



СПАЛЕННЯ ВУГІЛЬНОГО МЕТАНА У ДИФУЗІЙНОМУ ПОДОВОМУ ПАЛЬНИКУ

М.Ю. Мазаник, А.О. Редько

Харківський державний технічний університет будівництва і архітектури

вул. Сумська, 40, м. Харків, Україна, 61002

E-mail: andreu.ua-mail@rambler.ru

Отримана 18 лютого 2009; прийнята 27 березня 2009.

Анотація. В статті приведені особливості процесу горіння низькокалорійних газів в дифузійних подових пальниках, на підставі чого прийнято моделювання механізму утворення моно-оксиду вуглецю і оксидів азоту. Приведені результати чисельного дослідження із спалювання вугільного метану. Отримані дані з температурних полів і полів швидкості, розподіленні CO , O_2 , N_{ox} , CH_4 та інших компонентів. На підставі розрахунку значення швидкості і температур в модифікованому пальнику нижче, ніж в серійному, а також екологічні параметри мають більш низькі значення.

Ключові слова: вугільний метан, дифузійний подовий пальник, енергетичні та екологічні характеристики.

СЖИГАНИЕ УГОЛЬНОГО МЕТАНА В ДИФУЗИОННОЙ ПОДОВОЙ ГОРЕЛКЕ

М.Ю. Мазаник, А.А. Редько

Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры

ул. Сумская, 40, г. Харьков, Украина, 61002

E-mail: andreu.ua-mail@rambler.ru

Получена 18 февраля 2009; принята 27 марта 2009.

Аннотация. В статье приведены особенности процесса горения низькокалорійных газів в диффузионных подовых горелках, на основании чего принято моделирование механизма образования монооксида углерода и оксидов азота. Приведены результаты численного исследования по сжиганию угольного метана в серийной подовой горелке и модифицированной для сжигания угольного метана. Получены данные по температурным полям и полям скорости, распределению CO , O_2 , N_{ox} , CH_4 и других компонентов. На основании расчета значения скорости и температур в модифицированной горелке ниже, чем в серийной, а также экологические параметры имеют более низкие значения.

Ключевые слова: угольный метан, диффузионная подовая горелка, энергетические и экологические характеристики.

BURNING OF COAL METHANE IN THE DIFFUSION BOTTOM BURNER

M.U. Mazanik, A.A. Redko

Kharkiv State Technical University of Civil Engineering and Architecture

Sumskaya str, 40, Kharkiv, Ukraine, 61002

E-mail: andrey.ua-mail@rambler.ru

Received 18 February 2009; accepted 27 March 2009.

Abstract. The article the burning process of features of low calorific value of gases in the diffusion bottom burners, on the basis of which the modeling mechanism of carbon monoxide and nitrogen oxides have been assumed. The results of numerical researches as for the burning of coal methane production in the retrofit bottom burner and modified for combustion of coal methane. The results on temperature fields and velocity fields, the distribution of CO, O₂, N_{ox}, CH₄ and other components have been obtained. On the basis of the value speed calculation and temperatures of the modified burner is lower than in the series one, as well as the ecological parameters have lower values.

Key words: coal methane, diffusion burner, energy and economical characteristics.

В Донецком угольном бассейне ежегодно извлекается около 800 млн.м³ угольного (шахтного) метана, при этом не более 10% используется на шахтных котельных [1,2]. Таким образом, имеются возможности для более широкого использования угольного метана в отопительных котельных шахт и поселков, в системах обогрева шахтных стволов, в системах когенерации для выработки электроэнергии и теплоты.

При этом извлечение и использование метана способствует уменьшению загрязнения окружающей среды [3].

Данные по экологическим и энергетическим характеристикам в различных горелочных устройствах при сжигании угольного метана практически отсутствуют.

Целью настоящей работы является исследование процессов сжигания угольного метана в подовых (щелевых) горелках отопительных котлов (устройств) для определения их энергетических и экологических характеристик.

Наиболее простыми являются диффузионные горелки. Газ вытекает из отверстий, а необходимый для горения воздух поступает из окружающей среды. Процессы смешения газа и воздуха, горения происходят параллельно на выходе газа из горелки.

Диффузионные горелки применяют для сжигания искусственных низкокалорийных газов

(сланцевый, коксовый, генераторный и др.), для сжигания природного и сжиженного газа.

Применение подовых (щелевых) горелок в отопительных котлах недостаточно эффективно, так как низкая эффективность процессов смешивания газа и воздуха, горения обуславливает повышение коэффициента избытка воздуха, при этом увеличивается длина факела, что при соприкосновении пламени с теплообменными поверхностями приводит к возрастанию химической неполноты сжигания газа.

Таким образом, увеличение расхода газа и тепловой мощности котла ограничено технологическими и экологическими режимами сжигания топлива.

Однако подовые горелки широко применяются поэтому, в настоящей работе проведены исследования сжигания угольного метана в горелках данной конструкции.

Состав шахтного газа следующий (%):
 CH₄ – 36,4; C₂H₆ – 1,32; C₃H₈ – 0,25; C₄H₁₀ – 0,07; C₅ < 0,008; CO – 0,0001; H₂ – 0,008; CO₂ – 0,08; N₂ – 47,1; O₂ – 13,4; Ar – 0,86.
 Теплота сгорания шахтного газа составляет около 13 МДж/м³.

Подовая горелка состоит из двух элементов: стальной бесшовной трубы (коллектора) с просверленными в ней отверстиями для выхода топливного газа и огневой части. Последняя представляет собой щель, выложенную

Таблица 1. Исходные данные расчета.

Параметры	Серийная горелка	Модифицированная горелка
Наружный диаметр трубы d_n , мм	40	57
Диаметр отверстий топливного газа d_o , мм	1,9	2,1
Полушаг между отверстиями δ , мм	8	8
Ширина огневой щели a мм	86	108
Высота огневой щели $h_{щ}$ мм	266	266
Температура воздуха в узком сечении щели, К	273	273
Скорость воздуха в узком сечении щели, м/с	2,44	2,44
Температура топливного газа на выходе из отверстий, К	273	273
Скорость топливного газа на выходе из отверстий, м/с	27	27
Состав топливного газа, % (об) :		
метан	100,0	38,6
кислород	-	13,4
азот	-	48,0

из огнеупорного кирпича и располагаемую над трубой горелки. Отверстия располагаются на трубе в два ряда в шахматном порядке.

Математическая модель трехмерного квазистационарного турбулентного течения многокомпонентной химически реагирующей смеси и сжигания в подовой горелке основана на системе уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу [4]. Для замыкания системы осредненных по Рейнольдсу уравнений использована $K-\mu$ модель турбулентности [5]. Турбулентная вязкость определяется по формуле Колмогорова-Прантля. Термодинамические переменные определяются уравнением состояния смеси идеального газа.

Исходя из допущения о том, что горение контролируется смешением, а не кинетикой, для моделирования турбулентного горения использована модель дробления турбулентных вихрей Магнуссена и Хертагена [6].

Моделирование образования монооксида углерода основано на использовании двустадийной реакции окисления метана. Для нахождения массовой доли оксидов азота система уравнений дополняется уравнением переноса для NO, образующихся по термическому механизму [7].

Согласно [8], Я.Б. Зельдовичем было доказано, что образование оксидов азота не связано

непосредственно с реакцией горения, а идет через диссоциацию молекулярного кислорода при температуре выше 1800 К. Механизм образования NO состоит из элементарных реакций [8].

Вводится предположение о том, что образование NO не влияет ни на гидродинамическую структуру течения, ни на температуру газа в горелочном устройстве.

Система уравнений дополняется граничными условиями.

Численное интегрирование системы уравнений с заданными граничными условиями предусматривает их дискретизацию. Дискретизация уравнений по пространству выполняется методом контрольных объемов [9] на структурированной расчетной сетке, составленной из шестигранных (гексаэдральных) элементарных объемов – ячеек. Линеаризованная система уравнений решается итерационным методом.

Устойчивость численного решения обеспечивалась применением метода нижней релаксации независимых переменных.

Точность численного решения оценивалась по степени выполнения критериев сходимости, степени независимости решения от размера расчетной сетки и степени качественного соотношения результатов расчета известным физическим представлением. Сеточная независимость

Таблица 2. Результаты эксперимента.

Параметр	Вариант 1	Вариант 2
Скорость, м/с	9,41	5,06
Температура, К	1803	1090
Массовая доля CH_4	0,0047	$7,25 \cdot 10^{-7}$
Массовая доля O_2	0,0622	0,1535
Массовая доля CO	0,0055	$9,8 \cdot 10^{-6}$
Массовая доля CO_2	0,1029	0,0510
Массовая доля H_2O	0,0914	0,0419
Массовая доля N_2	0,7332	0,7534
Массовая доля NO	$7,6 \cdot 10^{-6}$	$1,89 \cdot 10^6$
Скорость образования NO , кмоль/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$)	0,0066	$2,0 \cdot 10^{-9}$
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	0,1945	0,3371
Кажущаяся молекулярная масса	28,4598	28,4236

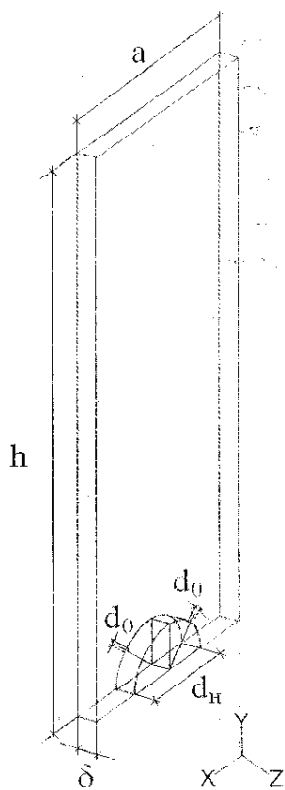
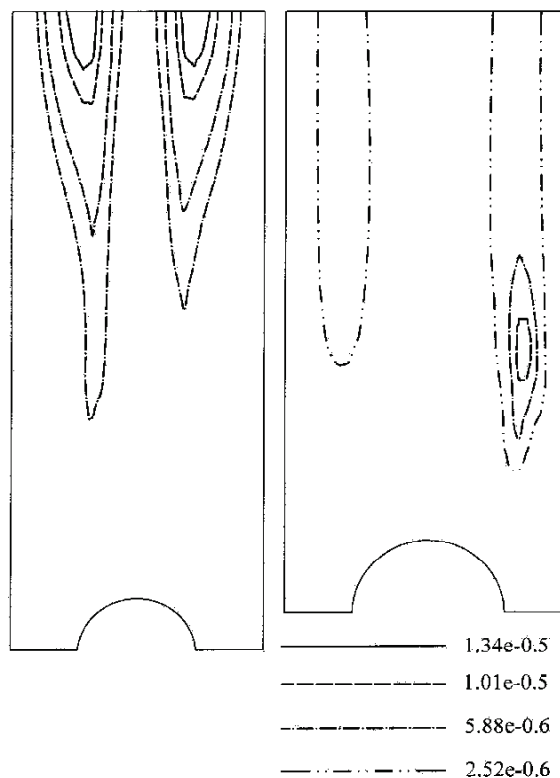


Рис.1. Расчетная схема подовой горелки.

решения оценивалась путем сравнения численных результатов, полученных на трех расчетных сетках, различающихся количеством расчетных ячеек.

Тепловая мощность горелок (серийной и модифицированной) одинакова, т.е. расход угольного метана увеличен в 2,7-2,8 раза по сравнению с расходом природного газа.

Рис.2. Массовая доля NO в плоскости xOy , проходящей через отверстия для выхода топливного газа: слева – вариант 1; справа – вариант 2.

Расчетная схема подовой горелки представлена на рис. 1

Горелка имеет следующие характерные размеры:

- наружный диаметр трубы d_n ;
- диаметр отверстий для выхода топливного газа d_0 ;
- полушаг между отверстиями δ ;

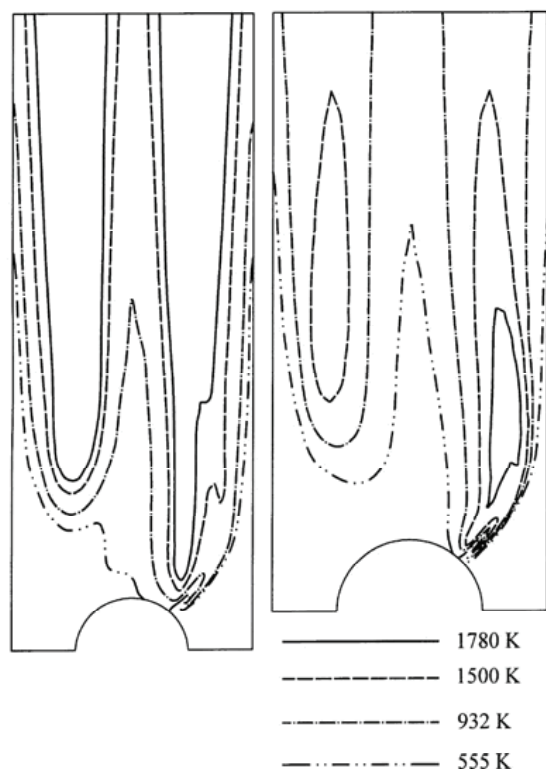


Рис. 3. Температура газа (К) в плоскости xOy , проходящей центр отверстия для топливного газа: слева – вариант 1; справа – вариант 2.

- ширина огневой щели a ;
- высота огневой щели $h_{\text{ш}}$ ($h_{\text{ш}} = h + 0,5 d_{\text{ш}}$).

Результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 2.

Результаты показывают, что значение скорости и температур в модифицированной горелке значительно ниже (9,41 и 5,06 м/с соответственно и 1803° и 1090° К соответственно). При этом обеспечивается полное снижение угольного метана (CH_4 и CO в продуктах сгорания практически отсутствует (табл.2)). Низкие скорости и температура сгорания обеспечивают также факел малой длины.

Экологические параметры, характеризующиеся содержанием оксидов азота и углерода в продуктах сгорания, имеют значения значительно ниже (в 3 раза) в модифицированной горелке, так массовая доля NO составляет $1,89 \cdot 10^{-6}$, $\text{CO} - 9,8 \cdot 10^{-6}$, что не превышает допустимые нормы: $\text{NO}_x < 0,085 \text{ мг/м}^3$; $\text{CO} < 5 \text{ мл/м}^3$. Результаты расчета приведены на рис.2,3.

Таким образом, сжигание угольного метана возможно в подовых горелках при соответствующем изменении конструктивных параметров. При этом обеспечивается полнота сжигания топлива, устойчивость горения и соответствие экологическим требованиям.

Литература

1. Карп И.Н. Метан угольных пластов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2005. – №1. – с.5-8.
2. Метан угольных месторождений Украины: производственный и инвестиционный потенциал шахт Донбасса / Сост. Д.Р. Трипплетти. – Киев: Логос, 2000. – 132 с.
3. Боксерман Ю.А., Сухоруков В.И., Сичкаренко В.А. Основные принципы оценки эффективности проектов использования угольного метана. 1. Экономические аспекты // Экотехнологии и ресурсоснабжение. – 2004. – №6. – С.15-19.
4. Турбулентные течения реагирующих газов / Под ред. П. Либби и Ф. Вильямса / Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 328 с.
5. Launder В.Е., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulent. Academic Press, London, England, 1972.
6. Magnussen В.Е., Hjertager В.Н. On Mathematical Models of Turbulent Combustion With Special Emphasis on Soot Formation and Combustion // Proc. 16th Int. Symp. on Combustion. – 1976. – P.747-775
7. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
8. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. – М.: АН СССР, 1947. – 145 с.
9. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т.1. – М.: Мир, 1991. – 504 с.

Мазаник Марина Юріївна – аспірант кафедри теплогазопостачання і вентиляції та використання теплових вторинних енергоресурсів санітарно-технічного факультету Харківського державного технічного університету будівництва і архітектури. Наукові інтереси: використання горючих вторинних енергетичних ресурсів в системах теплопостачання.

Редько Андрій Олександрович – к.т.н., доцент, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції та використання теплових вторинних енергоресурсів санітарно-технічного факультету Харківського державного технічного університету будівництва і архітектури. Наукові інтереси: використання горючих вторинних енергетичних ресурсів в системах теплопостачання.

Мазаник Марина Юрьевна – аспирант кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и использования тепловых вторичных энергоресурсов санитарно-технического факультета Харьковского государственного технического университета строительства и архитектуры. Научные интересы: использование горючих вторичных энергетических ресурсов в системах теплоснабжения.

Редько Андрей Александрович – к.т.н., доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и использования тепловых вторичных энергоресурсов санитарно-технического факультета Харьковского государственного технического университета строительства и архитектуры. Научные интересы: использование горючих вторичных энергетических ресурсов в системах теплоснабжения.

Mazanik Maryna Yuriyivna – the post-graduate of the “Thermo Gas Supply and Ventilation and Thermo secondary power resources using” Chair of the sanitary engineering faculty of Kharkiv State Technical University of Civil Engineering and Architecture. Science interests: using combustible secondary power resources in the thermo supply systems.

Redko Andriy Olexandrovych – the candidate of technical sciences, assistant professor, associate professor of “Thermo Gas Supply and Ventilation and Thermo secondary power resources using” Chair of the sanitary engineering faculty of Kharkiv State Technical University of Civil Engineering and Architecture. Science interests: combustible secondary power resources using in the thermo-gas supply systems.