

УДК 536.46

ГОРЕНИЕ ГАЗОВ В УЗКОМ КАНАЛЕ ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ

В. В. Замашиков

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, albor@kinetics.nsc.ru

Приведены экспериментальные результаты по влиянию давления на скорость распространения пламени в трубке, диаметр которой близок к критическому. Исследовался режим горения, важной особенностью которого является передача тепла по стенке трубки от продуктов горения в свежую смесь. В качестве горючих газов использовались метано- и водородовоздушные смеси. Эксперименты показали, что с ростом давления скорость распространения метановоздушного пламени уменьшается, тогда как скорость распространения водородовоздушного почти не изменяется. Такое поведение объясняется зависимостью нормальной скорости от давления.

Ключевые слова: горение с избытком энтальпии, критический диаметр, гашение, узкий канал.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с потребностью в миниатюрных и энергоемких источниках питания, миниатюрных горелках и микродвигателях в настоящее время активно исследуются процессы горения в микрореакторах [1–6]. Размер микрореактора зависит от предельного размера, при котором еще возможно горение. Известно [7], что существуют критические размер щели и диаметр трубки. Они характеризуются тем, что пламя не может проникнуть в более узкие каналы и щели вследствие теплопотерь в стенки из фронта пламени. Однако размер реактора можно уменьшить, если организовать горение так, чтобы тепло от продуктов горения возвращалось в свежую смесь, прогревая ее. В работах [8–14] исследовались такие процессы при стабилизации пламени внутри микрореактора и при распространении волны горения вдоль него. В [8–10] для улучшения стабильности горения в микрогорелке применялся катализатор. В работе [11] предложена водородная микрогорелка простой конструкции, в которой посредством азота, заполняющего трубку, вставленную в пламя, происходит рециркуляция тепла. Работы [13, 14] посвящены исследованию распространяющейся вдоль узкой трубки волны горения. В узких каналах и щелях, с одной стороны, возможен режим с прогревом стенки (или ему подобный), с другой стороны, массовая скорость сгорания ограничена из-за малости размеров. Возможный путь преодо-

ления этой трудности — повышение давления. Цель настоящей работы — исследование влияния давления на распространение волны горения вдоль трубки, диаметр которой близок к критическому.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве реактора во всех экспериментах использовалась кварцевая горизонтальная трубка с внутренним диаметром 3.8 мм, внешний диаметр 6 мм, длина трубки 48 см. Схема установки показана на рис. 1. Исследовалось горение метановоздушных и водородовоздушных смесей. Смеси готовили в смесителе по парциальным давлениям. Относительная точность приготовления смеси $\pm 1\%$. Эксперименты проводили при комнатной температуре. Смесь из смесителя поступала в реакционную трубку через редуктор, расходомер и вентиль. Давление в реакционной трубке регулировалось и поддерживалось постоянным с помощью редуктора. Измеряли его манометром

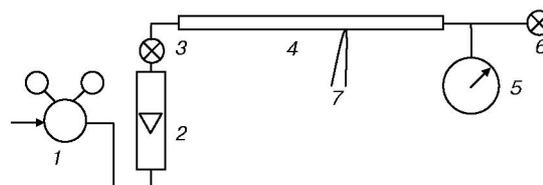


Рис. 1. Схема установки:

1 — редуктор, 2 — поплавковый расходомер, 3 — вентиль, 4 — реакционная труба, 5 — манометр, 6 — натекатель, 7 — хромель-копелевая термопара (0.2 мм)

Работа выполнена в рамках интеграционного проекта СО РАН № 64, 2011 г.

© Замашиков В. В., 2012.

МТИ класса точности 0.6. В ходе эксперимента давление в трубке изменялось не больше чем на 0.01 МПа. Необходимый расход газа устанавливался с помощью натекателя и измерялся поплавковым расходомером типа РМ с точностью 3 %. Градуировка расходомера проведена при всех рабочих давлениях и для всех исследуемых смесей. Так как в метановоздушной смеси объемная доля метана мала, при градуировке метан не добавлялся. Для тарирования расходомера использовались барабанные расходомеры: при малых расходах — Ritter TG05, при больших — ГСБ400 кл. 1. Температура стенки трубки измерялась хромель-копелевой термопарой диаметром 0.2 мм. Термопара приклеивалась к стенке силикатным клеем, размер «клеяного пятна» был порядка толщины стенки трубки — 1.1 мм. Погрешность измерения температуры не превышала 10 °С. В экспериментах с метановоздушной смесью поджиг осуществлялся открытым пламенем следующим образом. Один конец трубки отсоединялся, на ее срезе устанавливался факел, и пламя перемещалось вдоль трубки, прогревая ее. Далее трубка присоединялась к манометру с натекателем, задавались нужные давление и расход. В опытах с богатой водородовоздушной смесью сначала устанавливались нужные давление и расход, затем поджигалась смесь, прогревая стенку трубки открытым пламенем. Для предотвращения конденсации воды при охлаждении продуктов горения часть трубки, где возможна конденсация, подогревалась внешним источником тепла (до температуры <math><100\text{ }^\circ\text{C}</math>).

Видимую скорость пламени u определяли по зависимости координаты пламени от времени. Координата регистрировалась визуально. Ось координат направлялась по вектору скорости свежего газа. Метановоздушное пламя излучает в видимом диапазоне, и его хорошо видно. Водородовоздушное пламя не видно, но в том месте, где оно находится, наблюдается желтое кольцо. Точность измерения видимой скорости 5 %. При прохождении пламени мимо термопары последняя регистрировала изменение температуры стенки. Сигнал термопары подавался на аналого-цифровой преобразователь, данные с которого в режиме реального времени считывались в компьютер.

Средняя скорость течения холодного горючего газа v определялась как отношение расхода к площади поперечного сечения реакцион-

ной трубки, умноженное на отношение атмосферного давления к давлению в трубке. Точность ее определения около 15 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Метановоздушная смесь

Для стехиометрической метановоздушной смеси (9.5 % CH_4) диаметр трубки 3.8 мм больше критического (при атмосферном давлении), поэтому пламя могло распространяться в обычном режиме (в этом режиме прогревом стенки трубки вблизи фронта пламени продуктами горения можно пренебречь). Целью настоящей работы было изучение режима горения, сопровождаемого прогревом стенки трубки [13, 14], поэтому обычный режим в данной работе не исследовался. Получены экспериментальные зависимости видимой скорости пламени от расхода газа при давлении $p = 0.1$ и 0.21 МПа. Возникли трудности с получением режима с прогревом стенки при повышенных давлениях. Рост давления приводил к возникновению акустической неустойчивости. Колебания пламени вызывали изменение его скорости и даже гашение. С увеличением расхода амплитуда колебаний возрастала, поэтому при $p = 0.21$ МПа удалось получить режим с прогревом стенки только при небольших расходах. Зависимости видимой скорости пламени от средней скорости горючего газа показаны на рис. 2. Видно, что увеличение давления приводит к уменьшению видимой скорости пламени,

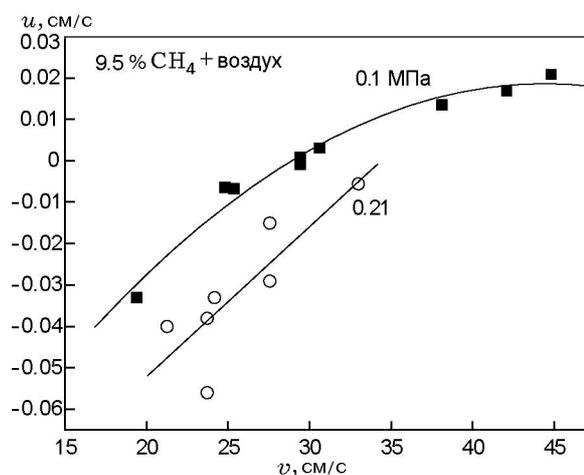


Рис. 2. Зависимости скорости распространения пламени от средней скорости горючего газа при разных давлениях

соответствующей фиксированной средней скорости горючего газа. Видимая скорость пламени определяется разницей между скоростью горючего газа вблизи фронта и скоростью перемещения волны горения по горючей смеси (определяется нормальной скоростью). Так как фронт пламени неплоский, а скорость и температура газа зависят от радиальной координаты, то в каждой точке фронта скорость газа и нормальная скорость вычитаются, так что результирующая скорость перемещения пламени вдоль оси трубки оказывается одинаковой на всей поверхности фронта. В противном случае процесс является нестационарным. Если при данном расходе видимая скорость уменьшается, это означает, что скорость перемещения пламени по горючей смеси растет. Заменяем реальный фронт пламени плоским. Тогда можно ввести среднюю скорость горения. Смещение кривых вниз означает увеличение средней скорости горения с ростом давления. Последнее возможно из-за увеличения нормальной скорости с возрастанием давления, из-за изменения поверхности пламени, из-за большего прогрева стенки и горючей смеси, которая прогревается нагретой стенкой трубки. Согласно [15] нормальная скорость зависит от давления по закону $Su = Su_0(p/p_0)^{-0.28}$, где Su и Su_0 — соответствующие давлениям p и p_0 нормальные скорости. То есть с ростом давления нормальная скорость уменьшается. Поверхность при тех же средних скоростях газа изменяется незначительно, поэтому увеличение средней скорости горения, скорее всего, связано с более сильным прогревом стенки трубки. Прогрев стенки и поток тепла по стенке от продуктов в горючую смесь зависят от массовой скорости сгорания, а она при прочих равных условиях зависит от давления. На рис. 3 приведены зависимости видимой скорости пламени от расхода горючего газа. Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что при фиксированном расходе газа видимая скорость пламени изменяется с давлением больше, чем при фиксированной средней скорости газа. Таким образом, скорость пламени более чувствительна к расходу, чем к средней скорости горючего газа. На рис. 3 представлены также расчетные зависимости. При расчете использовалась приближенная теория [16], в которой для простоты считается, что фронт горения плоский, температуры газа и стенки зависят только от координаты, направленной вдоль оси трубки. В расчетах использовалась

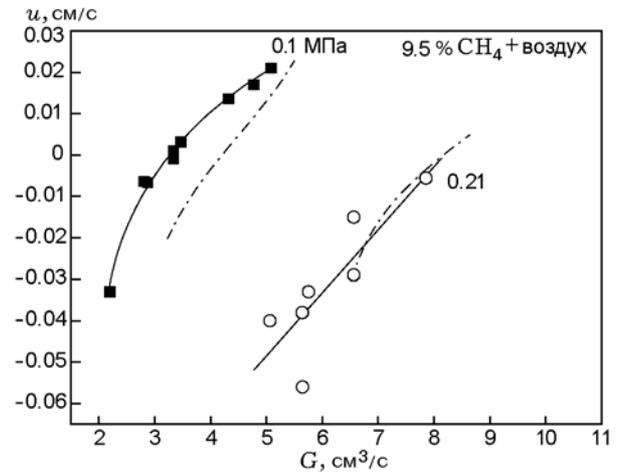


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные (штрихпунктирные линии) зависимости скорости распространения пламени от расхода горючего газа при разных давлениях

эмпирическая зависимость нормальной скорости от температуры и учитывались теплопотери в окружающую среду. Как видно из рис. 3, теория, несмотря на простоту и приближенный характер, дает правильные тенденции, а именно: с увеличением расхода горючего газа видимая скорость растет, с ростом давления зависимость видимой скорости от расхода горючего газа смещается вниз.

Водородовоздушная смесь

Для экспериментов выбрана богатая водородовоздушная смесь, содержащая 70 % водорода, поскольку ранее проведенные эксперименты показали, что горение таких смесей более устойчиво к акустическим возмущениям. Это позволило исследовать горение в режиме с прогревом стенки во всем возможном для данной установки диапазоне давлений. Диаметр трубки для этой смеси меньше критического (при атмосферном давлении), поэтому в обычном режиме пламя не могло распространяться. Полученные зависимости видимой скорости пламени от средней скорости горючего газа представлены на рис. 4. Видно, что с ростом давления видимая скорость пламени, соответствующая фиксированной средней скорости горючего газа, не уменьшается. Предположим, что нормальная скорость не зависит от давления. Тогда, как упоминалось выше, увеличение давления при прочих равных услови-

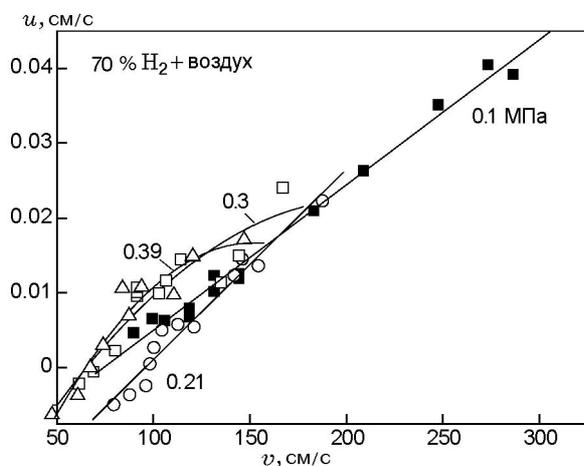


Рис. 4. Зависимости скорости распространения пламени от средней скорости горючего газа при разных давлениях

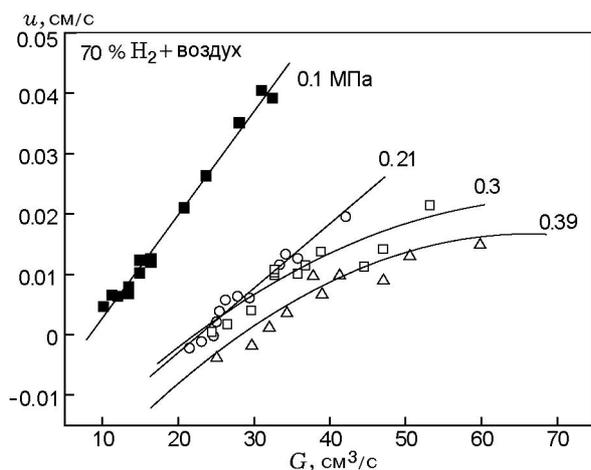


Рис. 5. Зависимости скорости распространения пламени от расхода горючего газа при разных давлениях

ях, т. е. при неизменной нормальной скорости и площади поверхности фронта горения, приведет к возрастанию массовой скорости горения и, как следствие, к увеличению температуры стенки трубки и потока тепла по ней от продуктов в свежую смесь. Повышение температуры стенки и увеличение потока тепла из продуктов в свежую смесь должны привести к росту нормальной скорости и средней скорости горения и, в свою очередь, к сдвигу кривых вниз. Однако в данном случае этого не наблюдается. Можно предположить, что это связано со значительным уменьшением нормальной скорости с ростом давления. Зависимости ско-

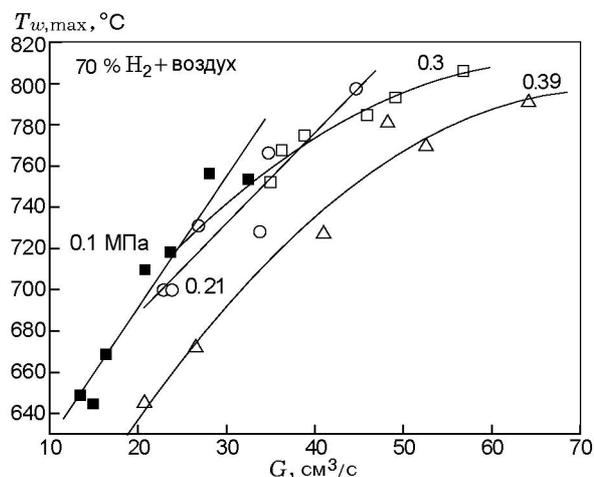


Рис. 6. Зависимости максимальной температуры стенки от расхода горючего газа при разных давлениях

рости пламени от расхода горючего газа показаны на рис. 5. Этот рисунок, как и рис. 3, демонстрирует важную роль массовой скорости горения в режиме с прогревом стенки.

Кривая, соответствующая $p = 0.1$ МПа на рис. 3, имеет вид, характерный для трубок, диаметр которых больше критического [17]. То, что при $p = 0.21$ МПа подобная зависимость не наблюдается, обусловлено, скорее всего, возникновением колебаний. Прямая линия, соответствующая богатой водородовоздушной смеси при $p = 0.1$ и 0.21 МПа (см. рис. 5), характерна для случая, когда диаметр трубки меньше критического [14]. Тот экспериментальный факт, что при увеличении давления от 0.21 до 0.3 МПа вид зависимости изменяется, свидетельствует о том, что диаметр трубки становится больше критического.

Установленные зависимости температуры стенки от времени показали, что максимальная температура достигается в продуктах горения. На рис. 6 приведены полученные зависимости максимальной температуры от расхода горючего газа при разных давлениях. Видно, что температура изменяется незначительно при увеличении давления. В работах [18, 19] экспериментально получена зависимость верхнего концентрационного предела распространения водородовоздушного пламени от начального давления. С ростом давления от 0.1 до 2.0 МПа пределы распространения пламени сужаются. Если предположить, что имеет место корреляция между нормальной скоростью и

верхним концентрационным пределом, то нормальная скорость с ростом давления должна значительно падать. Это является еще одним, хотя и не прямым подтверждением гипотезы о значительном уменьшении нормальной скорости с ростом давления.

ВЫВОДЫ

Получены зависимости скорости перемещения пламени, распространяющегося в режиме с прогревом стенки трубы, от давления для метано- и водородовоздушных смесей. Для метановоздушного пламени характерно усиление акустической неустойчивости с ростом давления. Сильные колебания пламени не позволили получить режим горения с прогревом стенки в широком диапазоне расходов при повышенном давлении. В том диапазоне, в котором удалось получить этот режим, средняя скорость горения увеличивается при повышении давления, несмотря на уменьшение нормальной скорости.

Для исследуемой водородовоздушной смеси в режиме с прогревом стенки с увеличением давления средняя скорость горения почти не изменяется. Это можно объяснить значительным уменьшением нормальной скорости с ростом давления. Литературные данные по верхнему концентрационному пределу косвенно подтверждают такую возможность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ju Y., Xu B.** Theoretical and experimental studies on mesoscale flame propagation and extinction // Thirtieth Symp. (Intern.) on Combustion. — 2004. — P. 2445–2453.
2. **Lloyd S. A., Weinberg F. J.** A burner for mixtures of very low heat content // Nature. — 1974. — V. 251. — P. 47–59.
3. **Weinberg F. J., Rowe D. M., Min G., Ronney P. D.** On thermoelectric power conversion from heat recirculating combustion systems // Twenty Ninth Symp. (Intern.) on Combustion. — 2002. — P. 941–947.
4. **Kuo C. H., Ronney P. D.** Numerical modeling of non-adiabatic heat-recirculating combustors // Thirty First Symp. (Intern.) on Combustion. — 2007. — P. 3277–3284.
5. **Kim N. I., Kato S., Kataoka T., Yokomori T., Maruyama S., Fujimori T., et al.** Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters // Combust. and Flame. — 2005. — V. 141. — P. 229–240.
6. **Raimondeau S., Norton D., Vlachos D. G., Masel R. I.** Modeling of high temperature microburners // Twenty Ninth Symp. (Intern.) on Combustion. — 2002. — P. 901–907.
7. **Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М.** Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
8. **Junhu Zhou, Yang Wang, Weijuan Yang, Jianzhong Liu, Zhihua Wang, Kefa Cen.** Combustion of hydrogen–air in catalytic micro-combustors made of different material // Intern. J. of Hydrogen Energy. — 2009. — V. 34. — P. 3535–3545.
9. **Chen Guan-Bang, Chao Yei-Chin, Chen Chih-Peng.** Enhancement of hydrogen reaction in a micro-channel by catalyst segmentation // Intern. J. of Hydrogen Energy. — 2008. — V. 33. — P. 2586–2595.
10. **Choi Wonyoung, Kwon Sejin, Shin Hyun Dong.** Combustion characteristics of hydrogen — air premixed gas in a sub-millimeter scale catalytic combustor // Intern. J. of Hydrogen Energy. — 2008. — V. 33. — P. 2400–2408.
11. **Jejurkar S. Y., Mishra D. P.** Numerical characterization of a premixed flame based annular microcombustor // Intern. J. of Hydrogen Energy. — 2010. — V. 35. — P. 9755–9766.
12. **Замашиков В. В.** Стабилизация пламени в узкой щели в расходящемся газовом потоке // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 21–25.
13. **Zamashchikov V. V.** Experimental investigation of gas combustion regimes in narrow tubes // Combust. and Flame. — 1997. — V. 108. — P. 357–359.
14. **Zamashchikov V. V.** An investigation of gas combustion in a narrow tube // Combust. Sci. and Technol. — 2001. — V. 166. — P. 1–14.
15. **Hassan M. I., Aung K. T., Faeth G. M.** Measured and predicted properties of laminar premixed methane/air flames at various pressures // Combust. and Flame. — 1998. — V. 115. — P. 539–550.
16. **Замашиков В. В.** О горении газа в узкой трубке // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 2. — С. 22–26.
17. **Замашиков В. В.** Экспериментальное исследование закономерностей газового горения в узких трубках // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 1. — С. 42–47.
18. **Holtappels K., Schroder V.** Explosion characteristics of hydrogen-oxygen and hydrogen-air mixture at elevated temperatures and pressures // 2nd European Hydrogen Energy Conf., November 22–25, 2005, Zaragoza, Spain. — P. 664–666.
19. **Holtappels K., Schroder V.** Explosion characteristics of hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixture at elevated pressures // Intern. Conf. on Hydrogen Safety, September 8–10, 2005, Pisa, Italy. — P. 35–47.

*Поступила в редакцию 10/VI 2011 г.,
в окончательном варианте — 21/IX 2011 г.*