Общероссийский математический портал

В. В. Копцев, Методика расчета горелочных устройств на базе сопла с центральным телом, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2007, выпуск 1(), 148–153

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu504>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.237.206.68

26 апреля 2023 г., 12:50:35

Р и с. 5. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика радиального электромагнитного подшипника по отношению к возмущающему воздействию $F_{BX}(p)$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаричев Ю. А., Стариков А. В., Стариков А. В. Математическая модель радиального электромагнитного подшипника как объекта управления // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сборник науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 1998. С. 80–86.
2. Вейнберг Д. М., Верещагин В. П. К определению основных параметров электромагнитных подшипников. М.: Труды ВНИИЭМ, Т. 89, 1989. С. 12–19.
3. Патент России № 2181922. Система управления электромагнитным подвесом ротора / Ю. А. Макаричев, А. В. Стариков, А. В. Стариков. Опубл. 27.04.2002. Бюл. № 12.
4. Рапопорт Э. Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Куйбышев: КПТИ, 1985. 56 с.

Поступила 4.07.2006 г.

УДК 666.92.041

В. В. Концев

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ СОПЛА С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

Приведена методика расчета горения высокоскоростных потоков газа с использованием горелочного устройства на базе сопла с центральным телом, схема головки которого подобна аэродинамической конфигурации кольцевого сопла с нулевым наклоном минимального сечения с двойным расширением. Представлены конструктивные особенности серии горелочных устройств с центральным телом, разработанных автором, и проиллюстрированы их основные достоинства.

Сопла с центральным телом (или «тарельчатые» сопла, сопла с прямолинейной верхней стенкой) находят, в основном, применение в авиапромышленности при изготовлении реактивных двигателей [1–5]. Автором предложена еще одна область практического применения сопел с центральным телом в качестве одного из элементов конструкции горелочных устройств в нагревательных и термических печах различного назначения [6–9].

Известно, что для обеспечения максимальной степени смешения природного газа с потоком воздуха необходимо обеспечить максимально возможную величину кинетической энергии газового потока. Энергия газового потока является функцией скорости. Наиболее существенное увеличение энергии обеспечивается за счет достижения сверхкритических скоростей газового потока. Основным средством получения сверхкритических скоростей являются сопла Лавала. Сверхкритические скорости истечения газового потока можно также получить с помощью сопла, образованного конической обечайкой и телом Коанда [10-12]. Разработанные на базе тела Коанда горелочные устройства типа ГГТ (горелка газовая турбулентная) хорошо себя зарекомендовали во вращающихся печах известняково-доломитового производства ОАО ММК, принося многомиллионный годовой эффект [10].

Конструкция головки нового горелочного устройства (рис. 1), предложенная автором данной работы [9, 13], подобна соплу с центральным телом турбореактивного двигателя (ТРД) [1, 14]. В таком сопле газ истекает из кольцевого канала между центральным телом и обечайкой. Критическое сечение может регулироваться продольным перемещением центрального тела.

Сжигание природного газа в разработанных автором горелочных устройствах на базе сопла с центральным телом (ГЦТ) сопровождается разнообразными физическими процессами. На выходе трубы горелки происходит формирование потока газа с критической скоростью. При этом в специальной конструкции головки сопла образуются чередующиеся волны сжатия и разрежения. Это обеспечивает совершенное перемешивание вдуваемого газа со спутным потоком воздуха для горения, за счет чего достигается минимальная величина коэффициента расхода воздуха 1,02 – 1,03, характерная для горелочных устройств с предварительным смешением. Кроме того, в горелках типа ГЦТ реализуется не только нормальное, но и детонационное горение, в результате чего факел горения начинается практически сразу за срезом сопла, что для существующих горелок, по мнению автора работы [15], является недостижимым.

Наилучшая величина угла конусности центрального тела α_1 , равная углу наклона обечайки α_2 , может быть найдена либо при помощи метода характеристик [1, 16], либо с помощью математического моделирования с использованием пакета прикладных программ Б. Сполдинга «PHOENICS» [12]. Наилучшим значением этого угла является величина, приводящая к наиболее высокой скорости истечения при данном значении давления на входе в трубу горелки. Тем самым обеспечивается наилучшее смешение вытекающего газового потока со спутным потоком воздуха.

Для одномерного течения существует соотношение, связывающее изменение скорости вдоль трубы постоянного сечения с работой трения [14, 16, 18]. Полагая коэффициент трения постоянной величиной ($\xi = \text{const}$), зависимость приведенной скорости от длины трубы можно представить уравнением:

$$\frac{1}{I_1^2} - \frac{1}{I_2^2} - \ln \frac{I_2^2}{I_1^2} = \frac{2k}{k+1} \lambda \frac{x_2}{D}, \quad (1)$$

где λ_1 — значение приведенной скорости в начале трубы при $x=0$; λ_2 — значение приведенной скорости в произвольном сечении трубы на расстоянии $x=x_2$ от ее начала; k — показатель адиабаты;

D — внутренний диаметр трубы горелки; $\frac{2k}{k+1} \lambda \frac{x_2}{D} = c$ — приведенная длина трубы.

Используя выражение (1), можно рассчитать длину трубы, на выходе которой приведенная скорость достигает максимального значения: $\lambda = 1$.

При встрече транзвуковой струи с любым препятствием, тормозящим ее протекание, возникает скачок уплотнения или ударная волна. Возникновение ударной волны (адиабаты), а также параметры истекающего из сопла газового потока, можно определить, рассмотрев случай пересечения двух косых скачков уплотнения, образованных в результате поворота двух противоположных стенок канала на разные углы α_1 и α_2 (рис. 2).

Р и с. 1. Схема головки сопла с центральным телом

Р и с. 2. Схема нормального пересечения двух косых скачков в головке горелки ГЦТ
($r_{шт}$, $r_{тр}$, $r_{цт}$, r_c — радиусы штока, трубы горелки, максимального радиуса центрального тела и сопла, соответственно)

Параметры течения за косыми скачками АВ и А₁В определяются по известным параметрам до скачков приведенной скорости λ_1 : давлению P_1 , температуре T_1 и углам α_1 и α_2 , если эти углы меньше соответствующего максимального значения α_{max} для данного вектора скорости λ_1 . Параметры на выходе из сопла находятся, исходя из граничных условий для линии тока, проходящей через точку В, принимая, что направления скоростей и давления одинаковы. Задаваясь значением давления на выходе из сопла, определенном при математическом моделировании $P_2=0,3$ МПа [13], находим углы наклона отраженных скачков АВ и А₁В по формулам [16]:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{k-1}{k+1} \left(\frac{2k}{k-1} M_1^2 \sin^2 \beta - 1 \right) = \frac{2k}{k+1} \left(\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{I_1^2 \sin^2 \beta}{1 - \frac{k-1}{k+1} I_1^2} - \frac{k-1}{2k} \right), \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{M_1^2 \sin^2 \beta - 1}{\left[M_1^2 \left(\frac{k+1}{2} - \sin^2 \beta \right) + 1 \right] \operatorname{tg} \beta}, \quad (3)$$

где β — угол скачка; M_1 — скорость перед головкой горелки.

Если во всех точках на выходе из сопла давления одинаковы, то скорости, температуры и плотности за скачками ВС и ВС₁ будут различными. Вдоль линии тока, проходящей через точку В, образуется тангенциальный разрыв скоростей, в результате чего в вязком газе возникает вихрь, который в свою очередь, способствует лучшему перемешиванию топлива и воздуха. Результирующий угол отклонения потока в сечении СС₁ можно найти при помощи диаграммы косых скачков [16]:

Процесс преобразования давления в скорость в сверхзвуковом и звуковом потоках протекают без существенных потерь [14, 16, 17], т.е. примерно при постоянной энтропии и, следовательно, очень близок к идеальной адиабате. Поэтому формулы для расчета идеального сверхзвукового сопла применимы для реальных сопел. Решение задачи об обтекании внешнего тупого угла (угла конусности центрального тела) сверхзвуковым потоком газа сводится к определению приведенной скорости потока после его обтекания:

$$\lambda_2^2 = \frac{\omega^2}{a_{кр}^2} = 1 + \frac{2}{k-1} \cdot \sin^2 \left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \cdot \alpha_1 \right).$$

Зная приведенную скорость, можно определить остальные параметры газа по уравнениям:

$$\frac{P}{P^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot I_2^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}; \quad \frac{r}{r^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot I_2^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}; \quad \frac{T}{T^*} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_2^2; \quad M_3 = \sqrt{\frac{2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot I_2^2}}.$$

При обтекании конической поверхности центрального тела тонким слоем вязкого газа образуется пограничный слой. При большой интенсивности падающего скачка уплотнения возникает

отрыв пограничного слоя и возникает вихревая зона. Вниз по потоку от точки отрыва начинается перемешивание оторвавшихся струек газа с воздухом и нарастание нового пограничного слоя на стенке. Поскольку толщина газового потока соизмерима с толщиной пограничного слоя, возможен разрыв и самого газового потока, что приводит к дальнейшему улучшению перемешивания.

Примерные распределения давления и скоростей газовых потоков по длине горелочного устройства и зоны горения представлены на рис. 3. Предельная длина горелки (зона I на рис. 3) обеспечивает при заданной скорости газа на входе в горелочное устройство критическое значение приведенной скорости на выходе. Головка горелки (зона II) обеспечивает создание скачка уплотнения во внутренней зоне, приводящего к возникновению детонационной волны, и созданию чередующихся зон разрежения и сжатия на конической поверхности усеченного центрального тела. Поскольку толщина скачка всегда очень мала, формулы для расчета плоскопараллельного косоугольного скачка применимы и к осесимметричному скачку. Продвижение детонационной волны вниз по потоку ускоряет подготовку смеси к горению и, тем самым, сдвигает начало горения к срезу сопла. При внешнем обтекании за кормовой областью усеченного центрального тела образуется отрывная зона, давление в которой будет меньше давления окружающей среды. Это, в свою очередь, также улучшает смешение топлива с воздухом. Зона смешения природного газа с воздухом (зона III) обеспечивает достижение нижнего предела концентрации топлива, необходимого для начала процесса горения. Ее длина составляет приблизительно 3-4 калибра (под калибром понимается средний диаметр проходного сечения сопла), что подтверждено натурными испытаниями [18], которые проводились на горелке типа ГЦТ. Зоны IV и V соответствуют детонационному и нормальному горению, а VI зона – движению продуктов сгорания.

Р и с. 3. Схема распределения давления и скоростей газовых потоков по длине горелочного устройства и зоны горения ($l_{гр}$ – длина трубы)

Следует подчеркнуть, что основные результаты, полученные для плоских случаев истечения газового потока [1], применимы и для описания истечения потока из кольцевого зазора сопла, причем погрешность такого применения будет тем меньше, чем меньше будет относительная ширина зазора, т.е. отношения величины зазора к среднему радиусу зазора.

В современном представлении механизма горения детонационная волна, распространяющаяся в горючей газовой среде, является двухслойной [19]. Первый слой (зона IV) представляет собой адиабатическую ударную волну, при прохождении через которую газ сильно разогревается. В химически активном газе этот разогрев, если он достаточно интенсивен, может вызвать воспламенение. В связи с тем, что толщина ударной волны ничтожно мала (порядка длины свободного пробега молекулы), в пределах ее процесс горения, по-видимому, развиваться не в состоянии. Поэтому область, в которой протекает горение, образует второй, более протяженный (зона V), непосредственно примыкающий к ударной волне (рис. 3). Разогрев газа при прохождении его через ударную волну в детонационном горении заменяет собой, в сущности, подогрев его теплопроводностью при нормальном горении.

Изменение температуры газа в скачке уплотнения (в зоне IV) определяется соотношением [19]:

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{P_4}{P_3} \cdot \frac{\omega_4}{\omega_3} = \frac{\lambda_3^2 - \frac{k-1}{k+1}}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_3^2} \cdot \frac{1}{\lambda_3^2} = \frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \frac{1}{\lambda_3^2}}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_3^2}.$$

Приведенную скорость газового потока в зоне III λ_3 в данных условиях можно принять равной M_3 . Поскольку начало детонационной зоны определяется нижним пределом концентрации топлива, необходимого для начала процесса горения, скорость смеси λ_4 определяется через уравнение энергии:

$$\rho_z \cdot \frac{\omega_3^2}{2} + \rho_v \cdot \frac{\omega_6^2}{2} = \rho_{см} \cdot \frac{\omega_4^2}{2}$$

где ρ_z , ρ_v , $\rho_{см}$ — плотности природного газа, воздуха и смеси, соответственно; ω_3 , ω_6 — скорости газа и воздуха перед зоной смешения; ω_4 — скорость горючей смеси перед зоной детонационного горения.

Для расчета состояния газа в области горения (в зоне V) используется соотношение между температурой торможения и приведенной скоростью [19]. Тогда для рассматриваемого случая горения с использованием сопла с центральным телом скорость продуктов сгорания определяется по формуле

$$I_5 = \frac{1 + I_3^2}{2I_4} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4I_4^2}{(1 + I_4^2)^2} \cdot \frac{T_5^*}{T_3^*}} \right] \sqrt{\frac{T_3^*}{T_5^*}}. \quad (11)$$

При расчетах необходимо учесть, что профиль сопла уже определен по результатам математического моделирования [12].

Следует отметить, что недостатки применения сопел с центральным телом в турбореактивных двигателях (например: взаимодействие волн разряжения и сжатия, отрыв пограничного слоя с созданием зон разрежения, образование зон разрежения за кормовой частью укороченного центрального тела, завихренности газового потока и т. д.) становятся достоинствами при использовании сопла в качестве горелочного устройства.

Заключение. Приведена методика расчета горелочного устройства с центральным телом (типа ГЦТ), которая обладает ниже следующими достоинствами.

1. Зона горения располагается в непосредственной близости за срезом сопла, что увеличивает активную рабочую длину печи.

2. Обеспечивается регулирование скорости истечения газового потока для создания либо «жесткого» факела (при большой скорости), либо «мягкого» факела (при малой скорости).

3. Обеспечивается наилучшая степень смешения топлива с воздухом при минимальном коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 1,02 \div 1,03$ (характерного для горелок с предварительным смешением) за счет создания чередующихся волн разряжения и сжатия как на открытой поверхности центрального тела за счет отрыва пограничного слоя, так и в области, непосредственно примыкающей к нему снаружи горелки, за счет создания завихренности за кормовой частью центрального тела.

4. Создается развитая рециркуляция продуктов сгорания.

5. Необходимая скорость горения газо-воздушной смеси достигается не только за счет нормального горения, но и за счет детонационного.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пирумов У. Г., Росляков Г. С. Течение газа в соплах. М.: Изд-во МГУ, 1978. 288 с.
2. Hagemann G., Innich Y., Terhardi M. Flow phenomena in advanced rocket nozzles: the plug nozzle // AIAA Paper., 1998. P. 98—3522.
3. Dummov G., Klimov V., Ponomarev N. Investigation of linear plug layout of rocket engines for reusable launch vehicles // AIAA Paper, 2000. P. 2000—3288.
4. Wisse M. E. N., Banink W. J. Half model restrictions for linear plug nozzle testing // AIAA Journal, 2001. Vol. 39, No. 11. P. 2148—2157.
5. Kortie J. J., Salas A. O., Dunn H. J. et al. Multidisciplinary approach to linear Aerospike nozzle design // J. Propulsion and Power, 2001. Vol. 17, No. 1. P. 93—98.
6. Копцев В. В. Совершенствование горелочных устройств вращающихся печей // Изв. вузов. Черная металлургия, 2003. № 1. С. 52—54.
7. Копцев В. В. Совершенствование технологии и техники производства металлургической извести. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 148 с.
8. Копцев В. В. Горелочные устройства вращающихся печей производства металлургической извести: Учебное пособие. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 97 с.

9. *Копцев В. В.* Горелочное устройство вращающихся печей // *Металлург*, 2005. № 12. С. 42.
10. Полезная модель № 14068, МПК Г 23 Д 14/00. Газовая горелка для вращающихся печей / *Шатохин И.М., Копцев В.В.* // *Изобретения. Полезные модели*, 2000. № 18. С. 532.
11. *Копцев В. В.* Газовая турбулентная горелка ГТТ-1 для вращающихся печей // *Теория и технология металлургического производства. Вып.1: Межрегион, сб. науч.тр. / Под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогorsk: МГТУ, 2001. С. 191–194.*
12. *Копцев В. В.* Моделирование аэродинамики горелочных устройств вращающихся печей. *Металлург*, 2004. № 11. С. 37–41.
13. Полезная модель № 58660, МПК F 23 Д 14/00. Газовая горелка для вращающихся печей / *Копцев В. В.* // *Изобретения. Полезные модели*, 2006. № 33.
14. *Абрамович Г. Н.* Прикладная газовая динамика: В 2 ч.: Учеб. руководство для втузов. М.: Наука, 1991. 304 с.
15. *Михайлов-Вагнер А.* Влияние горелочного устройства на техникоэкономические показатели вращающихся печей // *Цемент и его применение*, 1999. №3. С. 7–12.
16. *Дейч М. Е.* Техническая термодинамика. М.-Л: Госэнергоиздат, 1961. 671 с.
17. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. М.: Наука, 1987. 840 с.
18. *Копцев В. В., Борисова М. П., Казаков О. В., Горбулин В. Н.* Двухпроводная горелка с центральным телом для газовых одностопных колпаковых печей // *Металлург*, 2006. №10. С. 76–77.
19. *Солоухин Р. И.* Ударные волны и детонация в газах. М.: ГИФМЛ, 1963. 175 с.

Поступила 23.08.2006 г.