

УДК 536.46

## **Горение н-бутанола в плоском миниканале\***

**В.В. Замашиков<sup>1</sup>, А.А. Коржавин<sup>1</sup>, Е.А. Чиннов<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Новосибирск*

E-mail: chinnov@itp.nsc.ru

Выполнено экспериментальное исследование горения н-бутанола при течении двухфазного потока в прямоугольном канале высотой 4 мм. Проанализированы характеристики двухфазного течения в каналах с близкой конфигурацией и определены условия, при которых возможно распространение пламени в канале. Измерены зависимости скорости распространения пламени от скорости потока газовой смеси при различном содержании в ней кислорода.

**Ключевые слова:** горение, плоский канал, двухфазное течение, пленка жидкости.

Тенденция уменьшения характерных размеров устройств в различных областях техники определяет развитие исследований гидродинамики и теплообмена в мини- и микроканалах. При уменьшении высоты плоских каналов отношение поверхности к объему канала увеличивается обратно пропорционально его минимальному поперечному размеру, что обуславливает высокую интенсивность теплообмена в микросистемах. Применительно процессам, происходящим в реагирующих системах, например, горения горючих жидкостей в каналах малого размера, увеличение интенсивности теплообмена может как улучшить, так и ухудшить ситуацию. Поэтому изучение процессов горения в таких системах важно для развития новых приложений и повышения энергоэффективности существующих технических решений. Для реализации процессов горения, в которых происходит спутное движение горючей жидкости и газа, принципиально важно иметь информацию о режимах двухфазного течения в рассматриваемых каналах. Например, необходимо предварительно знать, при каких условиях возможна реализация режима раздельного течения, который наиболее часто используется в процессе горения.

В обзоре работ по двухфазным течениям [1] показано, что режимы течения в каналах разного сечения существенным образом зависят от поперечных размеров канала. Нет детальной информации по режимам течения в плоских каналах с малой высотой. Показано, что в большинстве опубликованных работ рассматриваются относительно длинные каналы, в которых условия ввода жидкости и газа в канал не оказывают существенного влияния на структуру двухфазного потока. В таких системах длины

---

\* Работа выполнена с частичной поддержкой РФФИ (грант 13-08-00480а), ФЦП (ГК №14.516.11.0087) и СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 116).

каналов на два и более порядков превосходят их поперечные размеры. В теплообменниках на основе коротких микроканалов могут быть достигнуты достаточно малые перепады давлений. С целью уменьшения размеров устройств предпочтительно реализовать горение жидкости в коротких каналах. Несмотря на актуальность исследования двухфазных течений в коротких каналах, количество публикаций по этой теме весьма ограничено. Изучению газожидкостных течений в коротких горизонтальных миниканалах посвящены работы [2, 3]. Обнаружены новые режимы течения (прерывистый, струйный и струйно-пузырьковый), которые могут быть связаны с новыми типами неустойчивости при течении двухфазной смеси в горизонтальных прямоугольных каналах малой высоты. Определены условия существования области раздельного пленочного режима течения, который может быть использован для получения устойчивого горения в канале.

В последнее время появилось много работ, посвященных горению газообразных топлив в узких каналах различных конфигураций. Это связано с большим практическим интересом к миниатюрным источникам электроэнергии, источникам тепла и механической энергии [4], что обусловлено высокой плотностью энергии углеводородного топлива относительно традиционных аккумуляторов электроэнергии. Согласно тепловой теории [5] возможность распространения гомогенного газового пламени в узких каналах ограничена определенным размером, зависящим от давления газа и свойств горючей смеси, при размерах канала ниже критического распространение гомогенного пламени невозможно. При горении жидкости возможны два случая. Первый — когда давление насыщенных паров такое, что при смешивании с воздухом образуется горючая смесь. В этом случае волна горения распространяется по образовавшейся гомогенной горючей смеси. Второй — когда насыщенный пар образует с воздухом негорючую смесь. В этом случае волна диффузионного газового горения и тепловая волна, порожденная горением, синхронно распространяются над поверхностью жидкости. В обоих случаях также как и для гомогенного газового горения важен размер канала — является ли он больше или меньше критического.

Исследованию диффузионного горения жидкости также посвящено много работ, однако большинство из них проводилось в установках большего объема [6]. В ограниченном объеме течения имеется важная особенность диффузионного горения — невозможность неограниченной диффузии в направлении, перпендикулярном направлению потока [7]. Это может привести к улучшению смешения реагентов даже в ламинарном потоке. Количество работ, посвященных горению жидкости в узких каналах, крайне ограничено [8].

В настоящей работе исследовались пламена, распространяющиеся над поверхностью н-бутанола в миниканале с размером больше критического. Для стехиометрических углеводородоздушных смесей критический размер щели составляет порядка 2 мм [9]. Высота канала выбиралась много меньше его ширины. Это было сделано для того, чтобы по возможности создать двумерную структуру течения и фронта пламени. Данное экспериментальное исследование имело целью выявить особенности диффузионного горения стекающей пленки топлива при встречном потоке окислителя в условиях узкого плоского канала. В отличие от условий, рассмотренных в работе [10], горение осуществляется не в свободном пространстве, а в миниканале, и к тому же рассматриваемая система является термически толстой. В отличие от условий, заданных в работе [8], рассматривается не цилиндрический канал, а плоский; также имеется возможность вариации потока горючей жидкости.

Рабочий участок (рис. 1) состоит из двух параллельных кварцевых пластин, расстояние между которыми задается двумя металлическими прокладками толщиной 4 мм. В нижней пластине под углом около  $11^\circ$  сделано сопло, толщиной около 150 мкм, через которое в пространство между пластинами подавалась жидкость с помощью высокоточного перистальтического насоса. Размеры канала: длина — 270 мм, ширина — 42 мм, высота — 4 мм. Установку можно наклонять в двух плоскостях. Расход жидкости в данной серии экспериментов был равен  $(8,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ . Газовая смесь подавалась

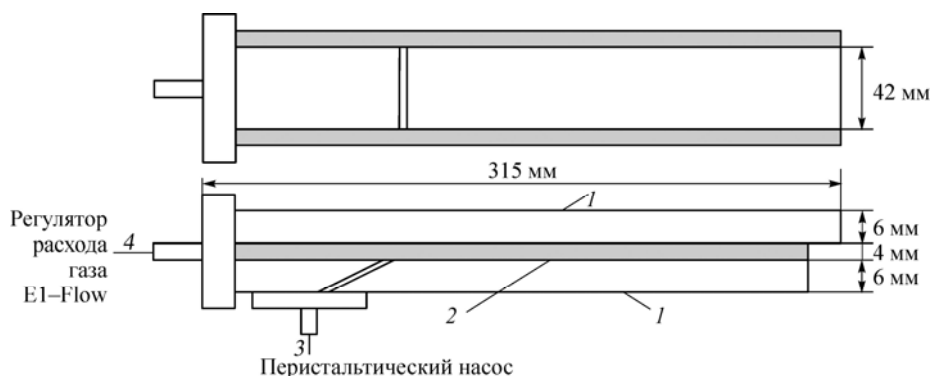


Рис. 1. Схема установки.

1 — кварцевые пластины, 2 — металлическая прокладка, 3 — перистальтический насос, 4 — регулятор расхода газа EI-Flow.

в центральную часть канала. Расход газа регулировался и поддерживался постоянным с помощью регулятора расхода EL-FLa фирмы Bronkhorst.

Анализ карты режимов течения водовоздушного потока в горизонтальном прямоугольном канале сечением  $19,05 \times 3,18$  мм [11] показал, что при малых скоростях жидкости и газа имеет место раздельное течение фаз. Зона гладкого раздельного течения, в которой может быть реализовано горение жидкости в канале, определялась следующим условием:  $U_{SG} < 0,3$  м/с,  $U_{SL} < 0,08$  м/с, где приведенные скорости газа  $U_{SG}$  и жидкости  $U_{SL}$  вычислялись как объемный расход газа или жидкости, деленный на площадь поперечного сечения канала. Данные работ [2, 3] показывают, что в коротких каналах при уменьшении их высоты зона раздельного течения сдвигается в область более высоких приведенных скоростей газа. Таким образом, были определены условия, при которых реализовывалось раздельное течение жидкости и газа для канала с размерами близкими к каналу, исследуемому в настоящей работе.

Регистрация процесса горения осуществлялась в области 3 цифровыми видео и фотокамерами. В качестве окислительной газовой смеси использовались воздух и воздух с добавками кислорода. Окислительная смесь готовилась в смесителе высокого давления по парциальным давлениям. Смесь перемешивалась и подавалась на регулятор расхода. Точность приготовления смеси — 5%. Поджиг осуществлялся открытым пламенем на выходе из канала. Для того чтобы пламя могло распространяться над поверхностью жидкости, ее уровень на выходе из канала поднимался с помощью небольшого барьера (высотой около 0,5 мм), прикрепленного к нижней пластине. После инициирования горения измерялась зависимость координаты ведущей точки фронта пламени от времени. По наклону этой зависимости определялась скорость пламени. Точность измерения скорости — 5%. Средняя толщина слоя жидкости определялась по балансу масс, и она составляла  $0,5 \pm 0,05$  мм. Горение *n*-бутанола в таком канале при использовании в качестве окислителя воздуха не удалось осуществить, поэтому в дальнейших экспериментах в воздух добавлялся кислород. Расходы окислителя и топлива были такими, что в случае испарения жидкости могла бы получиться смесь с коэффициентом избытка кислорода, лежащим в диапазоне  $a = 0,02 \div 0,24$  (при добавке 10%  $O_2$ ). Во всех экспериментах подача кислорода была ниже необходимой для стехиометрического сгорания топлива ( $a = 1$ ), поэтому кислорода не хватало для полного сгорания жидкости.

Форма фронта пламени зависит от расхода окислителя. При малых расходах пламя более плоское, но, как правило, несимметричное. При увеличении расхода окислителя фронт пламени расширяется, становится более симметричным и искривляется: центр пламени опережает его края (рис. 2). Пламя распространяется со средней постоянной скоростью, и только при больших расходах оно замедляется. При распространении пламени наблюдается относительно быстрое опережение небольшого участка пламени, а затем его выравнивание. Зависимости скорости распространения пламени от расхода

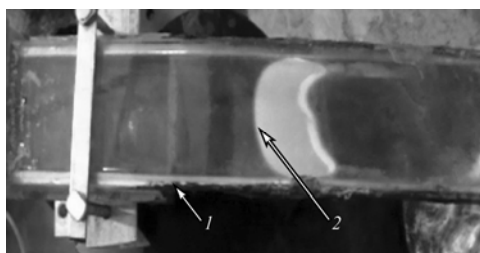


Рис. 2. Изображение пламени. Расход смеси 0 % O<sub>2</sub> + воздух —  $1,2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с.  
1 — канал, 2 — пламя.

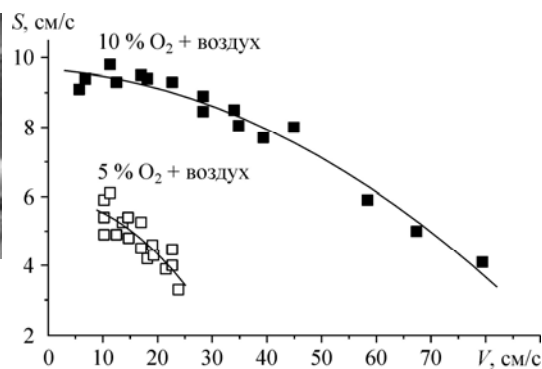


Рис. 3. Зависимости скорости распространения пламени над поверхностью н-бутанола от средней скорости газовой смеси и разных значений концентрации кислорода.

окислителя при разном содержании кислорода в смеси показаны на рис. 3. Видно, что скорость и диапазон существования пламени по расходу окислителя зависят от содержания кислорода в окислителе. Увеличение доли кислорода приводит к увеличению скорости и расширению диапазона по расходу. При увеличении расхода скорость распространения пламени уменьшается. Это согласуется с результатами, полученными в работе [8], однако в данных экспериментах величина скорости распространения пламени существенно больше. Это можно объяснить тем, что в работе [8] в качестве окислителя использовался воздух, тогда как в настоящей работе — воздух с добавками кислорода, а согласно рис. 3 скорость чувствительна к содержанию кислорода. Значения полученной в настоящей работе скорости близки к значениям, полученным в работе [6] в большом объеме. Однако в работе [6] жидкость горела в воздушной атмосфере, поэтому, если бы при проведении работы исследователи добавляли в воздух кислород, то скорости, скорей всего, различались бы при одной и той же добавке кислорода.

В заключение следует отметить, что в плоском слабонаклонном канале ( $1,3^\circ$ ) высотой 4 мм наблюдается раздельное течение жидкости и газа, и возможно распространение пламени, если в качестве окислителя использовать воздух, обогащенный кислородом. Диапазон существования пламени зависит от содержания кислорода в окислительной смеси: с увеличением доли кислорода диапазон расширяется в сторону как меньших, так и больших расходов. Скорость распространения пламени возрастает с увеличением доли кислорода в окислительной смеси.

### Список литературы

1. Чиннов Е.А., Кабов О.А. // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, № 5. С. 777–795.
2. Kabov O.A., Chinnov E.A., Cheverda V. // Micrograv. Sci. and Technol. 2007. Vol. 19, No. 3/4. P. 44–47.
3. Chinnov E.A., Guzanov V.V., Cheverda V., Markovich D.M., Kabov O.A. // Regimes of two-phase flow in short rectangular channel // Micrograv. Sci. Technol. 2009. Vol. 21, No. 1. P. 199–205.
4. Maruta K. Micro and mesoscale combustion // Proc. of the Combustion Institute. 2011. Vol. 33, No. 1. P. 125–150.
5. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения // отв. ред. Солоухин Р.И. М.: Наука, 1980. 478 с.
6. Ross H.D., Miller F.J. Detailed experiments of flame spread across deep butanol pools // Proc. of the Combustion Institute. 1996. Vol. 26. P. 1327–1334.
7. Bieri J.A., Kurdyumov V.N., Matalon M. The effect of gas expansion on edge flames stabilized in narrow channels // Proc. of the Combustion Institute. 2011. Vol. 33. P. 1227–1234.
8. Zamashchikov V.V. Flame spread across shallow pools in modulated opposed air flow in narrow tube // Combustion Sci. and Technology. 2009. Vol. 181, No 1. P. 176–189.
9. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Промышленные огнепреградители. М.: Химия, 1974. 262 с.
10. Коржавин А.А., Бунев В.А., Бабкин В.С., Намятов И.Г. Влияние начальной температуры на скорость распространения пламени над пленкой жидкого топлива на металлических подложках // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 5. С. 87–96.
11. Wambugans M.W., Jendrzejczyk J.A., France D.M. Two-phase flow patterns and transitions in a small, horizontal, rectangular channel // Int. J. Multiphase Flow. 1991. Vol. 17, No. 3. P. 327–342.

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2013 г.