

## Numerical Investigation of the Low-Caloric Gas Burning Process in a Bottom Burner

Redko A.<sup>1</sup>, Redko I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kharkiv National University of Construction and Architecture

<sup>2</sup>O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv  
Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** The use of low-grade gases in the fuel and energy balance of enterprises makes it possible to increase the energy efficiency of technological processes. The volumes of low-grade gases (blast furnace and coke oven gases, synthesis gas of coal gasification processes, biogas, coal gas, etc.) that are utilized more significant in technological processes but their calorific value are low. At the same time artificial gases contain ballast gaseous (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) and mechanical impurities that are harmful gas impurities. Their use requires technological preparation. Thus coal methane is characterized of high humidity, coal dust and drip moisture, variable composition. Thus was effective burning of coal methane it is required the development of constructive and regime measures that ensure a stable and complete burning of gaseous fuels. In this article it is presented the results of computer simulation of a stationary turbulent diffusion flame in a restricted space in the process of burning natural gas and coal methane in a bottom burner. The calculation results contain the fields of gear, temperature, concentration of CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and nitrogen oxides. The structural elements of the flame (recirculation zone, hot "dome", mixing layer and far trace) are determined. It has been established that complete combustion of coal methane in a modified bottom burner is ensured and the numerical values of nitrogen oxide concentrations in the flame are consistent with the literature data.

**Keywords:** bottom burner, coal methane, diffusion flame, nitrogen oxides.

### Investigarea numerică a procesului de ardere a gazelor cu capacitate calorică redusă cu arzătorul cu vatră

Redico A.A.<sup>1</sup>, Redico I.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitatea Națională de Construcții și Arhitectură din Harkov

<sup>2</sup>Universitatea Națională Harkov a economiei urbane A.M. Beketov  
Harkov, Ucraina

**Rezumat.** Utilizarea de către companii a cu capacitate energetică redusă îmbunătățește eficiența energetică a proceselor tehnologice industriale. Volumul de gaz cu capacitate energetică redusă (gaz de furnal și gaz de cocserie, gazul de sinteză a proceselor de gazeificare a cărbunelui, biogaz, gaz de cărbune și altele) utilizat în procesele tehnologice este destul de semnificativ, dar aceste gaze posedă o valoare lor calorică scăzută. În aceste gaze artificiale se conțin cote semnificative de gaze de balast (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) și impurități mecanice, inclusive impurități de gaze nocive. Prin urmare, utilizarea lor necesită o pregătire tehnologică primară. Astfel, metanul din cărbune are un conținut ridicat de umiditate, include praf de cărbune, picături dispersate de apă și are o compoziție variabilă. Prin urmare, pentru o ardere eficientă a metanului din stratul de cărbune este necesar de elaborat măsuri constructive și de de regim pentru a asigura arderea stabilă și completă a gazului combustibil. În această lucrare se prezintă rezultatele simulării pe calculator a unei flăcări staționare de difuzie turbulentă într-un spațiu închis în timpul arderii gazului natural și metan obținut din stratul de cărbune în arzător cu vatră. Rezultatele calculelor cuprind câmpului de viteză, temperatură, concentrația CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> și oxizi de azot. S-au determinat elementele structurale ale flăcării (zona de recirculare, fierbinte „dom” strat de amestec și urme la distanțe). Se constată că soluția propusă asigură o ardere completă a metanului în cărbune modificat arzător cu vatră, iar valorile numerice ale concentrației de oxizi de azot din flacără sunt în concordanță cu datele din literatură.

**Cuvinte-cheie:** arzătoare vatră, metan din strat de cărbune, flacără de difuzie, oxizii de azot.

### Численное исследование процесса сжигания низкокалорийного газа в подовой горелке

<sup>1</sup>Редько А.А., <sup>2</sup>Редько И.А.

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.М. Бекетова  
Харьков, Украина

**Аннотация.** Использование в топливно-энергетическом балансе предприятий низкосортных газов позволяет повысить энергоэффективность технологических процессов. Объемы низкосортных газов (доменного и коксового газов, синтез-газ процессов газификации углей, биогаза, угольного газа и др.), утилизируемые в технологических процессах значительные, но их теплотворная способность низкая.

При этом искусственные газы содержат балластные газообразные ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) и механические примеси, вредные газовые примеси. Поэтому при их использовании требуется технологическая подготовка. Так, угольный метан характеризуется высокой влажностью, наличием угольной пыли и капельной влаги, переменным составом. Поэтому для эффективного сжигания угольного метана требуется разработка конструктивных и режимных мероприятий, обеспечивающих устойчивое и полное сжигание газообразного топлива. В настоящей работе приведены результаты компьютерного моделирования стационарного турбулентного диффузионного факела в ограниченном пространстве при сжигании природного газа и угольного метана в подовой горелке. Результаты расчетов содержат поля скорости, температуры, концентрации  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и оксидов азота. Определены структурные элементы факела (рециркуляционная зона, горячий «купол», слой смешения и дальний след). Установлено, что обеспечивается полное сжигание угольного метана в модифицированной подовой горелке и численные значения концентраций оксидов азота в пламени согласуются с литературными данными.

**Ключевые слова:** подовая горелка, угольный метан, диффузионный факел, оксиды азота.

## Введение

Использование низкосортных газов позволяет повысить энергоэффективность и снизить энергозатраты в различных технологических процессах и котельных установках. Однако, сжигание низкосортных газов в серийных промышленных горелочных устройствах затруднено [16] и требует их модификации.

Зарубежные фирмы производят низкоэмиссионные автоматизированные горелочные устройства для сжигания низкосортных газов, однако из-за высокой стоимости они не находят широкого применения. Подовые горелки являются наиболее простыми горелочными устройствами, которые обеспечивают устойчивое горение и широкий диапазон регулирования нагрузки. В литературе данные по сжиганию угольного метана  $\text{CH}_4 > 25\%$  практически отсутствуют. Поэтому имеется необходимость в исследовании процессов диффузионного сжигания низкосортного газа в модифицированной подовой горелке.

## I. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Предприятия угольной промышленности в Донбассе угольным бассейне Украины извлекают и выбрасывают в атмосферу около 1.2 млрд.  $\text{м}^3/\text{год}$  шахтного метана, около 15% объема улавливается. [1, 2]. Рациональное использование извлекаемого шахтного метана это его сжигание на котельных и радиационных излучателях, сушильных установках, смесительных воздухонагревателях для обогрева шахтных стволов, в когенерационных установках в процессах производства электроэнергии, технологических процессах и др. Использование угольного метана позволяет

увеличить энерговооружённость шахт на 20% [14]. Наиболее эффективным по энергетическому критерию является использование угольного метана в качестве топлива мобильных электростанций [15, 19-22].

Шахтный метан характеризуется переменным составом и расходом из-за различной газоносности угольных пластов. Предотвращение опасных скоплений метана в выработках пластов угольных шахт осуществляется путем дегазации через вертикальные дегазационные скважины [23]. Система дегазации шахт Украины отличается от европейской. На Украине ее проектировали на выброс полученного шахтного метана за пределы горной выработки, не учитывая перспектив его использования. Поэтому значительная часть его удаляется через систему вентиляции. Украина является крупнейшим источником выбросов шахтного метана, по количеству выбросов Украина занимает четвертое место в мире [23]. Далее, из-за низкой герметичности в систему дегазации поступает воздух и в метано-воздушной смеси концентрация метана изменяется в широких пределах от 2,5 до 42% (2,5-25% некондиционный метан), при этом в смеси содержится капельная и паровая влага, угольная пыль, поэтому требуется дополнительная подготовка газа. Концентрация кислорода составляет от 5 до 12 объемных %. Концентрация диоксида углерода изменяется в пределах 18-21%. При этом концентрация компонентов смеси может изменяться скачкообразно, что затрудняет использование смеси в газовых двигателях для выработки электроэнергии. Система утилизации содержит дорогостоящее оборудование и поэтому самое простое решение-это энергетическое использование

шахтного метана в котельных установках. Промышленностью выпускаются автономные модульные котельные, оснащенные узлом подготовки шахтного метана, использование специальных автоматизированных горелочных блоков. Но в настоящее время на шахтных котельных, оснащенных котлами типа ДКВР, используются подовые горелки, горелки ГМГ, вертикальные щелевые горелки. Горелки указанных типов не комплектуются системами автоматики. 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. В [17, 18] приведены данные моделирования процесса диффузионного сжигания природного газа в прямоточно-вихревой горелке.

## II. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование процессов сжигания угольного метана в подовых (щелевых) горелках отопительных котлов и устройств, для определения их энергетических и экологических характеристик.

## III. ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее простыми являются диффузионные горелки [17]. Газ вытекает из отверстий, а необходимый для горения воздух поступает из окружающей среды. Процессы смешивания газа и воздуха происходят на выходе газа из горелки.

Диффузионные горелки применяют для сжигания искусственных низкокалорийных газов (сланцевый, коксовый, генераторный и др.), для сжигания природного и сжиженного газа.

Математическая модель 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 К- $\mu$  модель турбулентности [5]. Турбулентная

вязкость определяется по формуле Колмогорова-Прандтля. Термодинамические переменные определяются уравнением состояния смеси идеального газа.

Применение подовых (щелевых) горелок в отопительных котлах недостаточно эффективно, так как низкая эффективность процессов смешивания газа и воздуха, обуславливают 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 (%):  $\text{CH}_4$ -36.4;  $\text{C}_2\text{H}_6$ -1.32;  $\text{C}_3\text{H}_8$ -0.25;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ -0.07;  $\text{C}_5$ <0.008;  $\text{CO}$ -0.0001;  $\text{H}_2$ -0.008;  $\text{CO}_2$ -0.08;  $\text{N}_2$ -47.1;  $\text{O}_2$ -13.4;  $\text{Ar}$  – 0.86.

Теплота сгорания шахтного газа составляет около 13 МДж/м<sup>3</sup>.

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

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

Моделирование образования монооксида углерода основано на использовании двустадийной реакции окисления метана. Для нахождения массовой доли оксидов азота система уравнений дополняется уравнением переноса для  $\text{NO}$ , 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 1800К. 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.

Таблица 1.

Исходные данные расчёта

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 $\delta$ , 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

Более подробно методика численного исследования изложена в [13]. 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, составленных 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 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. 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 из огнеупорного кирпича и

располагаемую над трубой горелки. Отверстия располагаются на трубе в два ряда в шахматном порядке.

Расчетная схема подовой горелки представлена на рис. 1.

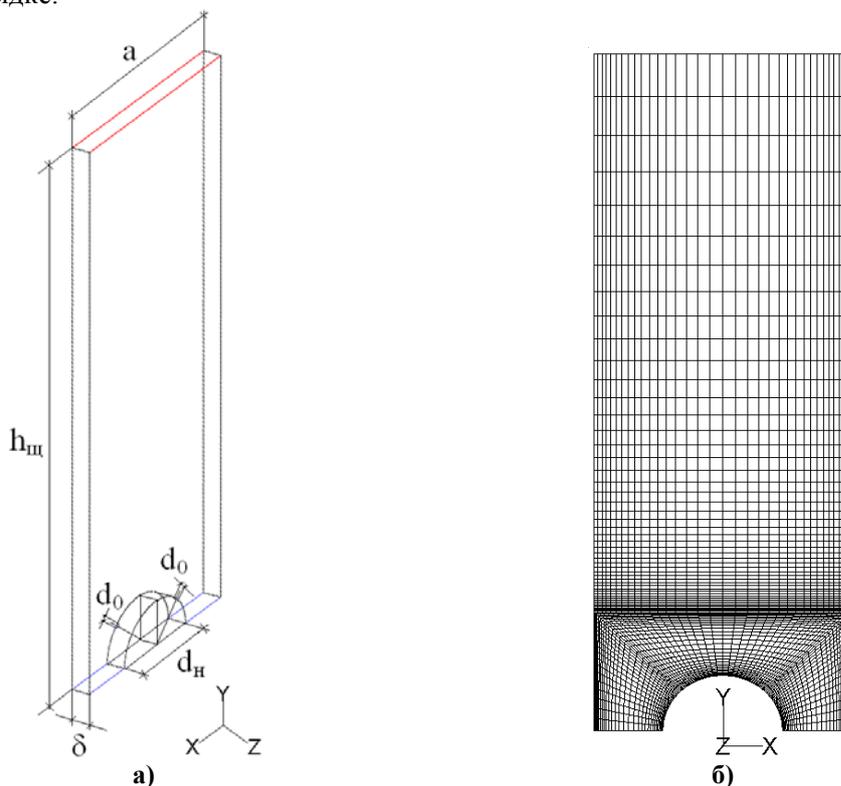


Рис.1. Расчетная схема (а) подовой горелки и расчетная схема (б) щелевого канала.

Горелка имеет следующие характерные размеры:

- наружный диаметр трубы  $d_n$ ;
- диаметр отверстий для выхода топливного газа  $d_0$ ;
- полушаг между отверстиями  $\delta$ ;
- ширина огневой щели  $a$ ;
- высота огневой щели

$$h_{щ} (h_{щ} = h + 0.5d_n)$$

Выполнены тестовые расчеты с использованием сеток с разным числом ячеек. Установлено, что сетка (около  $10^6$  контрольных объемов) обеспечивает приемлемую низкую чувствительность результатов к дальнейшему измельчению сетки.

Горелка имеет следующие размеры: наружный диаметр трубы  $d_n=40$  мм; диаметр отверстий для выхода топливного газа  $d_0=2,1$  мм; полушаг между отверстиями  $\delta=8$  мм; ширина огневой щели  $a=108$  мм; высота огневой щели  $h_{щ}=266$  мм. Температура воздуха в узком сечении щели равняется

273К. Скорость воздуха в узком сечении щели составляет 2,44 м/с. Температура топливного газа на выходе из отверстий равняется 273К. Скорость топливного газа на выходе из отверстий составляет 27 м/с.

Топливный газ имеет следующий состав (по объему):  
вариант 1: метан  $CH_4$  – 100%;  
вариант 2: метан  $CH_4$  – 38,6%; кислород  $O_2$  – 13,4%; азот – 48,0%.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

Результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 2. Результаты показывают, что значение скорости и температур в модифицированной горелке значительно ниже (9,41 и 5,34 м/с соответственно и 1803К и 1033К соответственно). При этом обеспечивается полное сжигание угольного метана ( $CH_4$  и  $CO$  в продуктах сгорания практически отсутствуют (табл.2)). Низкие скорости и температура сгорания обеспечивают также факел малой длины.

Экологические параметры, имеют значения значительно ниже в характеризующиеся содержанием оксидов модифицированной горелке, так массовая азота и углерода в продуктах сгорания, доля NO составляет  $8,9 \cdot 10^{-07}$ , CO –  $4,1 \cdot 10^{-06}$ .

Таблица 2.

Среднемассовые параметры газа на выходе из огневой щели

Параметры	Вариант 1	Вариант 2
Скорость, м/с	9,41	5,34
Температура, К	1803	1033
Массовая доля CH <sub>4</sub>	0,0047	$2,8 \cdot 10^{-07}$
Массовая доля O <sub>2</sub>	0,0622	0,1604
Массовая доля CO	0,0055	$4,1 \cdot 10^{-06}$
Массовая доля CO <sub>2</sub>	0,1029	0,0467
Массовая доля H <sub>2</sub> O	0,0914	0,0383
Массовая доля N <sub>2</sub>	0,7332	0,7546
Массовая доля NO	$7,6 \cdot 10^{-06}$	$9,4 \cdot 10^{-07}$
Скорость образования NO, кмоль/(м <sup>3</sup> ·С)	0,0066	$8,9 \cdot 10^{-07}$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	0,1945	0,3466
Кажущаяся молекулярная масса	28,4598	28,4562

В работе анализируются стационарные поля осредненных характеристик течения – скорости, температуры, концентраций компонентов, оксида азота и скорости образования оксида азота. Скорость газа (угольного метана) на выходе из отверстий подовой горелки составляет 25-27 м/с. Результаты расчета приведены на рис. 2-6.

В структуре пламени выделяется несколько зон – подготовительная, зона горения и зона продуктов сгорания [18]. В диффузионном пламени горючая смесь образуется в зоне горения за счёт диффузии горючего газа из подготовленной зоны и воздуха – из окружающей среды. Если в составе газовой смеси достаточно кислорода, то углерод, который образуется при термическом разложении в подготовительной зоне, успевает предварительно окислиться до монооксида углерода (CO), который сгорает в зоне горения с образованием диоксида углерода (CO<sub>2</sub>). Газ горит бесцветным или голубым пламенем.

Структура пламени соответствует ламинарному диффузионному пламени и определяется скоростью истечения газа из отверстий подовой горелки и скоростью движения газовой смеси в ограниченном объёме щелевого канала. Зона горения диффузионного пламени представляет собой тонкий слой (2), который определяется скоростью молекулярной

диффузии кислорода из подготовительной зоны к фронту горения. Скорость диффузии определяется разностью парциальных давлений и температур в зонах. На рис. 5 показано изменение концентрации диоксида углерода. Как видно, концентрация CO<sub>2</sub> изменяется от минимальных значений на периферии зоны горения до максимальных на оси факела. Концентрация кислорода изменяется до минимальных значений в ядре факела. Температура в ядре факела достигает значений 2060-2160К (рис. 3).

Существование зоны рециркуляции (5) (возвратные течения) дает возможность резко увеличить время пребывания газовой смеси в ограниченном пространстве вблизи горелки. Тем самым улучшаются условия для смешения реагентов и стабилизации факела.

Внутренняя структура факела показана на рис. 5.

1. Рециркуляционная зона вблизи горелки в которой температура факела максимальная.

2. Высокотемпературный «купол» (зона 3), накрывающий рециркуляционную зону; большая часть лучистой энергии излучается в этой зоне.

3. Зона смешения горючего и воздуха, окружающая зоны 1, характеризуется пониженным содержанием продуктов (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) и повышенным содержанием реагентов.

4. Дальний след (затопленная струя) продуктов сгорания.

5. Точка образования возвратных течений  
(точка 4).

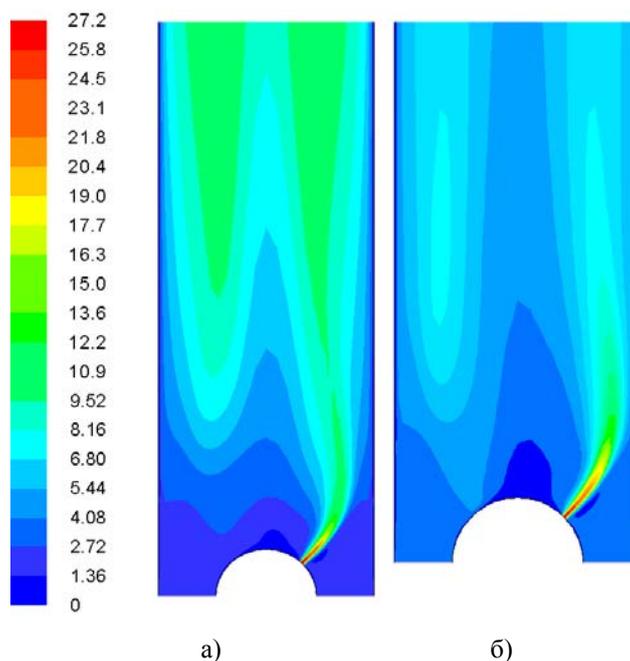


Рис. 2. Абсолютная скорость газа (м/с) в плоскости  $xOy$ , проходящей через центр отверстия для выхода топливного газа: а) – вариант 1; б) – вариант 2.

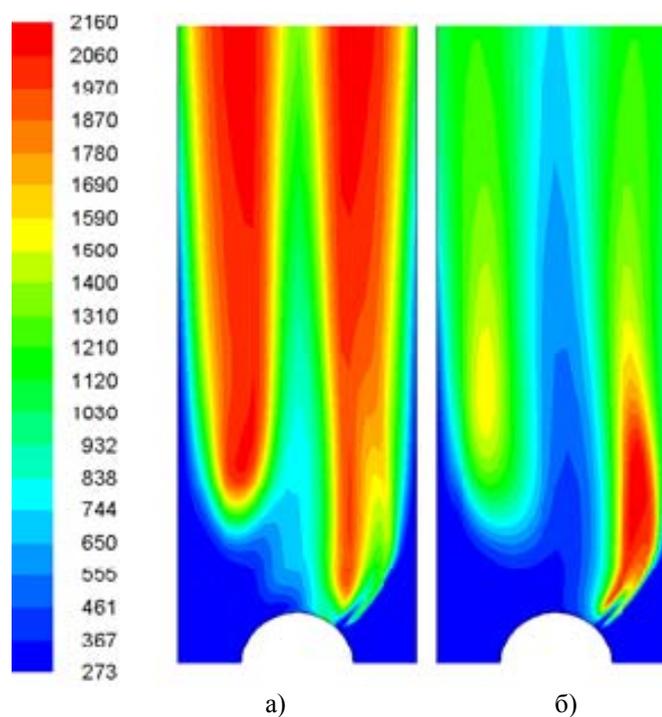


Рис. 3. Температура газа (K) в плоскости  $xOy$ , проходящей через центр отверстия для топливного газа: а) – вариант 1; б) – вариант 2

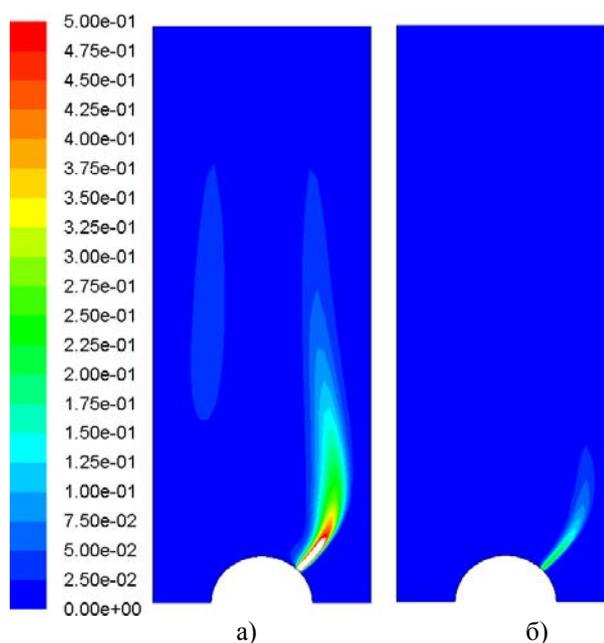


Рис. 4. Массовая доля  $\text{CH}_4$  в плоскости  $xOy$ , проходящей через центр отверстия для выхода топливного газа: а) – вариант 1; б) – вариант 2.

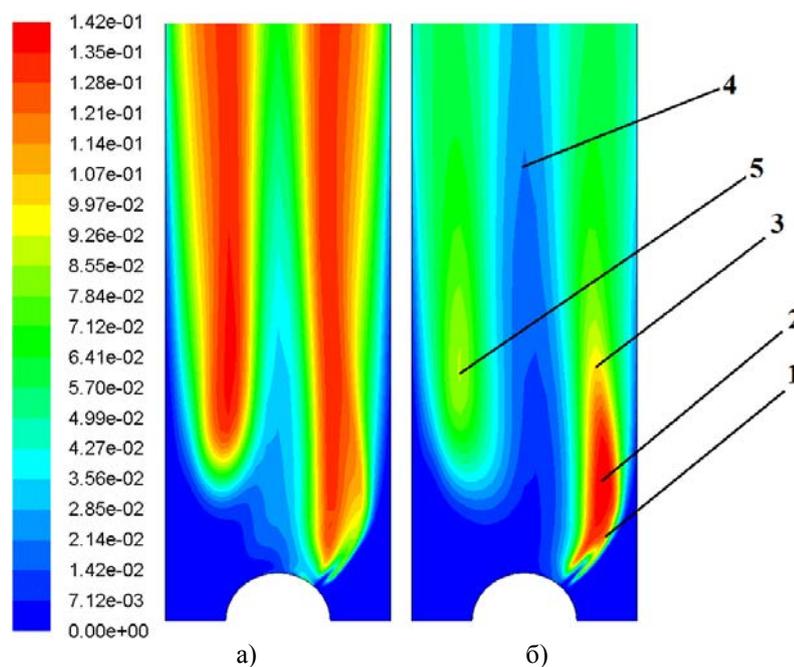


Рис. 5. Массовая доля  $\text{CO}_2$  в плоскости  $xOy$ , проходящей через центр отверстия для топливного газа: а) – вариант 1; б) – вариант 2.

При температурах выше 1700-1800K большая часть оксидов азота образуется по «тепловому» механизму. Максимальная концентрация  $\text{NO}_x$  достигается в зоне с

максимальной температурой и среднемассовой концентрацией на выходе из горелки составляет около 15-20  $\text{мг/м}^3$  (вариант 1) и 1,8-2  $\text{мг/м}^3$  (вариант 2).

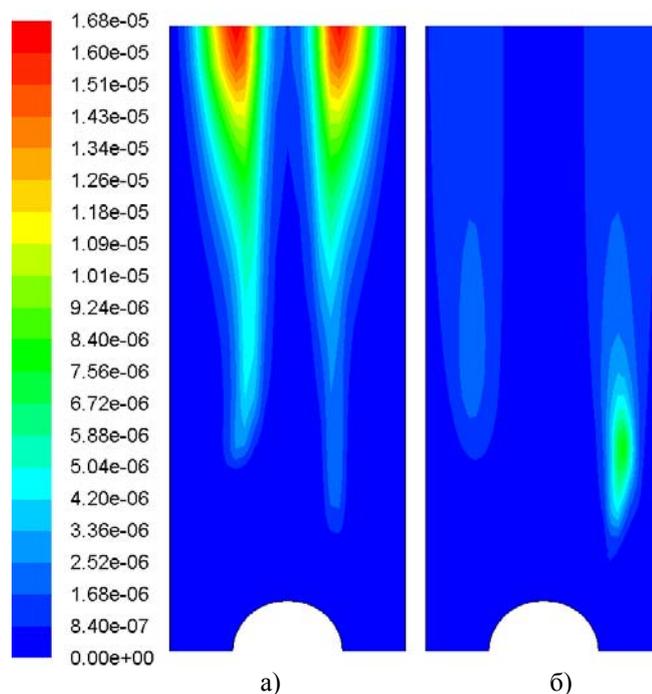


Рис. 6. Массовая доля NO в плоскости xOy, проходящей через центр отверстия для выхода топливного газа: а) – вариант 1; б) – вариант 2

## V. ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты численного исследования показывают, что 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 (References)

- [1] Zeldovich Ya. B. *Matematicheskaya teoriya gorenija i vzryva* [Mathematical Theory of Combustion and Explosion]. Moscow, 1980. 478 p.
- [2] Fletcher K. *Vychislitelnye metody v dinamike jydкости* [Computational Methods in Fluid Dynamics]. Moscow, 1991. Vol. 1. 502 p.
- [3] Patankar S. *Chislennye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhydkosti* [Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics]. Moscow, 1984. 152 p.
- [4] Karp I. N. *Metan ugolnykh plastov* [Methane of Coal Seams]. *Ecotechnologies and Resource Saving*, 2005, no 1, pp. 5-8.
- [5] Triplett D. R. *Metan ugolnykh mestorojdenii Ukrainy: proizvodstvenny i investicionny*
- [6] Boxerman Yu. A., Sukhorukov V.I., Sichkarenko V.A. *Osnovnye principy ocenki effektivnosti proektov ispolzovaniya ugolnogo metana* [Basic principles for evaluating the effectiveness of coal methane utilization projects. Economic aspects]. *Ecotechnologies and resource supply*, 2004, no 6, pp. 15-19.
- [7] Libby P., Williams F. *Turbulentnye techeniya reagiruyuschykh gazov* [Turbulent flows of reacting gases], Transl. from English. Moscow, Mir, 1983, 328 p.
- [8] Launder B.E., Spalding D.B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulent*. Academic Press, London, England, 1972.
- [9] Magnussen B.F., Hjertager B.H. *On Mathematical Models of Turbulent Combustion With Special Emphasis on Soot Formation and Combustion*, 1976, pp. 747-775
- [10] Varnatts Yu., Maas U., Dibble R. *Phizicheskie i khimicheskie aspekty, modelirovanie, experiment, obrazovanie zagryaznyayushchikh veshchestv* [Burning. Physical and chemical aspects, modeling, experiments, formation of pollutants]. Trans. With the English, Moscow, FIZMATLIT, 2003. 352p.
- [11] Zel'dovich Ya.B. Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamenetsky D.A. *Okislenie azota pri gorenii*

- [Oxidation of nitrogen during combustion]. Moscow: AN SSSR, 1947. 145 p.
- [12] Fletcher K. Vychislitelnye metody v dinamike jydokostei [Computational methods in the dynamics of liquids] Moscow: Mir, 1991. 504p. (in Russian)
- [13] Redko A.A., Davidenko A.V., Pavlovsky S.V., Kulikova N.V., Pavlovskaya S.V., Redko I.A. Modelirovanie rabochikh processov v topke parovogo vodotrubnogo kotla s cel'yu snijeniya vybrosov oksida azota [Modeling of working processes in the furnace of a steam water-tube boiler in order to reduce emissions of nitrogen oxide], *Regional problems of energy*, Moldova, no. 1 (33), 2017.
- [14] Puchkov L.A., Krasnyuk N.N. Ugolnyi metan v maloi energetike [Coal Methane in Minor Energy], Moscow, Mining Journal, Spec. Issue, no. 1, 2004.
- [15] Puchkov L.A., Krasnyuk N.N., Zolotykh S.S. Opyt i perspektivy ispol'zovaniya ugolnogo metana [Experience and perspectives of using coal methane], Moscow, 2004. 48 p.
- [16] Vintovkin A.A. *Sovremennye gorelochnye ustroystva (konstrukcii i tekhnicheskie kharakteristiki)* [Modern burner devices (designs and technical characteristics)] Reference edition Moscow: Mechanical Engineering-1, 2001. 496p.
- [17] Snegirev A.Yu. *Osnovy teorii gorenija: uchebnik* [Fundamentals of the theory of combustion: educational] St. Petersburg: Publishing house Polytechnic. University, 2014. 352 p.
- [18] Sobolev V.M., Snegirev A.Yu., Lupyak S.V., Shinder Yu.K. [Modeling of the turbulent diffusive torch of the direct-flow-vortex torch] Trudy 4-rd RNKT "Modelirovanie turbulentnogo diffuzionnogo fakela pryamotochno-vikhrevoi gorelki" [Proceedings of the 4th RNKT "Free convection. Heat and mass transfer in chemical transformations"], 2006. vol.3.
- [19] Triplett D.R., Filippov A.E., Pisarenko A.A. *Metan ugolnykh mestorojdenii Ukrainy: Spravochnoe posobie* [Methane of Coal Deposits of Ukraine: Reference Guide], Kiev: Logos, 2000. 462p.
- [20] Ruban A.D., Zurbidiev V.S., Zurbidiev G.S. *Metan v shakhtakh i rudnikakh Rossii: prognoz, izvlechenie i ispol'zovanie* [Methane in mines and mines in Russia: forecast, extraction and use] Moscow: IPKON RAN, 2006. 312p.
- [21] Patskov E.A., Storovsky N.M. Racionalnoe ispol'zovanie prirodnogo gaza ugolnykh plastov [Rational use of natural gas from coal seams] *Gas industry*, no. 4, 2008. 80-81 pp.
- [22] Bakkhaus K., Artemiev V., Rudenko Yu.F., Kosterenko V.N. Utilizaciya shakhtnogo gaza s sodержaniem metana menee 25% [Utilization of mine gas with a methane content of less than 25%]. *Coal*, No. 6, 2008. pp. 8-12.
- [23] Litvinenko A.S. Metan ugol'nykh mestorojdeniyi kak al'ternativnyi istochnik topliva [Methane from coal deposits as an alternative fuel source] *Electronic Journal of Energy Service Company "Environmental Systems"*. No. 1, 2006.

#### Сведения об авторах.



**Редько Андрей Александрович**  
Доктор технических наук, профессор каф. ТГВ и ТВЕР, ХНУСА. Имеет более 90 научных публикаций, 2 учебных пособия с грифом МОН Украины, более 15 патентов, более 40 докладов на конференциях в различных областях энергетики. Область научных интересов: использование возобновляемых источников энергии, низкопотенциальной энергии, тепломассообмен, термодинамика.  
E-mail: [andrey.ua-mail@ukr.net](mailto:andrey.ua-mail@ukr.net)



**Редько Игорь Александрович**  
Кандидат технических наук, доцент каф. эксплуатации газовых и тепловых систем, ХНУГХ им. А.М. Бекетова. Область научных интересов: геотермальная энергетика, эффективное сжигание низкосортных топлив,  
E-mail: [germes\\_s2006@ukr.net](mailto:germes_s2006@ukr.net)