

Быстров А.Е. – мл. научн. сотр., НМетАУ

Флейшман Ю.М. – канд. техн. наук, ст. научн. сотр., НМетАУ

Волкова М.М. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ

Щурова Н.И. – ст. препод., НМетАУ

ОСОБЕННОСТИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАСАДКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ПРОХОДАМИ ДОМЕННОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ

В работе представлены особенности физического моделирования аэрогазодинамических процессов в насадке доменного воздухонагревателя с горизонтальными проходами.

Введение

Стремление к улучшению экономичности и надёжности работы доменных воздухонагревателей привело к появлению новых типов насадочных изделий. К насадке предъявляется ряд требований, одним из которых является минимум потерь энергии проходящего потока в газовой и воздушный периоды. Аэродинамическое сопротивление насадки – одна из основных её теплотехнических характеристик. Используемые виды регенеративных насадок существенно отличаются между собой. При расчете потерь давления в насадке воздухонагревателя необходимо знать аэрогазодинамические характеристики насадочных изделий, из которых она состоит, для выбора тягодутьевых устройств.

Постановка задачи

Разработана совместно с ОАО “Запорожогнеупор” и “Управлением металлургическими заводами” новая конструкция насадки с горизонтальными проходами [1] (рис. 1). Горизонтальными проходами оснащены вертикальные каналы (в том числе, и вертикальные каналы, находящиеся в замках), расположение которых на горизонтальных поверхностях блоков не препятствует выполнению технологического процесса их изготовления.

Изучаемое движение газа в насадке, имеющей вертикальные каналы с горизонтальными проходами, – это движение в ограниченном пространстве сложной (особенной) формы.

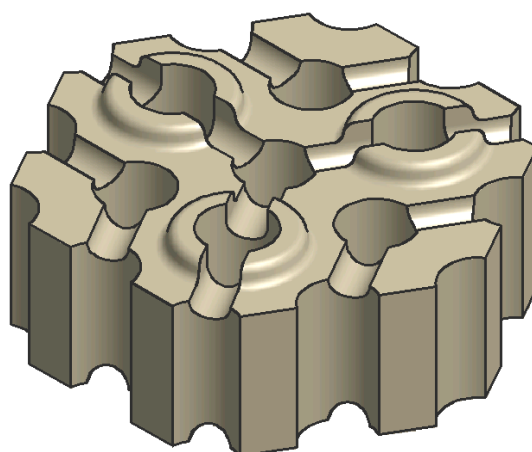


Рис. 1 Насадочное изделие воздухонагревателя

На действующем воздухонагревателе указанную задачу решить невозможно, т.к. указанные насадочные изделия ещё только готовятся к производству, поэтому исследования можно проводить только при помощи моделирования. Кроме того, натуральные исследования более громоздкие и дорогостоящие.

Учитывая сложность системы каналов (разветвленной сети), которыми пронизана насадка, целесообразно применить приближенное физическое моделирование. Для этого в физической модели были предусмотрены 3 трубы, имитирующие аэрогазодинамику и теплообмен: в гладком вертикальном канале насадочного изделия, в вертикальном канале с двумя горизонтальными проходами, в вертикальном канале с тремя горизонтальными проходами (рис. 2). В качестве модельной среды был выбран атмосферный воздух. Горизонтальные проходы в модели имитируются в виде ниш (полуканалов), из предположения, что картина течения симметрична без перетока воздуха из канала в канал. Расход воздуха V_{v_i} через каждый i -ый канал постоянен ($V_{v_i} = const$). При прохождении воздушного потока через 2 последних вида труб, при переходном и турбулентном режимах течения, в местах пересечения вертикальных каналов с горизонтальными проходами возникает вихревая зона, распространяющаяся вглубь патрубков, имитирующих горизонтальные проходы [2]. Эти вихри, взаимодействуя с потоком воздуха, проходящего по вертикальному каналу, турбулизуют его.

При движении газа в канале его полное давление ($P_{полн.}$) постепенно убывает:

$$P_{полн.} = P_{ст.} + P_{дин.} + P_{геом.}, \quad (1)$$

где $P_{ст.}$ – статическое давление, Па; $P_{дин.}$ – динамическое давление, Па; $P_{геом.}$ – геометрическое давление, Па.

Это объясняется тем, что при преодолении различных препятствий на пути движения газа часть его энергии полного давления необратимо переходит в теплоту, в результате ударов и трения молекул газа друг с другом и с окружающими их стенками. Таким образом, по разности полных давлений в начале исследуемого участка канала и его конце можно определить величину аэродинамических потерь на этом участке.

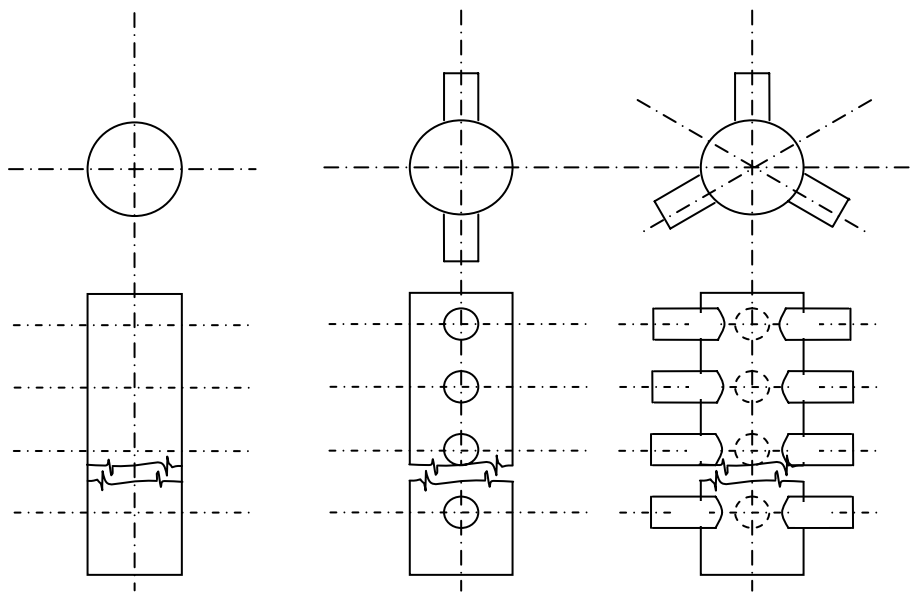


Рис. 2. Типы вертикальных каналов в насадке с горизонтальными проходами:
 1- гладкий канал;
 2- канал с двумя горизонтальными проходами;
 3- канал с тремя горизонтальными проходами

Аэродинамические потери давления подразделяются на потери при трении, обязанные повсеместному трению движущегося газа и на потери давления при деформации потока, обязанные преодолению локальных местных сопротивлений: на поворотах, сужениях, расширениях трубопровода, запорной арматуре, измерительных и регулирующих устройствах и других препятствиях, вызывающих возмущение потока. При обтекании газом местных сопротивлений в потоке возникают вихревые зоны – зоны интенсивного трения и ударов, в которых часть энергии полного давления необратимо переходит в теплоту.

Так как горизонтальные проходы в исследуемых каналах равномерно распределены по длине канала, то, условно, можно рассматривать каналы как "макрошероховатые". Таким образом, потери полного давления будут обусловлены трением и геометрическим напором.

Потери давления на трение рассчитывали по Дарси-Вейсбаху:

$$\Delta P_{\text{поттр}} = \lambda \frac{L}{d_z} P_{\text{дин}}, \text{ Па} \quad (2)$$

где L – длина канала, м; d_z – гидравлический диаметр канала, м; λ – эквивалентный коэффициент трения.

Экспериментальное определение эквивалентного коэффициента трения производилось на прямолинейном участке трубопровода постоянного сечения (чтобы исключить влияние местного сопротивления) путём замера в двух сечениях по длине трубопровода статического давления, температуры и расхода газа.

При движении газа из сечения 1 в сечение 2 согласно уравнению Бернулли:

$$P_{1\text{ст}} + P_{1\text{дин}} + P_{1\text{геом}} = P_{2\text{ст}} + P_{2\text{дин}} + P_{2\text{геом}} + \Delta P_{\text{поттр}}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{поттр}}$ – потери полного давления на трение на пути между первым и вторым сечениями.

В трубопроводе постоянного сечения $P_{1\text{дин}} = P_{2\text{дин}}$, уравнение (3) примет вид:

$$\Delta P_{\text{поттр}} = (P_{1\text{ст}} - P_{2\text{ст}}) + (P_{1\text{геом}} - P_{2\text{геом}}) = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{геом}}. \quad (4)$$

Т. к. трубопровод расположен вертикально, то разность уровней между сечениями 1 и 2 равна его длине L , поэтому разность геометрических давлений:

$$\Delta P_{\text{геом}} = \rho \cdot g \cdot L. \quad (5)$$

Используя уравнения (2) и (4), можно рассчитать коэффициент трения:

$$\lambda = \frac{\Delta P_{\text{поттр}}}{P_{\text{дин}}} \cdot \frac{d_z}{L} = \frac{(\Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{геом}})}{P_{\text{дин}}} \cdot \frac{d_z}{L}. \quad (6)$$

Зная расход газа V , его плотность ρ и площадь сечения канала F , получаем динамическое давление:

$$P_{\text{дин}} = \frac{w^2 \rho}{2}, \quad (7)$$

$$w = \frac{V}{F}, \text{ м/с}. \quad (8)$$

Для определения эквивалентного коэффициента трения необходимо измерить:

- статическое давление в сечениях 1 и 2;
- расход газа через трубопровод (модель вертикальных и горизонтальных каналов);
- среднюю температуру газа (для определения его свойств).

Обработка результатов

При укладке блоков с перевязкой каналы чередуются по высоте насадки, и в результате получаем совокупный вертикальный канал, состоящий из участков трёх типов. При этом один насадочный блок имеет 12 вертикальных каналов, из них: гладких – 1 канал, с двумя горизонтальными проходами – 10 каналов, с тремя горизонтальными проходами – 1 канал. Результирующий коэффициент трения, усредненный для всего блока, как для сети, состоящей из параллельных каналов [3]:

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{12}{\frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} + \frac{10}{\sqrt{\lambda_2}} + \frac{1}{\sqrt{\lambda_3}}} \right)^2, \quad (9)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коэффициенты трения 1, 2, 3-го типов вертикальных каналов, включенных параллельно.

Согласно теории подобия и размерности [4], моделируемая задача может быть представлена в виде связи $Eu = f(Re)$:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho w^2}; \quad (10)$$

$$Re = \frac{wd\rho}{\eta} = \frac{wd}{\nu}, \quad (11)$$

где Eu и Re – числа Эйлера и Рейнольдса; ΔP – перепад давлений на участке; w – средняя скорость движения газа в вертикальном канале; η – коэффициент динамической вязкости; ν – кинематическая вязкость; ρ – плотность среды; d – гидравлический диаметр канала.

На практике пользуются выражением:

$$\lambda_{mp} = A \cdot Re^n, \quad (12)$$

где A и n – эмпирические коэффициенты, определяемые графическим способом.

После логарифмирования (12) получаем:

$$\lg \lambda_{mp} = \lg A + n \cdot \lg Re. \quad (13)$$

Выражение (12) – это уравнение прямой линии в логарифмической системе координат ($\lg(\lambda_{mp}), \lg(Re)$):

$\lg A$ – есть отрезок, отсчитанный от начала координат до точки пересечения указанной прямой с осью $\lg \lambda_{mp}$;

$$n = \operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta \lg \lambda_{mp}}{\Delta \lg Re} = \frac{\lg \lambda_{mp2} - \lg \lambda_{mp1}}{\lg Re_2 - \lg Re_1}, \quad (14)$$

где γ – угол между упомянутой прямой и осью $lgRe$.

Выводы

1. Разработана физическая модель для исследования аэродинамической характеристики насадки с горизонтальными проходами.
2. Разработана методика проведения эксперимента и обработки результатов измерения.

Список литературы

1. Патент на полезную модель № 38746 МПК UA 3054 кл C21в 9/10, МПК 7 В32В 3/12. Насадка доменного воздухонагревателя; от 12.01.2009
2. М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
3. Металлургические печи. Теория и расчёты: Учебник. В 2 т. М54Т.1 / В.И. Губинский [и др.] под общ. ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 596 с. ISBN 978-985-08-795-3.
4. Л.И.Седов, Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1965. – 386 с.

Рукопись поступила 02.07.2009 г.