

И.Г. Яковлева, зав. кафедрой, профессор, д.т.н.

И.Н. Мных, ассистент

Е.Н. Барищенко, доцент, к.т.н.

ДВИЖЕНИЕ СТРУИ ВОЗВРАТА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ПОДПОДОВОЙ ТОПКЕ И РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ КАМЕРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Запорожская государственная инженерная академия

Одержано залежність для визначення мінімальної швидкості струменя повернення, що витікає з сопла, у запропонованій конструкції камерної термічної печі. Розраховано параметри струменя та мінімальний коефіцієнт повернення. Для забезпечення реверсивного подавання продуктів згорання визначено втрати тиску щодо всього контуру рециркуляції.

Получена зависимость для определения минимальной скорости струи возврата, истекающей из сопла, в предложенной конструкции камерной термической печи. Рассчитаны параметры струи и минимальный коэффициент возврата. Для обеспечения реверсивной подачи продуктов сгорания определены потери давления по всему контуру рециркуляции.

Введение. В настоящее время в термических, прессовых и кузнечных цехах машиностроительных заводов и заводов по производству легированной стали широко применяются камерные печи со стационарным подом, которые отапливаются разными видами газообразного топлива: природным, коксовым и доменным газами в различных соотношениях. В данных печах осуществляют термическую обработку разных по форме и размерам заготовок при различных режимах в диапазоне температур от 250 до 920 °С.

В камерных печах изделия нагревают в садках, имеющих объем, соизмеримый с объемом нагревательной камеры. Изделия помещают в рабочее пространство одновременно или в течение короткого промежутка времени, поэтому на начальном этапе тепловой обработки наблюдается пониженная температура газов и стенок печи, а затем, по мере нагрева изделий, температура печи повышается. В процессе тепловой обработки по достижении заданной температуры поверхности металла производится выдержка, необходимая для выравнивания температуры металла по его поверхности и сечению.

Длительное выравнивание температуры по сечению металла приводит к увеличению расхода топлива и снижению производительности процесса. Кроме того, режимы термообработки легированных сталей сложны и предусматривают неоднократные этапы нагрева и охлаждения металла, что в результате приводит к неравномерному нагреву металла и увеличению длительности периода выдержки [1].

Постановка задачи. С целью интенсификации теплообмена и увеличения теплоотдачи от газа к металлу была поставлена задача совершенствования тепловой работы камерной термической печи.

Основная часть исследований. Для решения поставленной задачи

предложено усовершенствование конструкции камерной термической печи путем размещения сопел подачи возврата отработанных продуктов сгорания, благодаря чему обеспечивается реверсивная подача теплоносителя, увеличивается суммарная кратность рециркуляции и скорость теплоносителя [2].

Чтобы доказать целесообразность применения данной конструкции печи необходимо определить возможность преодоления струей возврата длины топки, рассчитать минимальную величину коэффициента возврата для обеспечения реверсивной подачи продуктов сгорания, а также определить кинетическую энергию струи возврата и потери давления при движении по контуру рециркуляции.

Для обеспечения реверсивной подачи продуктов сгорания струе возврата необходимо преодолеть расстояние x , то есть длину топки (рис. 1). Сопротивлением горелки пренебрегаем, поскольку подача возврата осуществляется при минимальной подаче топливно-воздушной смеси, так как струя топливно-воздушной смеси направляется в выходной канал, не создавая сопротивление возврату.

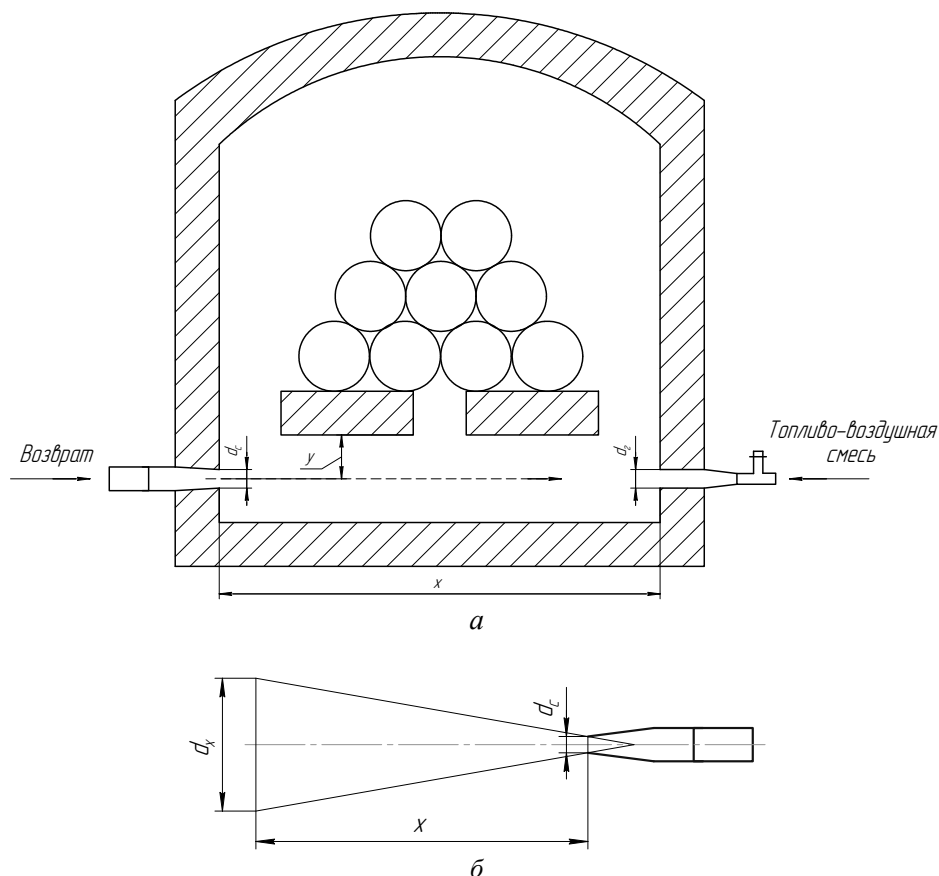


Рисунок 1 – Схемы движения струи возврата в подподовой топке (а) и истечения возврата из сопла (б)

Отклонение струи возврата от оси сопла выражается формулой [3]:

$$Y = 0,36 \frac{1}{0,076} \cdot Ar \cdot (X^3 + 0,86 \cdot X^2) , \quad (1)$$

где $Y = 0,076 \cdot \frac{y}{r_c}$; $X = 0,076 \cdot \frac{x}{r_c}$; Ar – критерий Архимеда, $Ar = \frac{g \cdot r_c \cdot \rho_{\epsilon} - \rho_{p.n.}}{w^2}$; r_c – радиус сопла, м; y – расстояние от оси сопла до пода, м; x – длина подподовой топки, м; w – скорость подачи возврата продуктов сгорания, м/с; ρ_{ϵ} – плотность возврата, кг/м³; $\rho_{p.n.}$ – плотность продуктов сгорания в рабочем пространстве печи, кг/м³.

После преобразования выражения (1) получают уравнение для определения минимальной скорости возврата $w_{\min}$, при которой струя достигает противоположной стены топки, то есть происходит реверсивная подача продуктов сгорания, поскольку сопло с возвратом служит инжектором, и газы начинают подсасываться через выходной рециркуляционный канал:

$$w_{\min} = 1,748 \cdot x \cdot \sqrt{\frac{1}{y} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{p.n.}}{\rho_{\epsilon}}\right) \cdot \left(0,176 \cdot \frac{x}{d_c} + 1\right)}. \quad (2)$$

Минимальный расход возврата для обеспечения реверсивной подачи продуктов сгорания определяют по диаметру сопла и скорости возврата:

$$V_{\epsilon, \min} = 0,795 \cdot w_{\min} \cdot d_c^2, \quad (3)$$

где d_c – диаметр сопла, м².

Минимальный коэффициент возврата m в зависимости от его расхода $V_{\epsilon \min}$ рассчитывают по формуле [4]:

$$m_{\min} = \frac{V_{\epsilon, \min}}{V_c \cdot v' \cdot (1 + U \cdot v)}, \quad (4)$$

где V_c – расход свежих продуктов сгорания, поступающих от горелки, м³/с; v , v' – температурные поправки, учитывающие отличие температуры свежих продуктов сгорания от отработанных и от возврата соответственно; U – первичная кратность рециркуляции.

Диаметр раскрытия струи возврата на расстоянии x (рис. 2) от сопла d_x вычисляют с использованием формулы Г.Н. Абрамовича [5]:

$$d_x = 0,517x + d_c. \quad (5)$$

Если $\rho_{\epsilon} \neq \rho_{p.n.}$, то используют эквивалентный диаметр струи d_{ϵ} :

$$d_{\epsilon} = d_c \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\epsilon}}{\rho_{p.n.}}}. \quad (6)$$

Тогда выражение для определения диаметра струи d_x принимает вид:

$$d_x = 0,517 \cdot x + d_c \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\epsilon}}{\rho_{p.n.}}}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что при истечении возврата в рабочее

пространство печи диаметр его струи будет увеличиваться.

Для преодоления рециркуляционного контура необходимо определить кинетическую энергию струи возврата, а также потери давления на каждом участке в рабочем пространстве печи (рис. 2).

Скоростной динамический напор $P_{дин}$ или кинетическая энергия 1 м³ возврата составляет:

$$P_{дин} = \frac{w_c^2 \cdot \rho_a}{2} = \frac{w_c^2}{2} \cdot \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot t_a}, \quad (8)$$

где t_a – температура возврата продуктов сгорания, К; ρ_0 – плотность продуктов сгорания при нормальных условиях, кг/м³; β – коэффициент объемного расширения, 1/К.

I участок – «подподовая топка-канал входа»:

$$\Delta E_{I \dot{O}^2} = \lambda \cdot \frac{L_{\dot{O}}}{d_{\dot{O}}} \cdot \frac{\rho_{\dot{m}} \cdot W_{\dot{O}}^2}{2} + \Sigma \xi_{\dot{O}} \cdot \frac{\rho_{\dot{m}} \cdot W_{\dot{O}}^2}{2}, \quad (9)$$

где λ – коэффициент трения; L_T – длина подподовой топки, $L_T = 2,56$ м; $\rho_{см}$ – плотность смеси продуктов сгорания с возвратом, кг/м³; d_T – эквивалентный диаметр под-подовой топки, $d_T = 0,464$ м; $\Sigma \xi_T$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений участка I, которая учитывает потери при слиянии возврата и отработанных газов, а также потери при повороте потока в вертикальной плоскости на 90°, $\Sigma \xi_T = 0,6$ [6].

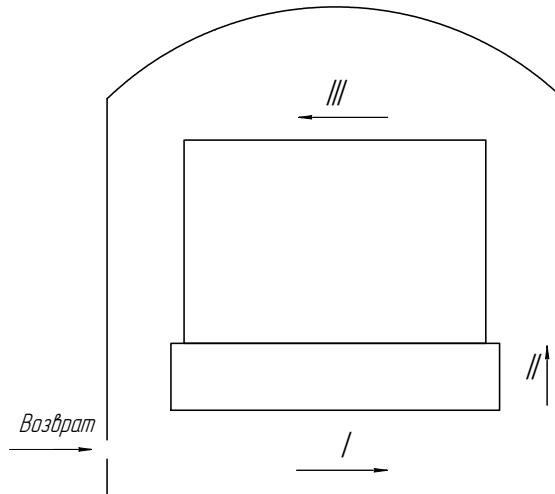


Рисунок 2 – Схема движения смеси газов при подаче возврата

II участок – «канал входа-рабочее пространство»:

$$\Delta E_{II \dot{O}^2} = \lambda \cdot \frac{h_{\dot{O}}}{d_{\dot{O}}} \cdot \frac{\rho_{\dot{m}} \cdot W_{\dot{O}}^2}{2} + \Sigma \xi_{\dot{O}} \cdot \frac{\rho_{\dot{m}} \cdot W_{\dot{O}}^2}{2} + \rho_{\dot{m}} \cdot g \cdot h_{\dot{O}}, \quad (10)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; h_{ex} – высота канала входа, $h_{ex} = 0,50$ м; d_{ex} – эквивалентный диаметр входного канала, $d_{ex} = 0,37$ м; $\Sigma \xi_{ex}$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений участка II, которая учитывает потери при расширении канала и потери при выходе газов в рабочее пространство, $\Sigma \xi_{ex} = 2,1$

[6].

III участок – «рабочее пространство-канал выхода»:

$$\Delta P_{\text{III}} = \lambda \cdot \frac{L_{p.n.} \cdot \rho_{\text{III}} \cdot W_{\text{III}}^2}{d_{p.n.}} + \sum \xi_{\text{III}} \cdot \frac{\rho_{\text{III}} \cdot W_{\text{III}}^2}{2}, \quad (11)$$

где $L_{p.n.}$ – длина траектории движения газов в рабочем пространстве, $L_{p.n.} = 5,56$ м; $d_{p.n.}$ – эквивалентный диаметр проходного сечения проточных зон рабочего пространства печи, $d_{p.n.} = 0,721$ м; $\sum \xi_{p.n.}$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений в рабочем пространстве участка III, которая учитывает потери на двух плавных поворотах на 90° и потери при входе в выходной канал, $\sum \xi_{p.n.} = 0,98$ [6].

Результаты расчетов. Расчеты, выполненные с использованием формул (2)-(7) показали, что минимальный коэффициент возврата составляет $m = 0,06$, а диаметр раскрытия струи $d_x = 1,43$ м. Поскольку минимальный заданный коэффициент возврата $m = 0,1 > 0,06$, то струя возврата отработанных продуктов сгорания преодолевает сопротивление подподовой топки, следовательно, будет обеспечена реверсивная подача теплоносителя.

Результаты расчетов потери давления по контуру рециркуляции приведены на рис. 3. При коэффициенте возврата $m = 0,1$ динамическое давление его струи достигает 15 Па, а потери давления по контуру рециркуляции – 18 Па, то есть энергии струи возврата достаточно только на преодоление сопротивления топки и входного канала. При $m \geq 0,2$ минимальное динамическое давление струи составляет 59 Па, потери давления – 22 Па, следовательно, энергии струи хватает на преодоление сопротивления всего контура рециркуляции – топки, входного канала и рабочего пространства до канала выхода.

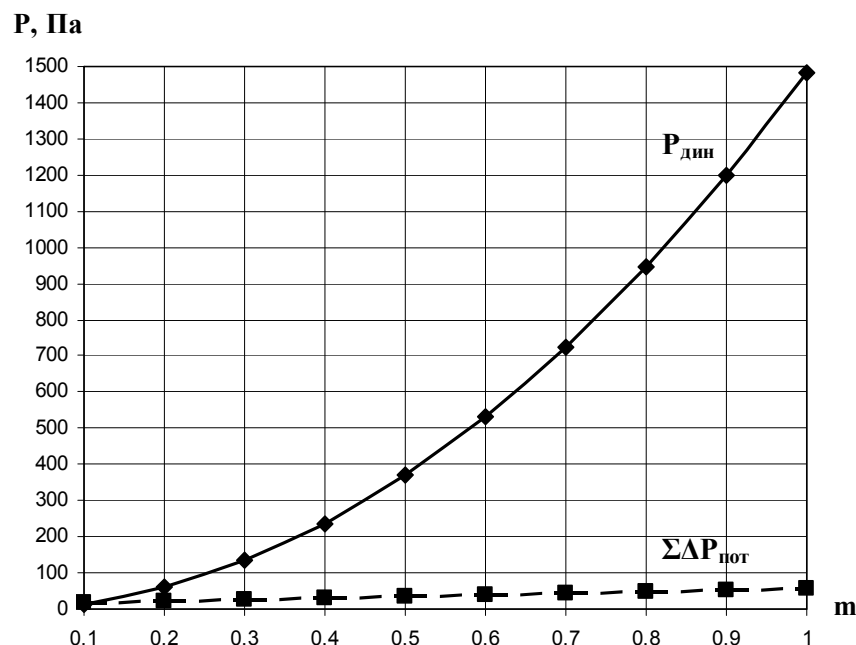


Рисунок 3 – Зависимость динамического давления и потери давления возврата, исходящего из сопла, от коэффициента возврата

Выводы

Согласно выполненным расчетам параметров струи возврата величина минимального коэффициента возврата составляет $m = 0,06$, при этом происходит реверсивная подача продуктов сгорания в подподовой топке рассмотренной конструкции. Результаты аэродинамического расчета при $m \geq 0,2$ показали, что энергии струи возврата достаточно для преодоления сопротивления всего контура рециркуляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губинский, В. И. Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей [Текст] / В. И. Губинский // *Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов национальной металлургической академии Украины*. В двух книгах. – Книга 1. – Днепропетровск, 2005. – С. 149-156.
2. Камерна термічна піч [Текст] : пат. 55197 Україна: МПК F 27 В 3/00 / *Ревун М. П., Яковлева І. Г., Мних І. М., Барищенко О. М.*, ; заявник і патентовласник Запорізька державна інженерна академія. – № u201005977 ; заявл. 18.05.2010 ; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23. – 4 с.
3. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах [Текст] / Ю. И. Розенгарт, Б. Б. Потапов, В. М. Ольшанский, А. В. Бородулин. – Киев-Донецк : Вища школа. Головное изд-во, 1986. – 296 с. – Библиогр. : с. 292-294.
4. Яковлева, И. Г. К расчету параметров греющей смеси продуктов сгорания в термической печи при реверсивной подаче возврата в подподовую топку [Текст] / И. Г. Яковлева, И. Н. Мных, Е. Н. Барищенко // *Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов национальной металлургической академии Украины*. – Днепропетровск : Новая идеология, 2011. – Выпуск 3 (18). – С. 155-163.
5. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика [Текст] / Г. Н. Абрамович. В двух частях : учеб. руководство для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука. Главная редакция физ-мат. литературы, 1991. – 600 с. – Библиогр. : с. 590-592. – ISBN 5-02-014015-5.
6. Сучков, В. Д. Механика движения газов [Текст] : учеб. пособие / В. Д. Сучков, С. Н. Гушин, М. В. Канторов. – Свердловск : УПИ, 1975. – 124 с. – Библиогр. : с. 121-122.

Стаття надійшла до редакції 02.03.2012

р.
Рецензент, проф. О.І. Чепрасов