

УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ГАЗОВОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ В МНОГОСЛОЙНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Х. Лю¹, Б.-В. Ли², Х.-Л. Ван³¹Северо-Восточный университет, 110919 Шеньян, Китай, liuh@smm.neu.edu.cn²Даляньский технологический университет, 116024 Далянь, Китай³Компания по производству центробежных компрессоров, Шеньян, Китай

Проведены эксперименты по сжиганию в пористой горелке разбавленного сжиженного нефтяного газа, предварительно перемешанного с воздухом. Установлено, что смеси с низкой теплотой горения способны к устойчивому горению в пористой горелке. Измерены распределения концентраций компонентов и температуры пламени. По результатам этих измерений найдено, что наилучшая устойчивость горения наблюдается при значении эквивалентного отношения 0.8. Для улучшения параметров горелки проведены эксперименты с разными характеристиками пористой среды. Численные расчеты подтвердили полученные оптимальные свойства среды. Показано, что при горении в пористой среде можно достичь лучших параметров по сравнению со «свободным» пламенем.

Ключевые слова: пористые среды, горение, низкокалорийный газ, многокомпонентный состав, эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

Идея тепловой рециркуляции в пламенах предложена в работе [1]. В [2] разработана теория газового горения в пористой среде. Горение в инертной пористой среде дает ряд преимуществ: большой диапазон регулирования мощности, высокая плотность тепловой мощности и низкий уровень вредных выбросов.

Позднее были проведены эксперименты, в которых пористой средой служили спеченный железный блок с небольшими прямыми каналами [3], сетка из нержавеющей стали [4]. В следующем поколении горелок [5–7] использовали керамическую пену либо таблетки оксида алюминия.

Эксперименты [8] были выполнены на двухсекционной горелке, изготовленной из пористого, частично стабилизированного диоксида циркониевой керамики (ПСЦ). Вверх по потоку устанавливалась секция ПСЦ с малыми порами, вниз — секции ПСЦ с разными, но большими порами. В такой конструкции секция, расположенная вверх по потоку, служила

для предварительного прогрева смеси, а в секции вниз по потоку происходило горение. Пламя стабилизировалось в нижней секции [8].

В экспериментах [9] применялась пористая горелка, состоящая из двух секций, заполненных сферами различного диаметра. Наблюдалось стабильное горение в широком диапазоне отношений воздух/топливо, а также снижение токсичных выбросов. Динамический диапазон горелки по мощности 20 : 1.

В работе [10] для улучшения свойств ПСЦ-горелок использовали закаленный муллит с диоксидом циркония и диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия. Последний обладает свойствами, позволяющими расширить рабочий диапазон горелки. В дальнейшем эксперименты проводили с этим материалом [11, 12].

Большинство экспериментов было выполнено с газами, содержащими один вид горючего, например водород, метан и т. д., тогда как в реальных приложениях горючие газы в основном имеют многокомпонентный состав.

Цель настоящей работы — проверить возможность устойчивого горения многокомпонентных топлив с низкой теплотой сгорания в горелках с разными пористыми средами. В качестве горючего использовался разбавленный сжиженный нефтяной газ, состав которого

© Liu H.¹, Li B.-W.², Wang H.-L.³, 2014.

¹School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, 110819 Shenyang, China. ²Institute of Thermal Engineering, School of Energy & Power Engineering, Dalian University of Technology, China. ³Shenyang Blower Works Group Nuclear Pump Co., Ltd, China.

представлен в табл. 1. Регистрировались концентрации вредных продуктов горения, распределение температуры и скорости газа, при которых горение было устойчивым. Проанализировано влияние ряда параметров на характер горения в различных пористых средах, которые могут играть важную роль в численном моделировании.

1. УСТАНОВКА

Экспериментальная установка состоит из системы подачи газа, реактора, системы измерения температуры и системы регистрации вредных веществ в продуктах горения (рис. 1).

1.1. Система подачи газа

Система подачи газа служит для создания нужной газовой смеси при определенном давлении. Для получения топлива с низкой теплотой сгорания сжиженный нефтяной газ смешивали с азотом. Теплота сгорания смеси в экспериментах изменялась в широком диапазоне — $2652 \div 84591$ кДж/м³. Смесь подавалась в реактор из сосуда высокого давления. Состав сжиженного газа приведен в табл. 1.

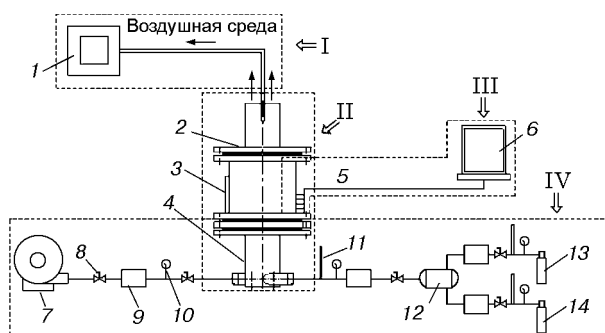


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

I — блок измерения продуктов сгорания, II — блок сжигания газа, III — блок измерения температуры, IV — система газоснабжения; 1 — анализатор дымовых газов, 2 — выхлопная труба, 3 — камера сгорания, 4 — камера предварительного перемешивания, 5 — термпары, 6 — устройство сбора данных, 7 — вентилятор, 8 — регулирующий вентиль, 9 — расходомер, 10 — манометр, 11 — термометр, 12 — смешительная камера, 13 — азот, 14 — сжиженный газ

Таблица 1

Состав исследуемого газа

Компонент	Объемная доля, %
CH ₄	0.99
C ₂ H ₆	4.32
C ₂ H ₄	0.15
C ₃ H ₈	45.93
C ₃ H ₆	1.49
C ₄ H ₁₀	25.27
C ₄ H ₈	7.71
C ₃ H ₄	3.73
CO ₂	0.51
O ₂	1.23
N ₂	2.52
CO	6.14

1.2. Реактор

Реактор состоит из камеры предварительного перемешивания, камеры горения и трубы для удаления продуктов горения (рис. 2). В данном случае использовалась среда из двух слоев пористостью 60 и 10 ppi (pores per inch), толщина обоих слоев 50 мм.

Воздух и топливо подавались в смеситель с двух сторон тангенциально, благодаря чему

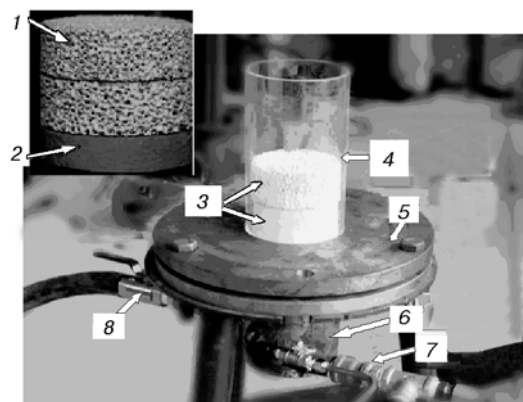


Рис. 2. Основные компоненты установки:

1 — пористая среда с большими порами (крупнопористая), 2 — с мелкими порами (мелкопористая), 3 — пористая керамика, 4 — труба из кварцевого стекла, 5 — медная плита, 6 — камера предварительного перемешивания, 7 — ввод горючего, 8 — подача воздуха

формировалось вихревое движение, что приводило к хорошему перемешиванию газов. Медная пластина с несколькими отверстиями устанавливалась между смесителем и камерой сгорания. Благодаря высокой теплопроводности она передавала тепло от нагретой пористой среды в атмосферу, это предотвращало проскок пламени в смеситель.

Камера сгорания — основная часть реактора. Он представлял собой кварцевую круглую трубу, что позволяло наблюдать за свечением в реакционной зоне. Внутренний диаметр трубы 100 мм. Пористая среда состояла из нескольких слоев вспененной керамики различной пористости. Толщина керамического слоя 25 или 50 мм. В кварцевой трубе и соответствующих местах теплоизолирующей оболочки сделаны три вертикальных ряда отверстий для термопар.

1.3. Система измерения температуры

Для измерения температуры использовались термопары К- и S-типа, соединенные специальными преобразователями с дисплеем. Пространство между камерой сгорания и оболочкой заполнялось огнеупорной тканью.

Термопары устанавливались в виде вертикальных рядов, обозначенных С1, С2 и С3. Угол между рядами 120° . В каждом ряду размещалось пять термопар К- и S-типа. Точка, в которой измерялась температура, задавалась рядом и номером термопары в ряду. Для примера, точка С1-2 — это вторая термопара в ряду С1. Расстояние между этой точкой и дном пористой среды составляет $l = 50$ мм. В табл. 2 приведены расстояния l и типы термопар для одного ряда.

Таблица 2
Расположение точек измерения температуры и соответствующие термопары

Номер точки измерения	l , мм	Тип термопары
1	39	К
2	50	К
3	65	S
4	80	S
5	95	S

1.4. Система измерения состава продуктов горения

Измерения проводились в четырех точках над горелкой с расстоянием между ними 10 см. Использовался анализатор газов Unigas 3000+, позволяющий непрерывно и с высокой точностью регистрировать состав продуктов горения.

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Слой пористой среды представлял собой вспененную керамику: в зоне горения — диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия [10], в области предварительного перемешивания — оксид алюминия. Пористость слоев 60, 50, 20 и 10 ppi. Расположение слоев с различными размерами пор показано на рис. 2, толщина пористых слоев 25 и 50 мм.

В секции, расположенной вверх по потоку, размещались пористые среды с маленькими порами, они служили для предварительного перемешивания. Пористые среды с большими порами находились в секции вниз по потоку — в области, где происходит горение. Между секциями находились огнепреградители — огнеупорное волокно и керамические частицы, связанные в щит. Одна из целей экспериментов — выбрать лучшую комбинацию керамических материалов для получения хорошей тепловой стабильности и надежного предотвращения проскока пламени.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Горение инициировалось на выходе горелки. Поначалу голубое пламя устремлялось в пористую среду и становилось золотисто-оранжевым. По мере стабилизации горения в секции с крупнопористой средой пламя приобретало темно-красный цвет. Теплота сгорания разбавленного сжиженного газа изменялась в диапазоне $2650 \div 4400$ кДж/м³, и ее значение было близко к теплоте сгорания газа, получаемого в доменных печах, при смешивании с коксовым газом. Наиболее устойчивому горению соответствовал диапазон эквивалентных отношений $0.32 \div 0.53$. Топливо-воздушную смесь подавали со скоростью $0.48 \div 0.65$ м/с, теплонапряженность при этом составляла $385 \div 563$ кВт/м². Эксперименты показали, что топливо с низкой теплотой сгорания может устойчиво гореть в кера-

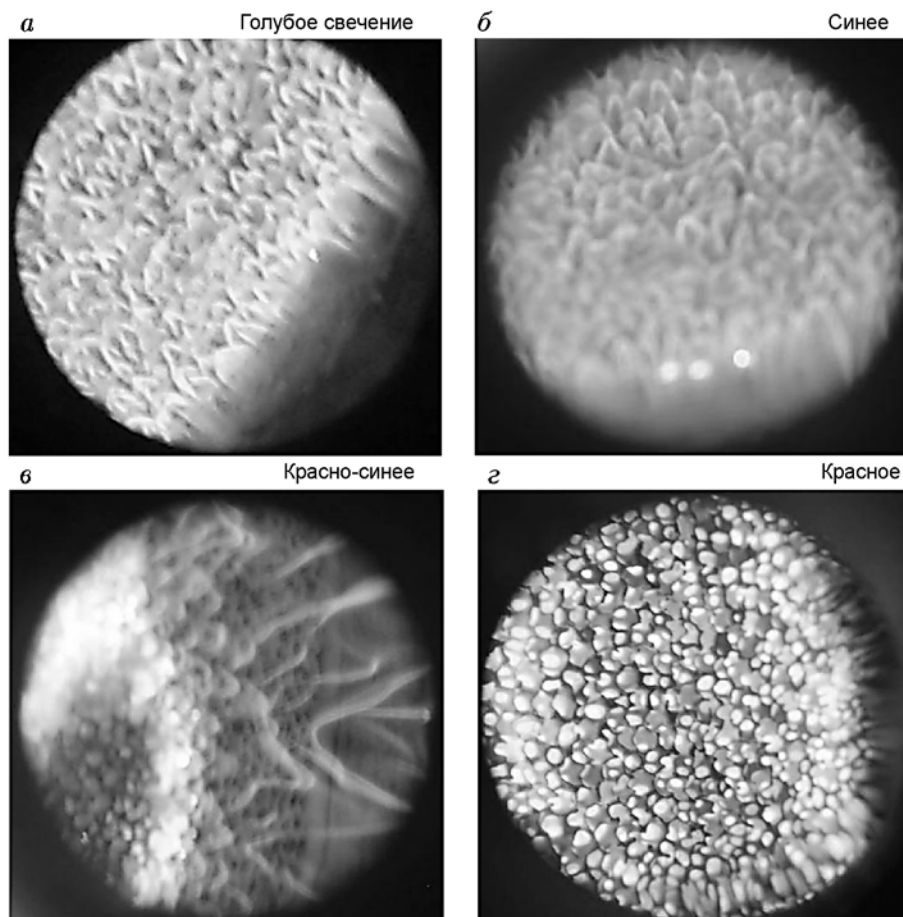


Рис. 3. Фотографии пламени в различных фазах горения

мической пористой среде. На рис. 3 показаны пламена в различных фазах горения.

Приведем определения применяемых в настоящей работе обозначений.

Скорость производства тепла (v_Q) — количество тепла, которое выделяется с единицы площади сечения A_0 горелки за 1 с:

$$v_Q = \frac{q_f Q}{3600 A_0}, \quad (1)$$

где Q — тепловыделение, кДж/м³, q — объемный расход, м³/ч. Средняя скорость движения горючей смеси:

$$u_{\text{combine}} = \frac{q_f + q_A}{A_0 \varepsilon}, \quad (2)$$

где ε — пористость. Для нахождения эквивалентного отношения ϕ нужно разделить отношение доли топлива к доле окислителя в реальной смеси на такое же отношение для стехиометрической смеси:

$$\phi = \frac{(F/O)_{\text{actual}}}{(F/O)_{\text{stoich}}}. \quad (3)$$

Тепловая эффективность η определяется как отношение количества тепла, поглощенного водой, к теплу, которое может выделиться при горении:

$$\eta = \frac{3600 m c_p \Delta T}{q_f Q} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где m — масса, c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении.

3.1. Результаты измерения температуры

Изменение температуры во времени показано на рис. 4 (вторые термопары в трех разных рядах).

Эксперимент проводился в следующей последовательности. Сначала поджигалась смесь сжиженного нефтяного газа с воздухом. Через 1 мин в сжиженный нефтяной газ добавлялся

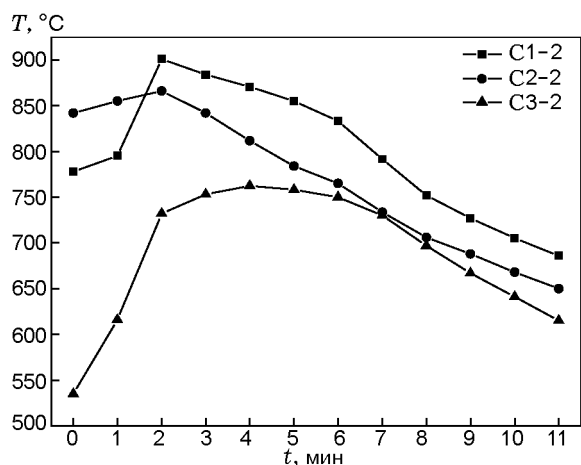


Рис. 4. Температура в точках измерения C1-2, C2-2 и C3-2

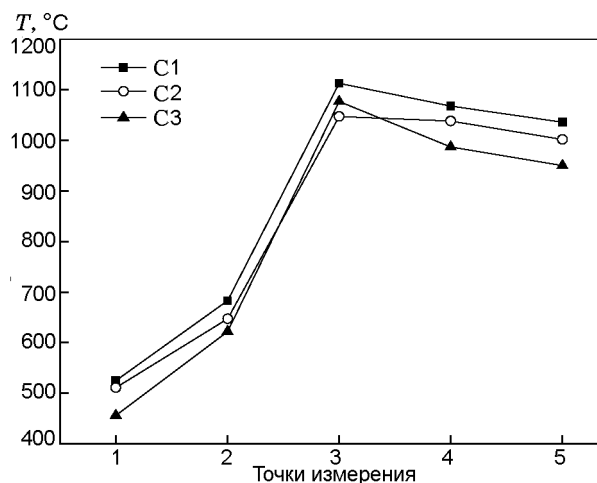


Рис. 5. Температура в разных точках пористой среды

азот. На рис. 4 видно, что после этого температура начинает уменьшаться, при этом ее значения в разных точках заметно отличаются. Постепенно разница сокращается, и в горизонтальном сечении температура становится почти одинаковой. Принималось, что волна горения стабилизируется при разнице температуры меньше 100°.

Профили температуры в установившемся состоянии для трех рядов термопар приведены на рис. 5. Максимальная температура, превышающая 1 100 °С, наблюдается вблизи точки 3 (координата указана в табл. 2). В точках 4 и 5 температура падает. Это означает, что зона горения локализована на границе пористой среды. Точка 5 находится в конце продуктов

горения, температура в ней ≈900 °С.

3.2. Анализ продуктов горения

Низкий выход вредных веществ — одно из преимуществ пористой горелки. Измерения проводили в условиях, подобных тем, при которых горит обычная, предварительно перемешанная смесь воздуха с промышленным газом. Расход газов и давление приведены в табл. 3. Эквивалентное отношение равно 0.34, входная скорость газовой смеси 0.52 м/с.

На рис. 6 видно, что содержание CO в продуктах горения (Y) меньше 30 ppm, при этом содержание и NO, и NO_x меньше 10 ppm. С увеличением расстояния l над пористой средой содержание CO сначала растет, а затем значительно уменьшается. Это означает, что горючее почти полностью сгорает в пористой среде, хотя некоторые горючие газы реагируют с воздухом над горелкой. Наличие пористой среды позволяет расширять реакцию зону.

Согласно данным рис. 7 содержание кислорода и углекислого газа остается неизменным на высоте 100 мм над пористой средой.

Таблица 3
Скорость и давление газов

Газ	Расход, м ³ /ч	Давление, МПа
Сжиженный газ	0.30	0.18
Азот	3.8	0.008
Воздух	8.4	5.0

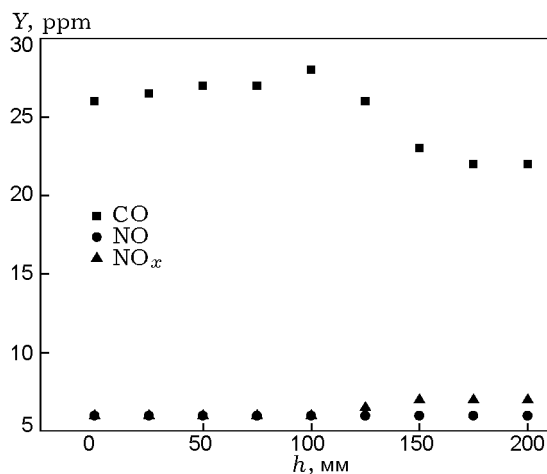


Рис. 6. Содержание загрязняющих веществ на разном расстоянии над пористой средой

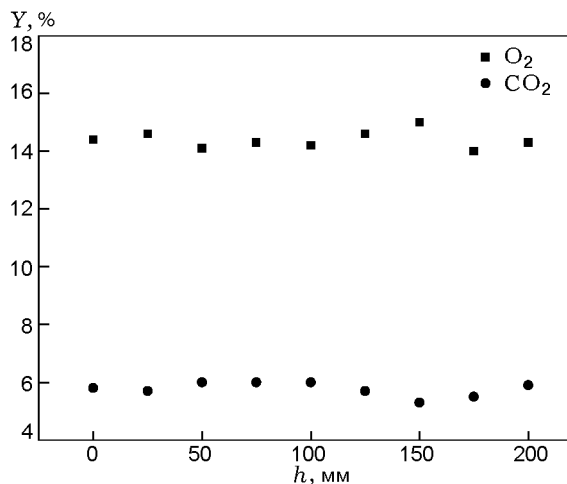


Рис. 7. Концентрация O₂ и CO₂ на разном расстоянии от пористой среды

Это говорит о том, что горение в основном происходит в пористой среде, хотя слабое реагирование наблюдается и в пространстве над горелкой.

3.3. Влияние свойств пористой среды на скорость производства тепла

На рис. 8 показана связь между скоростью производства тепла и эквивалентным отношением для предварительно перемешанной смеси в различных пористых средах. Толщина

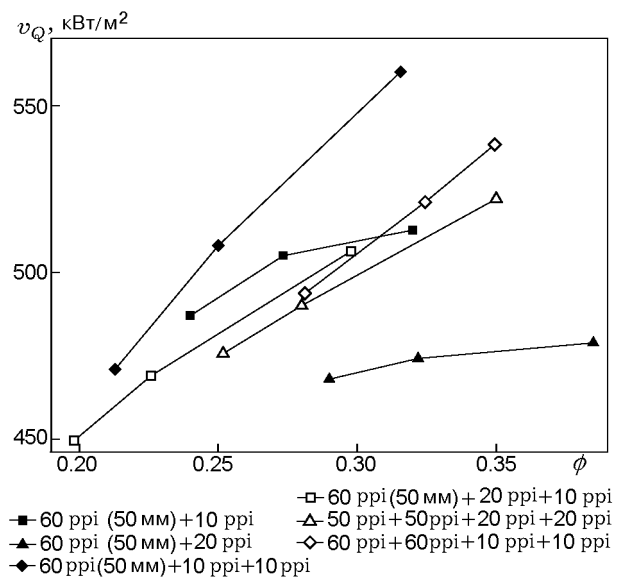


Рис. 8. Зависимость скорости производства тепла от эквивалентного отношения для предварительно перемешанного газа

слоя пористой среды указана на рисунке, в тех случаях, когда значение толщины не приведено, она равна 25 мм. Например, запись 60 ppi (50 мм) + 20 ppi означает, что в секции предварительного нагрева установлена вспененная керамика толщиной 50 мм и пористостью 60 ppi, в зоне горения толщина слоя вспененной керамики пористостью 10 ppi составляет 25 мм. Удельная масса среды пористостью 60 ppi равна 28 г/см³, 20 ppi — 0.42 г/см³, 10 ppi — 0.56 г/см³.

Большинство экспериментов проведено со смесями, характеризуемыми эквивалентным отношением 0.25 ÷ 0.35, однако наименьшее его значение, при котором получено стабильное горение, равно 0.19. Эксперименты показали, что скорость производства тепла зависит от пористой среды. Конструкция из трех слоев 60 ppi (50 мм) + 10 ppi + 10 ppi дает нам лучший результат, а среди двухслойных конструкций система 60 ppi (50 мм) + 10 ppi лучше, чем 60 ppi (50 мм) + 20 ppi. При установлении в зоне горения слоя толщиной 25 мм скорость производства тепла возрастает слабее с увеличением эквивалентного отношения. Чем больше отличие в пористости между секциями предварительного нагрева и горения, тем лучшие характеристики достигаются для производства тепла при горении.

3.4. Влияние состава смеси на скорость производства тепла и тепловую эффективность

Эффективность и стабильность горения в

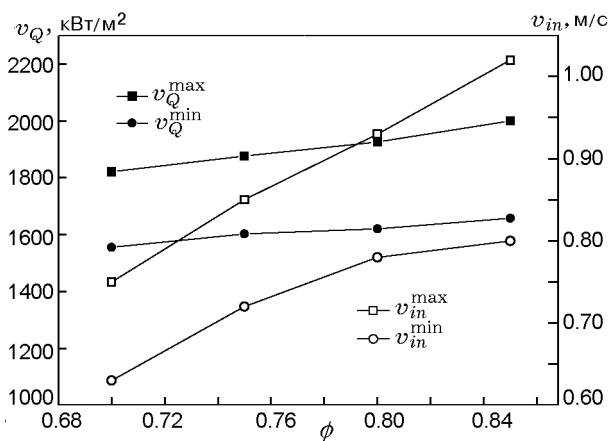


Рис. 9. Зависимость скорости производства тепла от эквивалентного отношения при различных скоростях подачи предварительно перемешанного газа

Таблица 4

Экспериментальные данные для пористой горелки

Серия экспериментов	Расход, м ³ /ч			Охлаждающая вода			Тепловая эффективность, %
	газ	азот	воздух	входная температура, °С	выходная температура, °С	расход, м ³ /ч	
1	0.857	1.923	15.77	23.2	37	0.229	18.2
2	0.892	1.954	17	23.2	40	0.204	19
3	0.729	1.985	15.29	23.2	39.8	0.174	19.6

Таблица 5

Экспериментальные данные для традиционной горелки

Серия экспериментов	Расход, м ³ /ч			Охлаждающая вода			Тепловая эффективность, %
	газ	азот	воздух	входная температура, °С	выходная температура, °С	расход, м ³ /ч	
1	0.816	0.89	16.01	23.2	37.1	0.171	14.4
2	0.912	1.188	16.95	23.3	40.9	0.16	15.3
3	0.768	0.611	11.05	23.4	40	0.149	15.9

пористой среде зависят от скорости газа на входе и от эквивалентного отношения. Скорость газа на входе в горелку измерялась установленными там расходомерами (см. рис. 1). Диапазон скоростей газа, при которых наблюдается устойчивое горение, и соответствующий диапазон скоростей производства тепла при разных эквивалентных отношениях показаны на рис. 9. Использовалась пористая среда 60 ppi (50 мм) + 10 ppi, для которой получены лучшие результаты в двухсекционной горелке (см. § 3.3).

Наиболее высокая эффективность в эксперименте наблюдалась при горении смеси с эквивалентным отношением $\phi \approx 0.8$. Измерения проводили для горючих с $\phi = 0.7 \div 0.85$. При этом скорость производства тепла изменялась от 1100 до 2200 кВт/м², а скорость газа на входе — от 0.6 до 1.1 м/с. На рис. 9 видно, что диапазоны этих скоростей увеличиваются и сдвигаются к большим значениям при росте эквивалентного отношения.

3.5. Сравнение эффективности пористой горелки и традиционной

Для того чтобы выяснить, какая горелка эффективнее — пористая или традиционная (без пористой среды), были проведены эксперименты при варьировании условий горения. Результаты приведены в табл. 4, 5.

Из таблиц видно, что в горючую смесь в пористой горелке добавлялось больше азота. Это означает, что в ней можно осуществить горение более разбавленных смесей. Тепловая эффективность горения в пористой горелке составляет 19 %, тогда как в традиционной горелке ≈ 15 %. За счет взаимодействия высокотеплопроводной пористой среды с газовым пламенем происходит передача тепла от продуктов горения в свежую смесь, что ведет к повышению эффективности горения и уменьшению загрязнения продуктами горения. Отметим, что тепловая эффективность в экспериментах на лабораторной горелке оказалась меньше, чем для обычных промышленных горелок. Это означает, что используемая нами горелка может быть оптимизирована в плане теплообмена с окружающей средой.

3.6. Сравнение с результатами других исследователей

Сравнение опубликованных результатов с данными настоящей работы затруднено тем, что результаты других исследователей в основном получены для однокомпонентных топлив, в то время как мы использовали сжиженный нефтяной газ с добавкой азота, имеющий низкую теплоту горения.

На рис. 10 представлены области устойчивого горения, найденные нами при различных

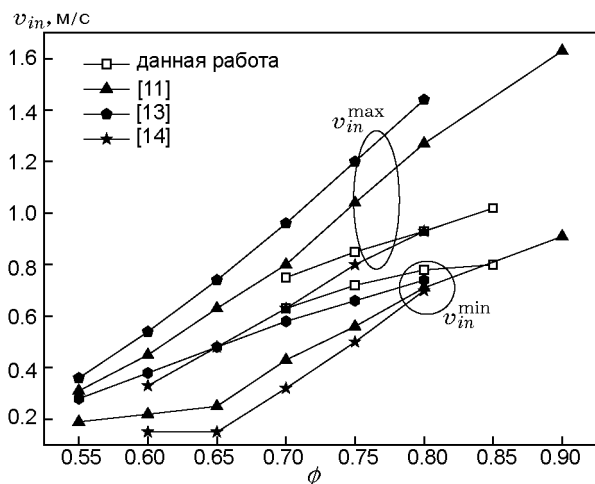


Рис. 10. Сравнение стабильных рабочих диапазонов при различных значениях эквивалентного отношения

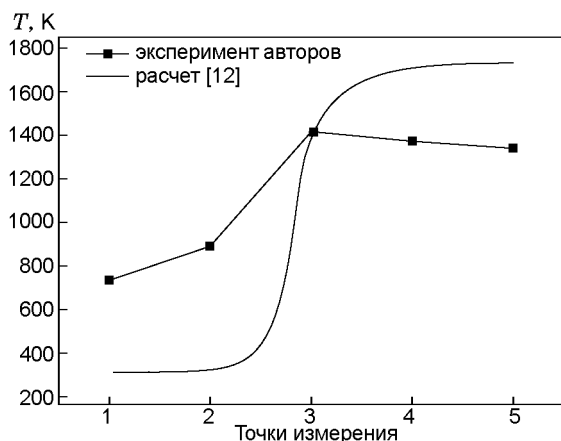


Рис. 11. Измеренный и рассчитанный [12] профили температуры

эквивалентных соотношениях для пористой среды 60 ppi (50 мм) + 10 ppi (50 мм) и взятые из литературы. Устойчивое горение находится в области от минимального до максимального значения входной скорости горючего газа при данном эквивалентном соотношении. Область устойчивости можно расширить в сторону увеличения входной скорости при росте эквивалентного соотношения. Результаты данной работы демонстрируют ту же тенденцию, но диапазон изменения параметров относительно узкий. Это можно объяснить тем, что теплота сгорания разбавленного горючего (в нашем случае) меньше, чем у метана, использованного в других исследованиях.

На рис. 11 показаны профили температу-

ры горения метана при $\phi = 0.65$, $v_{in} = 0.6$ м/с, взятые из [12], и данные настоящей работы при $\phi = 0.55$, $v_{in} = 0.6$ м/с. Видно, что экспериментальный профиль температуры качественно согласуется с рассчитанным в [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Многокомпонентный горючий газ с низкой теплотой сгорания может устойчиво гореть в пористой горелке.

2. Уровень концентрации вредных продуктов в различных точках над пористой горелкой достаточно низкий. Так, максимальное содержание CO меньше 30 ppm, а NO или NO_x — меньше 10 ppm. Суммарное же содержание вредных продуктов не превышает 20 ppm.

3. Горючий газ почти полностью сгорает в пористой среде, и только небольшое его количество догорает в воздухе на выходе горелки. Пористая среда обеспечивает расширение реакционной зоны.

4. Измерения скорости производства тепла показали, что при устойчивом горении комбинация слоев 60 ppi (50 мм) + 10 ppi (25 мм) более эффективна, чем 60 ppi (50 мм) + 20 ppi (25 мм). Однако система из трех слоев 60 ppi (50 мм) + 10 ppi (25 мм) + 10 ppi (25 мм) лучше любой двух- или других трехэлементных структур.

5. Измеренная тепловая эффективность пористой горелки 19 % оказалось выше, чем у традиционной (без пористой среды) — 15 %.

Работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований для центральных университетов (грант № 110302004).

ЛИТЕРАТУРА

1. Weinberg F. J. Combustion temperatures: The future // Nature. — 1971. — V. 233, N 5317. — P. 239–241.
2. Takeno T., Sato K. An excess enthalpy flame theory // Combust. Sci. Technol. — 1979. — V. 20, N 1-2. — P. 73–84.
3. Takeno T., Sato K. A theoretical and experimental study on an excess enthalpy flame // 7th ICOGER, Meeting, Gottingen, Germany. — 1979. — P. 20–24.
4. Echigo R., Yoshizawa Y., Hanamura K., Tomimura T. Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation // Proc. of the Eighth Intern. Heat Transfer Conf. — 1986.

5. **Smucker M. T., Ellzey J. L.** Computational and experimental study of a two-section porous burner // *Combust. Sci. Technol.* — 2004. — V. 176, N 8. — P. 1171–1189.
6. **Hoffmann J. G., Echigo R., Yoshida H., Tada S.** Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system // *Combust. Flame.* — 1997. — V. 111, N 1-2. — P. 32–46.
7. **Zhdanok S., Kennedy L. A., Koester G.** Superadiabatic combustion of methane air mixtures under filtration in a packed bed // *Combust. Flame.* — 1995. — V. 100, N 1-2. — P. 221–231.
8. **Hsu P. F., Evans W. D., Howell J. R.** Experimental and numerical study of premixed combustion within nonhomogeneous porous ceramics // *Combust. Sci. Technol.* — 1993. — V. 90, N 1-4. — P. 149–172.
9. **Trimis D., Durst F.** Combustion in a porous medium—advances and applications // *Combust. Sci. Technol.* — 1996. — V. 121, N 1-6. — P. 153–168.
10. **Mathis W. M., Ellzey J. L.** Flame stabilization, operating range, and emissions for a methane/air porous burner // *Combust. Sci. Technol.* — 2003. — V. 175, N 5. — P. 825–839.
11. **Liu H., Dong S., Li B. W., Chen H. G.** Parametric investigations of premixed methane-air combustion in two-section porous media by numerical simulation // *Fuel.* — 2010. — V. 89, N 7. — P. 1736–1742.
12. **Shi J. R., Xie M. Z., Liu H., Li G., Zhou L.** Numerical simulation and theoretical analysis of premixed low-velocity filtration combustion // *Intern. J. Heat & Mass Transfer.* — 2008. — V. 51, N 7-8. — P. 1818–1829.
13. **Barra A. J., Diepvens G., Ellzey J. L., Henneke M. R.** Numerical study of the effects of material properties on flame stabilization in a porous burner // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 134. — P. 369–379.
14. **Khanna V.** Experimental analysis of radiation for methane combustion within a porous medium burner // M. S. Thesis, Mechanical Engineering Dept., Univ. of Texas, Austin. — 1992.

*Поступила в редакцию 26/II 2013 г.,
в окончательном варианте — 5/IX 2013 г.*
