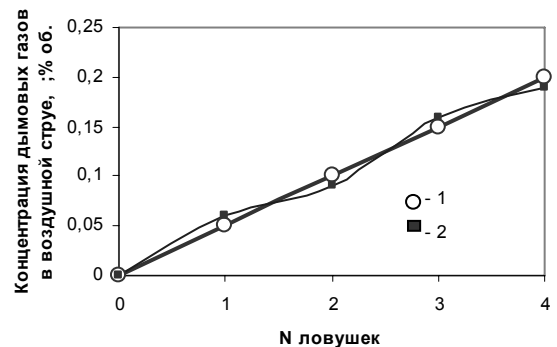


Рис. 3. Профиль концентраций дымовых газов в воздушной струе по длине струйного воздухоподогревателя: 1 – расчетные данные; 2 – опытные данные

Хорошая сходимость результатов расчета и опытных данных (отклонения не больше 5%) позволяют использовать вышеприведенную методику для расчета технологических параметров струйного воздухоподогревателя.

Конструктивный расчет основных размеров и штуцеров струйного воздухоподогревателя проводили на основании полученных технологических параметров по методикам расчета, приведенным в [1, 13]. При этом получили, что расстояние между соплами и ловушками по длине аппарата (равное длине воздушной струи) $X = 0.15$ м, длина сопла, $l = 0.13$ м, расстояние между соплами по ширине аппарата $S = 0.16$ м, значения которых использованы при определении основных размеров воздухоподогревателя.

Общий расход металла (стальной лист толщиной 2 мм) на изготовление струйного воздухоподогревателя с вышеприведенными характеристиками равен (80–90) кг. Сравнение расхода металла на изготовление струйного воздухоподогревателя и аналогичного по своим тепловым характеристикам трубчатого воздухоподогревателя с диаметром труб равным 40 мм показывает, что для изготовления последнего требуется в (2.5–3) раза больше металла.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты теоретического анализа, расчета и эксперимента показывают, что рассмотренная конструкция струйного воздухоподогревателя позволяет за счет отсутствия теплообменных поверхностей резко повысить скорость теплообмена, снизить металлоемкость конструкции, уменьшить количество корродируемого металла, снизить аэродинамическое сопротивление устройства и улучшить экологические показатели дымовых газов. Эти положительные показатели позволяют предположить, что струйные воздухоподогреватели могут найти применение при оснастке оборудованием для охлаждения дымовых газов до температуры ниже точки росы, при которой наиболее интенсивно протекают процессы коррозии хвостовых поверхностей. В то же время охлаждение дымовых газов до температуры ниже точки росы позволяет повысить КПД и наиболее эффективно проводить процессы очистки их от окислов серы и окислов азота, что является одной из важнейших характеристик качества работы современного котельного агрегата.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- T_0 – температура воздушной струи на выходе из сопла, К;
- T_x – температура воздушной струи на входе в ловушку, К;
- T_n – температура дымовых газов на выходе из сопла, К;
- $T_{нк}$ – температура дымовых газов на выходе на входе в ловушку, К;
- V_r, V_v – расход дымовых газов (воздуха), м³/с;
- c_r, c_v – теплоемкость дымовых газов (воздуха), кДж/(м³·К);
- α_1 – коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке сопла, Вт/(м³·К);
- α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки сопла к воздушной струе, Вт/(м³·К);
- a – коэффициент турбулентности плоской струи;
- x_0 – концентрация дымовых газов в воздушной струе на выходе из сопла, % об.;
- x_x – концентрация дымовых газов в воздушной струе на входе в ловушку, % об.;
- x_n – концентрация дымовых газов в спутном потоке, % об.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Делягин Г.Н. и др. Теплогенерирующие установки. М.: Стройиздат, 1986. 560 с.
2. Пат. 2161528 РФ, МПК В 01 D 53/34// Бюл. №1. 2001.
3. Пат. 2186612 РФ, МПК В 01 D 53/60// Бюл. №22. 2002.
4. Добряков В. К. и др. Воздухоподогреватели котельных установок. Л.: Энергия, 1977. 183 с.
5. А.с. 964356 СССР, МПК. F 23 L 15/04// Бюл. №37. 1982.
6. А.с. 1370372 СССР, МПК. F 23 L 15/04// Бюл. №4. 1988.
7. Пат. 2230258 РФ, МПК F23L15/00// Бюл. №16. 2004.
8. Заявка 2003131109/06, РФ, МПК F23L15/00// Бюл. №10. 2005.
9. Альтшуль А.Д. и др. Гидродинамика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987. 415 с.
10. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. 145 с.
11. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
12. Угинчус А.А. Гидравлика и гидравлические машины. Харьков.: Изд. Харьк. ун-та, 1966. 400 с.
13. Частухин В.И. Тепловой расчет промышленных парогенераторов. Киев.: Высшая школа, 1980. 184 с.