

УДК 536.46

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

В. В. Замашиков<sup>1</sup>, А. А. Коржавин<sup>1</sup>, Е. А. Чиннов<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск  
albor@kinetics.nsc.ru<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Продемонстрирована возможность распространения пламени над поверхностью жидкого топлива (*n*-бутанола) при течении двухфазного потока с газообразным окислителем в узком прямоугольном канале. Приведены результаты детального экспериментального исследования горения в такой системе. Получены зависимости скорости распространения пламени от начальной температуры, скоростей потока окислителя и топлива.

Ключевые слова: горение жидкости, диффузионное горение, узкие каналы.

### ВВЕДЕНИЕ

Миниатюризация энергетических устройств — тенденция последнего времени. Это связано с большим практическим интересом к миниатюрным источникам электроэнергии, источникам тепла и механической энергии [1], что обусловлено высокой плотностью энергии углеводородного топлива относительно традиционных аккумуляторов электроэнергии. Однако возникает вопрос о том, каков предельный размер такого устройства, на сколько разумно его уменьшать с точки зрения эффективности. Если в миниатюрном устройстве происходит горение, то имеется ограничение на предельный размер, обусловленное, согласно тепловой теории, теплопотерями из зоны горения. Уменьшение размеров канала приводит к увеличению отношения площади стенок канала к его объему, что повышает интенсивность теплообмена в микросистемах. При этом если нет возврата тепла в зону химических превращений, возрастают теплопотери из фронта пламени, что приводит к гашению. Следует также отметить существенное различие процессов горения предварительно перемешанной (гомогенной) горючей газовой смеси и жидкого топлива, равновесное давление паров которого образует в воздухе концентрацию, не превышающую бедного

предела распространения пламени. В узких каналах пламя гомогенной смеси способно распространяться, только если размер канала превышает некоторое критическое значение  $d_{cr}$ , зависящее от ряда физико-химических факторов: природы топлива и окислителя, их концентрации и давления, геометрии канала. Для углеводородов критический размер щели порядка 2 мм [2, 3].

В последнее время появилось много работ, посвященных горению газообразных топлив в узких каналах разнообразных конфигураций [1]. В то же время горению жидких топлив в узких каналах уделено мало внимания [4–6]. Достаточно подробно исследовано диффузионное горение в больших объемах [7–9]. Например, в работе [10] исследовалось горелочное устройство, представляющее собой смоченную топливом пористую среду, обтекаемую окислителем. Авторы уделили особое внимание влиянию горения на пограничный слой, образующийся при обтекании пористой пластины газом. Однако процессы горения пленки жидкого топлива в узких каналах значительно отличаются как от горения горючей жидкости при наличии большого объема над ней, так и от горения над пористой пластиной, пропитанной жидким топливом.

При уменьшении объема изменяется гидродинамика газа, возрастает поток тепла из фронта горения в стенки канала, изменяется распределение концентрации топлива в смеси из-за невозможности обеспечить неограниченную диффузию в направлении, перпендикулярном поверхности жидкости [11]. Это приводит,

Работа частично поддержана грантами СО РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 116), Российского фонда фундаментальных исследований (13-08-00480а) и ФЦП (ГК14.516.11.0087).

© Замашиков В. В., Коржавин А. А., Чиннов Е. А., 2014.

с одной стороны, к улучшению смешения реагентов даже в ламинарном потоке газа над жидкостью, с другой стороны, к уменьшению скорости горения из-за возрастания теплопотерь. При наличии течения жидкости возникает вопрос о возможности раздельного течения двух фаз. При этом, так как горение реализуется не при любых скоростях газообразного окислителя, важно, чтобы раздельное течение имело место при определенных скоростях газа (окислителя).

В настоящей работе исследовались пламена, распространяющиеся над поверхностью *n*-бутанола в миниканале диаметром  $d > d_{cr}$ . Высота канала была на порядок меньше его ширины, что позволяло создавать двумерную структуру течения потоков и фронта пламени. Цель работы — исследовать особенности диффузионного горения стекающей пленки топлива при встречном по отношению к направлению распространения пламени потоке окислителя в условиях узкого плоского канала. Проводимые эксперименты отличались от [12] тем, что горение осуществлялось не в свободном пространстве, а в миниканале, и к тому же рассматриваемая система была термически толстой. В отличие от работы [5], канал был не цилиндрический, а плоский и, кроме того, можно было изменять расход горючей жидкости.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Рабочий участок состоит из двух параллельных кварцевых пластин, расстояние между ними задается двумя металлическими прокладками толщиной 4 мм. В нижней пластине под углом  $\approx 11^\circ$  сделано сопло шириной около 150 мкм, через которое в пространство между пластинами подается жидкость. Длина канала 270 мм, ширина 42 мм, высота 4 мм. Установку можно наклонять в двух плоскостях.

На рис. 1 показаны рабочий участок и схема расположения аппаратуры. Жидкость с помощью высокоточного перистальтического насоса подается в канал через плоское сопло 1. Расход жидкости в данной серии экспериментов изменялся от  $0.0140 \pm 0.0001$  до  $0.230 \pm 0.002$  мл/с. Наклон канала к горизонту устанавливался равным  $1.3 \pm 0.2^\circ$ .

В экспериментах с *n*-бутанолом наблюдалось раздельное течение фаз. Анализ имеющейся в литературе карты режимов течения, наиболее близко подходящей нашим условиям опытов, показал, что в водовоздушном потоке в го-

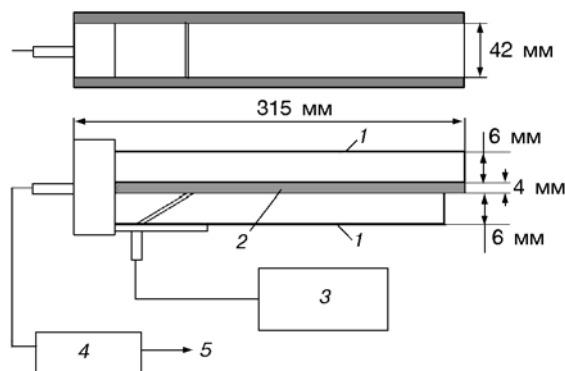


Рис. 1. Схема установки:

1 — кварцевые пластины, 2 — металлическая прокладка, 3 — перистальтический насос, 4 — регулятор расхода газа El-Flow, 5 — к газовой пульта

ризонтальном прямоугольном канале сечением  $19.05 \times 3.18$  мм [13] при малых скоростях жидкости и газа также возможно раздельное течение фаз.

Газовая смесь подавалась в центральную часть канала 2. Расход газа регулировался и поддерживался постоянным с помощью регулятора расхода El-Flow фирмы «Bronkhorst». Процесс горения регистрировался цифровыми видео- и фотокамерами. В качестве окислительной газовой смеси использовали воздух и воздух с добавкой кислорода. Окислительную смесь готовили в смесителе высокого давления по парциальным давлениям и подавали на регулятор расхода. Точность приготовления смеси — 5 %.

Топливо поджигали открытым пламенем на выходе из канала. Однако инициировать волну горения, распространяющуюся над поверхностью жидкости, не удавалось, так как жидкость на выходе из канала испарялась, затрудняя тем самым формирование волны горения. Для того чтобы пламя могло распространяться над поверхностью жидкости, ее уровень на выходе из канала поднимался с помощью небольшого барьера (высотой  $\approx 1.5$  мм), прикрепленного к краю нижней пластины. После инициирования горения измерялась зависимость координаты фронта пламени от времени. По наклону этой зависимости определялась скорость пламени. Точность измерения скорости — 5 %.

Среднюю толщину слоя жидкости  $\bar{h}$  определяли по массе жидкости, растекшейся по нижней пластине. Когда течение устанавлива-

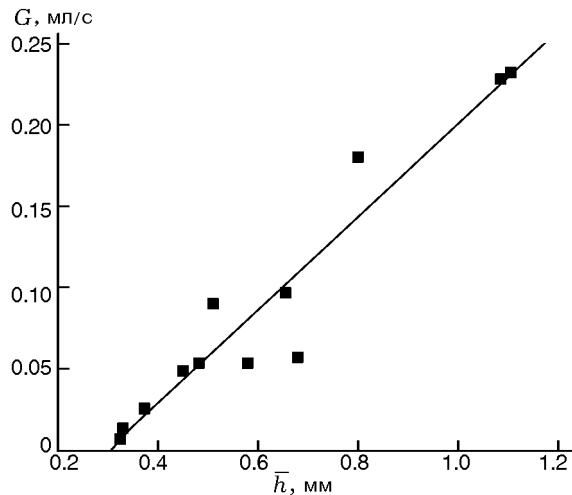


Рис. 2. Зависимость расхода жидкости от средней толщины ее слоя

лось, определяемая масса не изменялась. При этом в каждый момент времени полная масса складывалась из массы жидкости в емкости, из которой она поступала в канал, массы жидкости, растекшейся по нижней пластине, и массы жидкости в емкости, установленной на выходе из канала. Таким образом, измеряя массу жидкости в емкости, из которой она поступала в канал, и массу жидкости в емкости на выходе из канала, можно определить массу жидкости, растекшейся по нижней пластине. По этой массе определяли объем жидкости и делили его на площадь пластины. Оцененная таким образом толщина почти линейно зависит от расхода жидкости  $G$  (рис. 2). Точность определения толщины — 10 %. Прямые измерения, проведенные после удаления верхней пластины, показали, что толщина слоя увеличивается вниз по потоку жидкости. Различие ее значений в месте подачи жидкости и вблизи преграды возрастает с ростом расхода жидкости. Отметим, что при свободном течении толщина слоя жидкости одинакова, пропорциональна кубическому корню из расхода жидкости [14] и зависит от скорости газа. Расчеты, проведенные согласно [15], показали, что при максимальных расходах газовой смеси толщина пленки уменьшалась на 15 ÷ 30 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Из экспериментов известно, что если в качестве окислителя использовать воздух, то

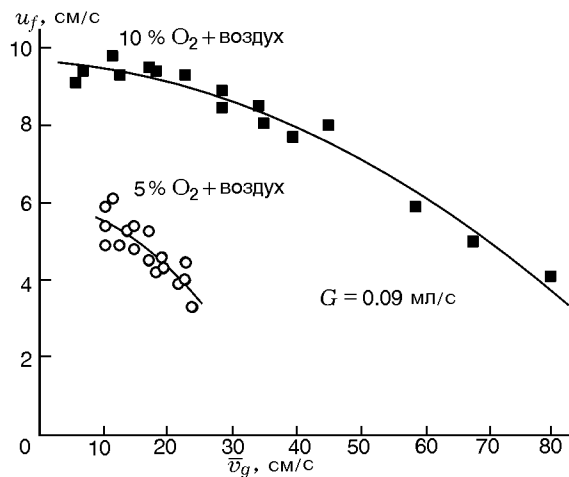


Рис. 3. Зависимость скорости пламени от средней скорости газа, содержащего разное количество кислорода

пламя будет заходить в канал и гаснуть. Для того чтобы этого не происходило, в воздух добавляют кислород. На рис. 3 показаны зависимости скорости пламени  $u_f$  от средней скорости газа  $\bar{v}_g$ , содержащего добавку 5 и 10 % кислорода. Видно, что с увеличением содержания кислорода в смеси скорость пламени возрастает.

Характер распространения пламени зависит от скорости газа, начальной температуры жидкости и ее расхода (толщины жидкого слоя). Уменьшение температуры приводит к усилению пульсаций, при этом пламя распространяется почти с постоянной средней скоростью. На рис. 4 показана зависимость частоты пульсаций от средней скорости газа. Видно, что с ростом скорости частота уменьшается, при этом уменьшается и амплитуда пульсаций. При больших скоростях пульсации исчезают. Пламя распространяется почти равномерно, слегка замедляясь. Эксперименты проведены при расходе жидкости  $G \approx 0.2$  мл/с (средняя толщина слоя около 0.98 мм). Отметим, что при нормальных условиях и достаточно большом свободном пространстве, заполненном воздухом, пламя над *n*-бутанолом распространяется в пульсационном режиме [7, 8]. Уменьшение расхода жидкости приводит к более равномерному распространению пламени в большем диапазоне расходов газа.

При небольшой скорости газа пламя бледно-синее, тонкое, часто несимметричное. С увеличением скорости газа яркость пламени

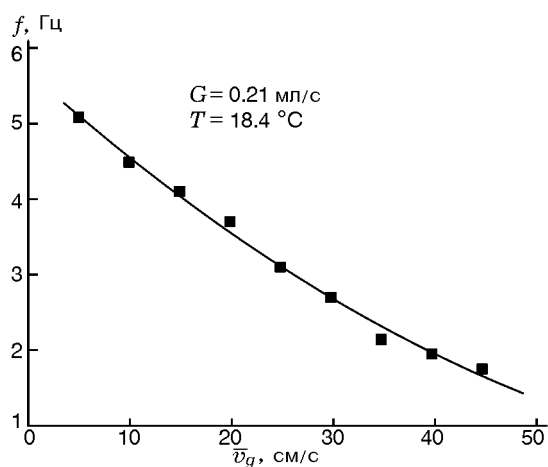


Рис. 4. Зависимость характерной частоты пульсаций пламени от средней скорости газа (10 %  $O_2$  + воздух)

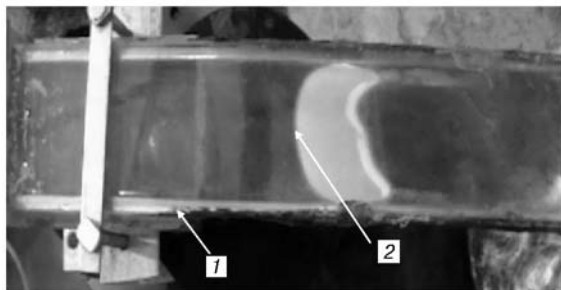


Рис. 5. Изображение пламени: расход смеси 10 %  $O_2$  + воздух —  $1.2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ; 1 — канал, 2 — пламя

возрастает, оно становится длиннее и симметричнее (рис. 5). Уширение пламени можно объяснить его вытягиванием вдоль потока газа.

Температура окружающей среды оказывает влияние на горение жидкости. На рис. 6 показаны зависимости скорости пламени от средней скорости газа при разных температурах. С ростом температуры скорость пламени увеличивается. При снижении температуры зависимость скорости пламени от скорости газа ослабевает. Причем, как и в [5], наибольшая чувствительность скорости к температуре появляется при небольших расходах.

Эксперименты показали, что описанный выше режим распространения пламени наблюдается в ограниченном диапазоне расходов газа. При расходах меньше 0.3 л/мин пламя гаснет (нижний предел по расходу). При некото-

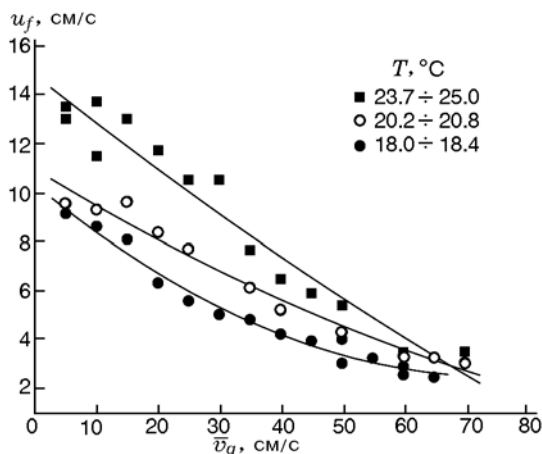


Рис. 6. Зависимость скорости пламени от средней скорости газа (10 %  $O_2$  + воздух) при различных температурах

ром большом значении скорости газа характер распространения пламени изменяется. Чаще всего пламя на каком-то участке останавливается, но на других участках продолжает двигаться против потока, а затем и на участке остановки продвигается вперед. Таким образом, площадь пламени значительно возрастает, симметрия нарушается — это верхний предел изучаемого нами режима горения.

Варьирование расхода жидкости приводит к изменению толщины ее пленки. Это позволяет получить зависимость скорости пламени от средней толщины. Эти зависимости представлены на рис. 7,а. Видно, что при небольших скоростях газа и уменьшении расхода жидкости скорость распространения пламени падает, тогда как при больших скоростях почти не изменяется. Кроме того, при больших расходах жидкости скорость пламени существенно уменьшается по мере роста скорости газа, тогда как при малых расходах эта зависимость становится слабее.

Рис. 7,б демонстрирует незначительное изменение скорости пламени при изменении расхода жидкости, если эти расходы невелики. Видно, что при приближении к нижнему пределу по скорости окислителя скорость пламени сильно падает при расходе жидкости 0.026 мл/с.

Отметим достаточно большой разброс экспериментальных данных. Это может быть следствием двух причин: изменение температуры в ходе эксперимента, попадание воды, об-

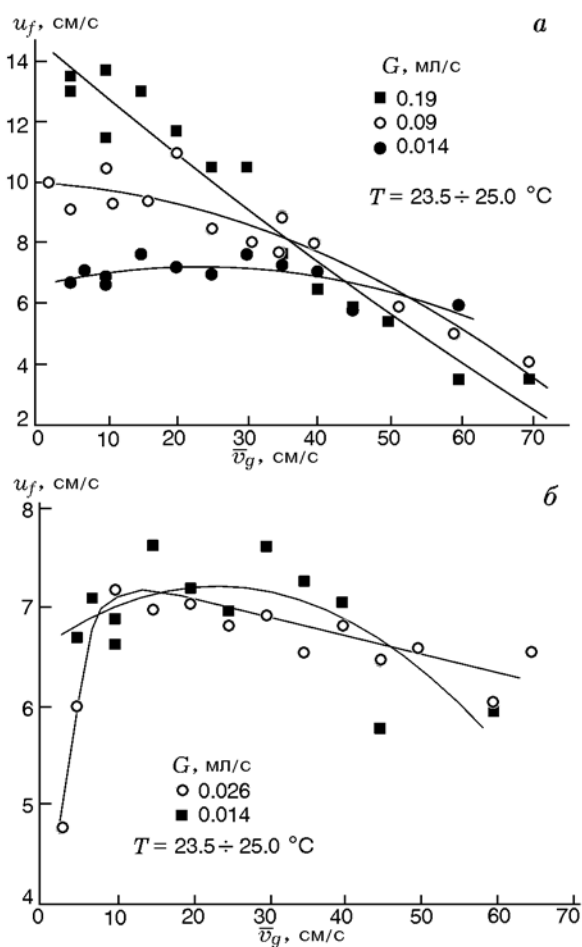


Рис. 7. Зависимость скорости пламени от средней скорости газа (10 %  $O_2$  + воздух) при различных расходах жидкости

разующейся при горении, в жидкость. При повышении температуры скорость пламени возрастает (см. рис. 6). Попадание воды, образующейся при горении, в *n*-бутанол, по-видимому, должно снижать скорость. Кроме того, степень просачивания бутанола через трещины в термостойком герметике, который использовался для герметизации зазоров между горизонтальными и вертикальными стенками канала, может зависеть от расхода жидкости и приводить к изменению толщины жидкого слоя, и в свою очередь, к изменению скорости пламени.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Насыщенный пар *n*-бутанола при температуре окружающей среды, при которой проводились эксперименты, образует с воздухом

бедную негорючую смесь. Чтобы распространение пламени над *n*-бутанолом стало возможным, необходимо нагреть жидкость. Механизм распространения пламени заключается в том, что продукты горения, которые образуются во фронте пламени, находящемся над поверхностью жидкости, прогревают жидкость и поток тепла поступает по жидкости в область перед фронтом пламени, в результате чего возрастает поток паров жидкости в газовую фазу. Предположительно основным механизмом передачи тепла по жидкости является капиллярный конвективный перенос за счет снижения коэффициента поверхностного натяжения с ростом температуры. Средняя скорость движения жидкости, оцененная по расходу и средней толщине пленки ( $0.6 \div 0.15$  см/с), много меньше скорости распространения пламени ( $4 \div 14$  см/с), поэтому с хорошей точностью можно считать, что пламя распространяется по покоящейся жидкости. Влияние средней скорости движения жидкости на горение обусловлено в первую очередь изменением толщины жидкой пленки. Отметим, что наличие механизма передачи тепла в жидкость, находящуюся перед пламенем, является определяющим условием для распространения пламени в отличие от случая, когда пламя стабилизируется в горелочном устройстве (см., например, [10]).

Так как распространение пламени происходит в ограниченном пространстве, оно возможно только при подаче окислителя, т. е. должен быть нижний предел по скорости окислителя (см. рис. 7, б). Наличие потока окислителя является дополнительным фактором, влияющим на распространение пламени. Горение зависит от характера течения окислителя, а течение — от числа Рейнольдса  $Re$ . В наших условиях для вдуваемого газа  $Re < 100$ , поэтому течение газа во всем канале можно считать ламинарным, на это указывают также визуальные наблюдения во всем диапазоне расходов газа.

С увеличением скорости газа скорость распространения пламени уменьшается, при этом поверхность пламени увеличивается и возрастает его яркость. Последнее свидетельствует о росте массовой скорости сгорания вследствие большего прогрева жидкости продуктами горения. Скорость пламени определяется скоростью набегающего на него газа и скоростью сгорания образующейся горючей смеси. Уменьшение скорости пламени с увеличе-

нием скорости набегающего газа указывает на то, что возрастание скорости сгорания за счет увеличения скорости газа не компенсирует возросшую скорость газа.

Ранее было показано (см., например, [7]), что при распространении пламени над жидкостью в ней образуются характерные слои, в которых происходят движение и прогрев жидкости. В наших экспериментах высота слоя жидкости была меньше характерной толщины этих слоев [5], поэтому высота жидкости могла влиять на распространение пламени. Из-за малости высоты существенным является поток тепла в нижнюю пластину, и он может зависеть от толщины жидкости. Кроме того, перетекание жидкости за счет поверхностных сил также зависит от этого параметра. Возможно, с этим связана такая сложная зависимость скорости пламени от средней скорости газа при изменении толщины жидкости, а именно уменьшение зависимости скорости пламени от скорости газа (см. рис. 7,а) с уменьшением расхода жидкости.

Отметим, что так как поток тепла по жидкости зависит от скорости окислителя, то чем больше этот поток, тем менее чувствительной к температуре окружающей среды (начальной температуре) должна быть скорость пламени, что и наблюдалось в эксперименте (см. рис. 6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что существует нижний предел по скорости окислителя для распространения пламени над горючей жидкостью в узком канале. При больших скоростях пламя способно распространяться над жидкостью. Измерения показали, что скорость пламени при этом зависит от температуры, скорости окислителя и толщины слоя жидкости. Увеличение средней скорости окислителя приводит к увеличению яркости, длины пламени и снижению его скорости. Уменьшение толщины слоя жидкости ослабляет зависимость скорости пламени от средней скорости окислителя. При больших скоростях окислителя зависимость скорости пламени от толщины слоя также ослабевает. Увеличение начальной температуры жидкости вызывает возрастание скорости пламени, особенно заметное при малых скоростях окислителя.

При больших скоростях окислителя, когда скорость пламени существенно замедляется, характер распространения пламени ста-

новится иным: пламя движется неравномерно, поскольку существенно меняется его поверхность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Maruta K.** Micro and mesoscale combustion // Proc. Combust. Inst. — 2011. — V. 33, iss. 1. — P. 125–150.
2. **Розловский А. И.** Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. — М.: Химия, 1980.
3. **Основы** горения углеводородных топлив: пер. с англ. / под ред. Л. Н. Хитрина и В. А. Попова. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
4. **Заматицкий В. В.** Распространение пламени над поверхностью жидкости в канале ограниченного сечения в условиях набегающего потока воздуха // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 1. — С. 29–34.
5. **Zamashchikov V. V.** Flame spread across shallow pools in modulated opposed air flow in narrow tube // Combust. Sci. Technol. — 2009. — V. 181, N 1. — P. 176–189.
6. **Phan T. K., Dunn-Rankin D., Sirignano W. A.** Flame structure in small-scale liquid film combustors // Proc. Combust. Inst. — 2007. — V. 31. — P. 3269–3275.
7. **Ross H. D., Miller F. J.** Detailed experiments of flame spread across deep butanol pools // Proc. Combust. Inst. — 1996. — V. 26. — P. 1327–1334.
8. **Ross H. D., Miller F. J.** Flame spread across liquid pools with very low-speed opposed or concurrent airflow // Proc. Combust. Inst. — 1998. — V. 27. — P. 2723–2729.
9. **Schiller D. N., Sirignano W. A.** Opposed-flow flame spread across *n*-propanol pools // Proc. Combust. Inst. — 1996. — V. 26. — P. 1319–1325.
10. **Бояршинов Б. Ф., Волчков Э. П., Терехов В. И.** Структура пограничного слоя со вдувом и горением этанола // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 3. — С. 29–36.
11. **Bieri J. A., Kurdyumov V. N., Matalon M.** The effect of gas expansion on edge flames stabilized in narrow channels // Proc. Combust. Inst. — 2011. — V. 33. — P. 1227–1234.
12. **Коржавин А. А., Бунев В. А., Бабкин В. С., Намятов И. Г.** Влияние начальной температуры на скорость распространения пламени над пленкой топлива на металлической подложке // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 5. — С. 87–96.
13. **Wambuganss M. W., Jendzejczyk J. A., France D. M.** Two-phase flow patterns and transitions in a small, horizontal, rectangular channel // Intern. J. Multiphase Flow. — 1991. — V. 17, N 3. — P. 327–342.
14. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Гидродинамика. — М: Наука, 1988. — Т. 6.

15. **Kabov O. A., Lyulin Yu. V., Marchuk I. V., Zaitsev D. V.** Locally heated annular liquid films in microchannels and minichannels // ECI Intern.

Conf. on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale Castelvechio Pascoli, September 25–30 2005. — (Keynote Lecture).

*Поступила в редакцию 29/VII 2013 г.,  
в окончательном варианте — 2/XII 2013 г.*

---