

УДК 536.46

## О МЕХАНИЗМЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ГОРЮЧЕЙ ЖИДКОСТИ

В. В. Замашников

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

Исследовалось горение паров горючей жидкости, температура которой ниже температуры вспышки. В этом случае пламя распространяется вдоль поверхности жидкости вследствие ее нагрева продуктами горения. Были измерены скорости окислителя, движущегося навстречу пламени, которое распространялось со скоростями, сравнимыми с нормальной скоростью предварительно перемешанных углеводородных пламен. Измерения показали, что течение газа — ламинарное. Установлена корреляция между температурой вспышки горючей жидкости и скоростью распространения пламени. На основе полученных данных сделано предположение, что основной механизм образования горючей смеси перед фронтом горения — диффузионный.

Ключевые слова: диффузионное горение, температура вспышки, горючая жидкость, контролируемое жидкой фазой распространение пламени.

DOI 10.15372/FGV20200602

### ВВЕДЕНИЕ

Горение горючих жидкостей широко используется в повседневной жизни. При этом, как правило, основные химические превращения происходят в газовой фазе после смешения окислителя с парами жидкости. Режим горения и сама возможность этого процесса зависят от концентрации паров в полученной смеси. Важным является случай, когда образуется однородная смесь воздуха и паров с парциальным давлением, равным давлению насыщенного пара, которое зависит от температуры жидкости. При этом по смеси после иницирования волна горения может как распространяться, так и нет. Однако во втором случае возможно распространение вдоль поверхности жидкости (контролируемое жидкой фазой распространение пламени) благодаря прогреву жидкости продуктами горения. Согласно [1, 2] при определенных условиях сначала распространяется предвестник (т. е. контролируемое жидкой фазой распространение пламени), а затем устанавливается основное пламя над поверхностью жидкости (это становится возможным из-за прогрева последней продуктами горения). В узком канале после иницирования горения на срезе устанавливается диффузионное пламя, и от него отделяется пламя, которое распространяется по каналу [3]. В [3] по-

казано, что это происходит, только если расход окислителя, движущегося навстречу пламени, больше определенного значения, а скорость пламени сильно зависит от расхода окислителя.

Важным является вопрос о механизме распространения пламени в случае, когда давление насыщенных паров меньше парциального давления топлива, соответствующего нижнему концентрационному пределу. Для распространения пламени необходимо, чтобы горючая смесь образовывалась перед фронтом горения. При начальной температуре жидкости ее паров недостаточно для образования горючей смеси. Однако пары могут поступать в предпламенную область из области, находящейся за пламенем, где их много вследствие нагрева жидкости продуктами. Кроме того, вдоль поверхности жидкости возникает градиент температуры, который приводит к возникновению потока тепла по жидкости в предпламенную область, причем поток может быть не только кондуктивным, но и конвективным вследствие движения жидкости. Нагрев жидкости перед фронтом горения приводит к увеличению концентрации топлива в газовой смеси в этой области.

При низких скоростях распространения пламени (менее  $\approx 30$  см/с) конвективный теплоперенос играет большую роль. Так, в [4, 5] авторы наблюдали образование волны на поверх-

ности жидкости перед фронтом пламени с вихревым течением жидкости. При этом скорость пламени периодически изменялась (пульсационный режим), но ее среднее значение оставалось постоянным. В качестве окислителя использовался воздух. В [6] путем численного моделирования получены условия перехода из пульсационного режима в равномерный. Задача решалась при наличии встречного потока воздуха. Корреляцию между образованием вихря перед фронтом пламени и изменением скорости пламени наблюдали в [7, 8]. Образование вихря, согласно [7–10], связано с нескомпенсированными капиллярными силами, возникающими из-за градиента температуры вдоль поверхности жидкости (эффект Марангони). Нагретая продуктами горения жидкость переносится в предпламенную область [11–13], что приводит к увеличению потока паров в газовую фазу. Таким образом, в жидкости вместе с пламенем перемещаются тепловая и гидродинамическая волны. Их характерный размер зависит от скорости пламени.

В [14] проводились эксперименты при наличии встречного потока окислителя. Использование в качестве окислителя воздуха, обогащенного кислородом, позволило изменять скорость пламени в широком диапазоне. При использовании кислорода в качестве окислителя скорости пламени оказались сравнимыми с нормальными скоростями для углеводородокислородных смесей ( $<1$  м/с). Согласно [14] с увеличением скорости пламени характерный размер тепловой волны уменьшается, а приведенные в [14] оценки показали, что массоперенос, порожденный капиллярными силами, в этом случае маловероятен. В связи с этим вопрос о механизме распространения диффузионного пламени при высоких скоростях является актуальным. Эксперименты, выполненные в данной работе, направлены на выяснение этого механизма.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводились в горизонтальном прямоугольном канале шириной 4 мм, высотой 42 мм. Боковые стенки изготавливались из кварцевых пластин. Схема установки приведена на рис. 1. Окислитель подавался через закрытый конец. В качестве окислителя использовался воздух, обогащенный кислородом. Смесь воздуха с кислородом конвективно перемешивалась в смесителе с точностью пригото-

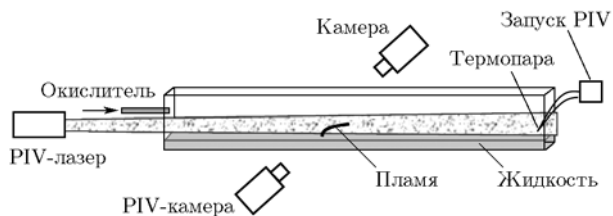


Рис. 1. Схема установки

ления 0.6 %. Расход окислителя регулировался и контролировался с помощью Smart Trak 2 Sierra Instruments и составлял в экспериментах 1 л/мин. Горючая жидкость наливалась на дно канала. Горение инициировалось через открытый конец. Для измерения профиля скорости газа использовался метод PIV (Polis Company SigmaPro). Лазерный луч PIV поступал в канал через окно в его закрытом конце. Частицы  $TiO_2$  размером порядка 2 мкм добавлялись в окислитель. Свет, рассеянный частицами, регистрировался видеокамерой. Вторая скоростная видеокамера регистрировала самосвечение пламени. У открытого конца устанавливалась термопара, по ее сигналу осуществлялся запуск PIV-аппаратуры и скоростной видеокамеры. Скорость пламени измерялась с точностью 7 %. Точность измерения скорости газа — 10 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из-за нагрева жидкости продуктами горения вдоль ее поверхности возникает градиент температуры. В результате образуется поток тепла в предпламенную область. В [6–8] авторы считали, что основным механизмом теплопереноса является капиллярный, т. е. передача тепла благодаря силам поверхностного натяжения. Однако в соответствии с оценками [14] этот механизм маловероятен при высоких скоростях пламени. Для того чтобы проверить это, в настоящей работе были проведены эксперименты с горючими жидкостями различной динамической вязкости. Очевидно, что перенос массы, обусловленный капиллярными силами, зависит от вязкости жидкости. Данные для используемых в эксперименте горючих жидкостей приведены в таблице. В качестве окислителя использовался кислород. Из таблицы видно, что вязкость *n*-бутанола почти в три раза больше, чем у декана, при этом скорость пламени также больше. Если предположить, что массоперенос обусловлен капиллярными силами, то скорость с увеличением вяз-

Вещество	Формула	Вязкость при 20 °С, кг/(м·с)	Скорость пламени, м/с	Температура вспышки, °С
<i>n</i> -Бутанол	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH	2.95 · 10 <sup>-3</sup> [15]	2.35	35 [16]
Декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	0.907 · 10 <sup>-3</sup> [15]	1.47	47 [16]
Додекан	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	1.492 · 10 <sup>-3</sup> [15]	0.80	77 [16]
Глицерин	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1.48 [15]	0.02	198 [16]
Амиловый спирт	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> OH	4.1 · 10 <sup>-3</sup> [17]	1.29	48 [16]
Муравьиная кислота	HCOOH	1.6 · 10 <sup>-3</sup> (25 °С) [17]	0.027	60 [16]

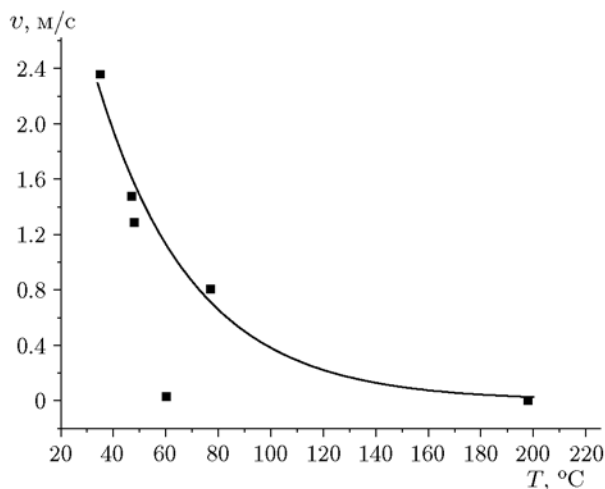


Рис. 2. Зависимость скорости пламени от температуры вспышки

кости должна уменьшаться. Зависимость скорости от вязкости не наблюдается, в то время как зависимость от температуры вспышки прослеживается четко. Эта зависимость показана на рис. 2. Видно, что с увеличением температуры вспышки скорость пламени уменьшается. Исключение составила муравьиная кислота, что может быть объяснено ее взаимодействием со стенками канала. Полученная зависимость указывает на то, что температура вспышки является ключевым параметром в механизме распространения пламени.

Если предположить, что перед фронтом пламени жидкость прогревается, то для образования горючей смеси в этой области недостаточно увеличения потока паров из жидкости в газовую фазу. Пары должны еще перемешаться с окислителем. Так как скорость пламени достаточно велика, смешение должно происходить быстро. Оно может существенно ускориться, если перед волной горения образуется вихревое движение газа. Формирова-

ние таких вихрей рассматривалось в работе [9]. Для того чтобы определить режим течения газа, измеряли его скорость перед фронтом горения. В качестве горючей жидкости использовался *n*-бутанол. Одновременно со скоростью газа измерялась скорость пламени с помощью скоростной видеокамеры, регистрирующей самосвечение пламени. Система PIV позволяет получать двумерные профили скорости движения газа. При этом видеокамера регистрировала не только лазерный свет, рассеянный частицами TiO<sub>2</sub>, добавленными в окислитель, но и рассеянный продуктами горения там, где этих частиц нет. Наложение изображения пламени, полученное скоростной видеокамерой, на изображение рассеянного продуктами горения лазерного света выявило совпадение контуров фронта пламени и светящихся (из-за рассеянного лазерного света) продуктов горения. Анализ изображений показал, что вблизи фронта пламени нет частиц TiO<sub>2</sub>.

На рис. 3 представлен результат наложения изображений пламени и рассеянного лазерного света на двумерный профиль скорости газа. При достаточно высоких скоростях пламени вихревое движение газа перед фронтом не наблюдается. Правда, в непосредственной близости от фронта нет добавленных в газ частиц, поэтому здесь скорость не определялась. Однако эта область небольшая, и маловероятно, что в ней имеет место вихревое движение газа, исходя из его вязкости.

Возможны две причины значительного уменьшения концентрации частиц, добавленных в окислитель, в непосредственной близости к фронту пламени. Когда окислитель нагревается, он расширяется и концентрация частиц уменьшается. Кроме того, концентрация частиц падает от максимального значения в окислителе до нуля за фронтом горения, где продукты горения смешиваются с парами жид-

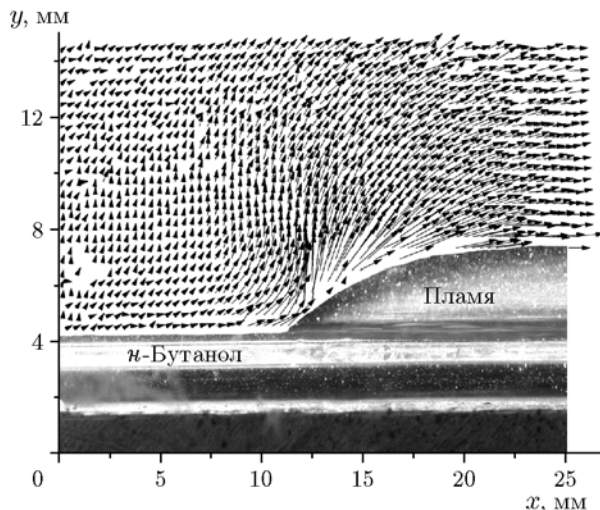


Рис. 3. Результат наложения изображений пламени и рассеянного лазерного света на двумерный профиль скорости газа:

окислитель — 60 %  $O_2$  + воздух; скорость пламени — 60 см/с

кости. Если перед пламенем находится только нагретый окислитель, пламя погаснет, так как для поддержания горения необходимо наличие горючей смеси. Таким образом, уменьшение концентрации частиц в непосредственной близости к фронту, наличие горючей смеси и отсутствие вихревого движения газа в этой области говорят о том, что образование горючей смеси происходит вследствие диффузии топлива и окислителя навстречу друг другу.

Изучение полученных изображений показало, что в окислителе концентрация частиц  $TiO_2$  также уменьшается у поверхности жидкости, при этом их концентрация еще больше падает вблизи поверхности у фронта горения. Это можно объяснить нагревом приповерхностного слоя жидкости вблизи фронта и, как следствие, увеличением потока паров из него. Расстояние между пламенем и поверхностью жидкости определяется двумя факторами, а именно тепловым потоком из фронта горения в жидкость и отсутствием горючей смеси. При скорости пламени  $v = 1$  м/с характерная толщина прогреваемого слоя жидкости составляет  $\chi/v \approx (8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с})/(100 \text{ см/с}) = 8 \cdot 10^{-6}$  см. То есть тепловая волна, движущаяся по жидкости, должна опережать волну горения очень незначительно. Однако частицы исчезают вблизи наиболее выступающей вперед части фронта пламени на гораздо большем рас-

стоянии. Этому можно найти объяснение, если предположить наличие радиационного нагрева, т. е. свет, излучаемый горячими продуктами горения, поглощается жидкостью, нагревая ее перед волной горения. Для выяснения этого вопроса требуются дальнейшие исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что скорость пламени не зависит от вязкости горючей жидкости, но зависит от температуры вспышки, что указывает на то, что тепло- и массоперенос капиллярными силами при достаточно высоких скоростях пламени не происходит. При этом приповерхностный слой жидкости перед фронтом горения даже при достаточно высоких скоростях пламени прогревается. Полученные двумерные профили скорости окислителя показали, что течение газа является ламинарным, т. е. вихревое движение перед фронтом горения отсутствует, что указывает на то, что, скорее всего, основным механизмом образования горючей смеси перед фронтом пламени является диффузия паров топлива и кислорода навстречу друг другу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Li M., Lu S., Chen R., Guo J., Wang C. Experimental investigation on flame spread over diesel fuel near sea level and at high altitude // *Fuel*. — 2016. — V. 184. — P. 665–671. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.060>.
2. Ji J., Lin S., Zhao C., Li K., Gao Z. Experimental study on initial temperature influence on flame spread characteristics of diesel and gasoline-diesel blends // *Fuel*. — 2016. — V. 178. — P. 283–289. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.072>.
3. Замащиков В. В., Коржавин А. А., Чиннов Е. А. Исследование горения жидкого топлива в прямоугольном канале // *Физика горения и взрыва*. — 2014. — Т. 50, № 4. — С. 15–21.
4. 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. — <http://dx.doi.org/10.1080/00102200802424484>.
5. Замащиков В. В. Влияние модуляции скорости набегающего газа на скорость распространения пламени над поверхностью жидкости // *Физика горения и взрыва*. — 2009. — Т. 45, № 1. — С. 11–17.
6. Kim I., Sirignano W. A. Computational study of opposed-force-flow flame spread across

- propanol pools // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 132, N 4. — P. 611–627. — [http://dx.doi.org/10.1016/s0010-2180\(02\)00506-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0010-2180(02)00506-0).
7. **Ross H. D., Miller F. J.** Detailed experiments of flame spread across deep butanol pools // *Symp. (Int.) Combust.* — 1996. — V. 26, N 1. — P. 1327–1334. — [http://dx.doi.org/10.1016/s0082-0784\(96\)80351-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0082-0784(96)80351-1).
  8. **Ross H. D., Miller F. J.** Flame spread across liquid pools with very low-speed opposed or concurrent airflow // *Symp. (Int.) Combust.* — 1998. — V. 27, N 2. — P. 2723–2729. — [http://dx.doi.org/10.1016/S0082-0784\(98\)80128-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80128-8).
  9. **Li M., Wang C., Li Z., Yang S., Fukumoto K., Fan C.** Combustion and flame spreading characteristics of diesel fuel with forced air flows // *Fuel.* — 2018. — V. 216. — P. 390–397. — <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.100>.
  10. **Li M., Lu S., Chen R., Wang C.** Pulsating behaviors of flame spread across n-butanol fuel surface // *Appl. Therm. Eng.* — 2017. — V. 112. — P. 1445–1451. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.001>.
  11. **Degroote E., García-Ybarra P. L.** Flame propagation over liquid alcohols. Part III. Pulsating regime // *J. Therm. Anal. Calorim.* — 2005. — V. 80, N 3. — P. 555–558. — <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-005-0693-7>.
  12. **Degroote E., García-Ybarra P. L.** Flame propagation over liquid alcohols. Part II. Steady propagation regimes // *J. Therm. Anal. Calorim.* — 2005. — V. 80, N 3. — P. 549–553. — <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-005-0692-8>.
  13. **Degroote E., García-Ybarra P. L.** Flame propagation over liquid alcohols. Part I. Experimental results // *J. Therm. Anal. Calorim.* — 2005. — V. 80, N 3. — P. 541–548. — <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-005-0735-1>.
  14. **Zamashchikov V. V., Korzhavin A. A., Chinnov E. A.** Combustion of liquid fuel in the flat micro- and minichannels // *Int. J. Heat Mass Transfer.* — 2016. — V. 102. — P. 470–478. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.043>.
  15. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972.
  16. **Пожаровзрывоопасность** веществ и материалов и средства их тушения: справочник в 2 т. / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко и др. — М.: Химия, 1990.
  17. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/>.

*Поступила в редакцию 19.09.2019.*

*После доработки 04.10.2019.*

*Принята к публикации 24.12.2019.*