

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ ОГРАНИЧЕННОГО СЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУХА

В. В. Замащиков

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

Экспериментально исследовано распространение волны горения над «мелкой» горячей жидкостью (*n*-бутанол) при обтекании потоком воздуха. Пламена распространялись с пульсациями, амплитуда которых зависела от скорости набегающего газа. Получены зависимости средней скорости пламени от температуры и скорости набегающего газа. Оказалось, что в пределах экспериментальной ошибки средняя скорость не зависит от глубины жидкости перед пламенем.

Ключевые слова: пламя над жидкостью, горение в узком канале, термически тонкие и толстые системы.

ВВЕДЕНИЕ

Пламя может распространяться над жидкостью, даже если температура жидкости ниже температуры вспышки, когда паровоздушная смесь, которая может образоваться над жидкостью, неспособна гореть, т. е. концентрация топлива в смеси меньше концентрации топлива на нижнем концентрационном пределе. Такой механизм распространения пламени описан в [1]. Для поддержания горения необходимо, чтобы жидкость перед фронтом прогревалась так, чтобы ее пары, перемешиваясь с воздухом, образовывали горючую смесь. Это возможно, потому что температура газа во фронте пламени значительно увеличивается и, благодаря теплообмену между нагретым газом и жидкостью, температура последней повышается. Авторы работы [1] считают, что основной механизм передачи тепла по жидкости — термокапиллярный. Коэффициент поверхностного натяжения жидкости обычно уменьшается с ростом температуры. Градиент температуры на поверхности жидкости приводит к изменению коэффициента поверхностного натяжения. За счет этого возникает течение жидкости в область, где поверхностное натяжение больше. Таким образом, возникает перенос тепла в холодную часть жидкости и ее температура перед пламенем повышается.

Эксперименты показали, что возможны два режима распространения пламени: равно-

мерный и пульсационный [1]. В предлагаемом в работе [2] механизме возникновения пульсационного режима большую роль, по мнению авторов, играют эффекты всплытия в жидкой фазе перед пламенем, обусловленные градиентом температуры. Для подтверждения своей гипотезы авторы сравнивали пламена, распространяющиеся в условиях невесомости, с пламенами, распространяющимися при обычных условиях. В [3, 4] показано, что пульсационный режим может возникать и в условиях микрогравитации, при этом механизм его возникновения отличается от механизма возникновения пульсаций при нормальных условиях. Работа [5] посвящена более детальному изучению механизма возникновения пульсаций. Авторы утверждают, что существует два вида пульсаций: главные и субпульсации. При создании модели, описывающей эти пульсации, они учитывали гравитацию, поверхностное натяжение и вязкость.

Перед передним краем пламени возникают слои жидкости, в которых изменяется температура и наблюдается движение жидкости [1–6]. В зависимости от глубины слоя жидкости различают два предельных случая: глубина жидкости больше (глубокая жидкость) и меньше (мелкая жидкость) толщины этих слоев [1–5]. В работе [6] измерены толщины этих слоев для *n*-бутанола и *n*-пропанола при различных температурах. Еще одним важным параметром, от которого может зависеть поведение волны горения, распространяющейся над жидкостью, является поток воздуха над жидкостью. Большинство экспериментов проводилось без обу-

Работа выполнена при частичной поддержке междисциплинарного гранта Сибирского отделения РАН (грант № 111, 2006 г.).

ва воздухом. Воздух принудительно подавался в работах [2, 6]. Авторы [2] исследовали гребную жидкость и меняли скорость обдува от 5 до 30 см/с, при этом конфигурация установки была такой, что средняя скорость пламени не зависела от скорости воздуха. Влияние воздушного потока на распространение пламени над мелкой жидкостью теоретически изучалось в работе [7]. Во всех этих работах стенка либо не оказывала влияния на горение, либо играла роль термостата, поглощающего тепло из жидкости и газа. Однако при определенных условиях из-за прогрева стенки продуктами горения может возникнуть обратный поток тепла от стенки в жидкость и благодаря этому температура жидкости перед фронтом пламени будет повышаться. То есть изменится механизм передачи тепла от горячего газа в жидкость. Случай, когда именно такой механизм является определяющим, изучался в работах [8–10], где исследовалось горение тонких пленок жидкости на тонких подложках.

Цель настоящей работы — получить экспериментальные зависимости средней скорости пламени, распространяющегося над мелкой жидкостью, от встречного потока воздуха. Эксперименты проводились в узкой тонкостенной трубке. В таких условиях тепловой поток по стенке трубки может оказывать заметное влияние на распространение пламени.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводились в горизонтальной кварцевой трубке длиной 1 м (рис. 1). Внешний диаметр трубки около 11 мм, толщина стенки 1 мм. Обычно [2, 6] эксперименты проводятся в прямоугольных каналах. Среди преимуществ прямоугольного канала по сравнению с круглым можно назвать одномерность и возможность получения более качественного оптического изображения. Однако при уменьшении размеров эти преимущества нивелируются, поскольку возрастает влияние боковой стенки, и задача становится двухмерной. Из-за поверхностного натяжения жидкость поднимается

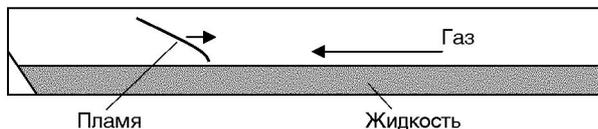


Рис. 1. Схема установки

по боковой поверхности, что приводит к искажению оптического изображения. Это имеет место и в круглых, и в прямоугольных каналах, а так как в узких каналах это одна из главных причин искажения изображения поверхности жидкости, то плоская боковая стенка не дает большего преимущества по сравнению с круглой. К недостаткам круглых трубок следует отнести зависимость ширины поверхности жидкости от количества залитой жидкости и перемненную глубину жидкости (уменьшается по направлению от центра к стенке).

В качестве горючей жидкости использовался бутанол-1 (температура вспышки 35 °С [11]). Один конец трубки соединялся с системой подачи воздуха. В нижней части другого конца трубки имелась небольшая преграда, препятствующая вытеканию жидкости из трубки. Иницирование волны горения осуществлялось через полуоткрытый конец. Эксперименты проводились следующим образом. Через полуоткрытый конец заливался бутанол-1. Трубка выравнивалась в горизонтальном положении, после чего подавался воздух. Его расход контролировался поплавковым расходомером. Поскольку температура окружающей среды, а значит, и температура жидкости были ниже температуры вспышки (35 °С), то паровоздушная смесь, выходящая из трубки, не воспламенялась. Однако так как преграда, за которой находилась жидкость, располагалась рядом с концом трубки, то, прогревая жидкость, удавалось зажечь факел на срезе трубы. Для того чтобы переместить пламя внутрь трубки, небольшой участок трубки рядом с факелом прогревался (не до кипения жидкости). Прогрев жидкости и уменьшение расхода воздуха позволяли переместить пламя внутрь трубки. Затем устанавливался нужный расход, и видеокамерой VM-7380E (25 кадр/с) регистрировалась распространяющаяся волна горения. Полученные записи оцифровывались. Для того чтобы сократить участок, на котором менялся состав паровоздушной смеси при ее перемещении вдоль поверхности жидкости, воздух перед входом в трубку пропускался через бутанол-1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пламя во всех экспериментах распространялось с пульсациями. Характер пульсаций негармонический. Амплитуда колебания зависела от глубины жидкости и расхода воздуха.

Для определения средней скорости распространения пламени измерялась зависимость координаты фронта от времени. Точность определения скорости 15 %. Точность определения расхода 3 %. Как правило, зависимость представляла собой прямую линию. Типичные зависимости представлены на рис. 2. Первые эксперименты показали, что при небольших расходах воздуха ($\approx 12 \text{ см}^3/\text{с}$) скорость распространения пламени сильно зависит от температуры, при которой проводились эксперименты. На рис. 3 показаны зависимости средней скорости пламени от начальной температуры жидкости (она равна температуре окружающей среды) для

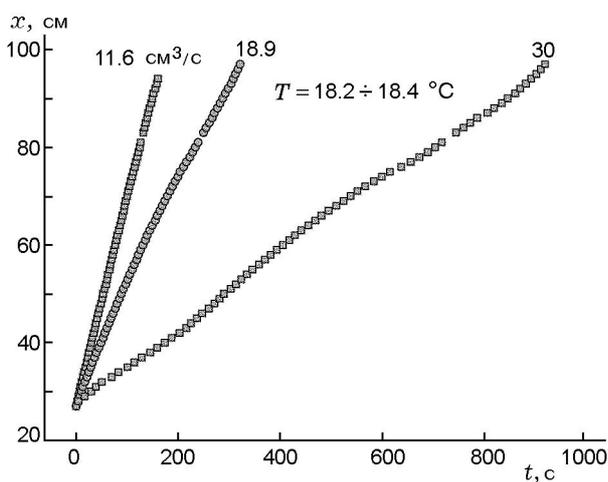


Рис. 2. Типичные зависимости координаты фронта пламени от времени при различных расходах воздуха

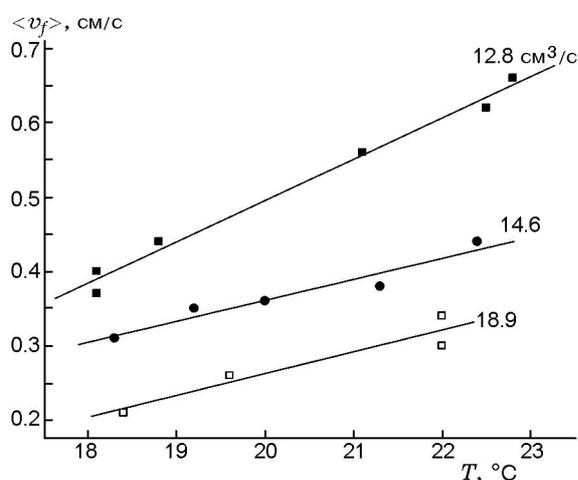


Рис. 3. Зависимости средней скорости пламени от температуры при различных расходах воздуха (глубина жидкости $\approx 1 \text{ мм}$)

трех разных расходов. Видно, что при увеличении температуры всего на $3 \text{ }^\circ\text{C}$ скорость пламени возрастает почти на 40 % при расходе воздуха $12.8 \text{ см}^3/\text{с}$. Правда, с ростом расхода воздуха наблюдается тенденция к уменьшению чувствительности скорости к температуре. В связи с этим, чтобы уменьшить разброс данных, обусловленный температурой, эксперименты проводились так, чтобы температура от опыта к опыту изменялась в пределах $18 \div 18.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Точность измерения температуры $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$.

При измерении средней скорости распространения пламени важно знать глубину жидкости перед передним краем фронта горения. Уровень жидкости перед фронтом пламени измерялся по видеозаписям. Однако возникли трудности, связанные с тем, что из-за поверхностного натяжения жидкость поднималась по стенке, в результате чего граница раздела между жидкостью и газом оказалась размытой. Лучше всего различалась плоская часть границы в середине трубы, поэтому, хотя и с большой ошибкой, измерялась глубина жидкости именно в этой части слоя (точность измерения $\approx 30 \%$). Глубина изменялась в диапазоне $1 \div 2.5 \text{ мм}$. В работе [6] показано, что для *n*-бутанола при $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ толщина слоя перед фронтом горения, в котором меняется температура и наблюдается движение жидкости, около 3.5 мм . Поэтому даже при самых больших глубинах в настоящих экспериментах жидкость можно было считать мелкой.

Во всех экспериментах наблюдались тонкие вытянутые пламена (рис. 4). Пламя тоньше его изображения на рисунке, так как плоскость пламени наклонена к оптической оси. С ростом расхода воздуха длина пламени увеличивалась.

При увеличении расхода воздуха возрастал перепад глубин жидкости перед и за пе-



Рис. 4. Пламя над жидкостью (края трубы и жидкости выделены; расход воздуха $22 \text{ см}^3/\text{с}$)

редним краем фронта горения. При достаточно большом расходе за передним краем фронта вся жидкость испарялась. На рис. 4 виден этот перепад при расходе $22 \text{ см}^3/\text{с}$ (скорость 50 см/с). Интересно, что если перед экспериментом заливалось достаточно много жидкости (при максимальном количестве жидкости заполняла почти половину трубки), то при больших расходах газа после инициирования горения она растекалась вдоль трубки из-за возникшего большого перепада глубины. После этого уровень жидкости перед передним краем пламени менялся незначительно. Это позволяло измерять скорость при постоянной глубине жидкости перед пламенем. Однако в связи с растеканием жидкости не удалось измерить среднюю скорость пламени при больших расходах над достаточно толстым слоем жидкости.

Гашение пламени наблюдалось при достаточно малых и больших расходах воздуха. Причем поведение пламени перед гашением в этих случаях сильно отличалось. С уменьшением расхода амплитуда колебания возрастала и достигала нескольких сантиметров. С увеличением расхода уменьшалась скорость пламени, увеличивались температура стенки и перепад глубин. Пламя стабилизировалось в месте изменения глубины жидкости, амплитуда колебания уменьшалась. При еще больших расходах пламя «сдувалось» и гасло. Из-за агармоничности колебаний трудно было измерить период колебания. Возможно, имело место наложение колебания, как и в работе [6]. Частота колебаний, как и в цитированной выше работе, лежала в диапазоне $1 \div 15 \text{ Гц}$. Отметим, что при малых расходах, когда пламя заметно колебалось, амплитуда колебаний при распространении пламени вдоль трубки значительно увеличивалась в некоторых точках, при этом средняя скорость уменьшалась, а затем скорость пламени и амплитуда пульсаций восстанавливались. Такое поведение предположительно можно связать с возникновением резонансных колебаний в трубке.

Минимальная глубина жидкости, при которой удалось инициировать волну горения, была $\approx 1 \text{ мм}$. При меньших глубинах под передним краем пламени вся жидкость испарялась и возникал разрыв сплошности жидкости. В этом случае пламя стабилизировалось на краю жидкости, расположенной в продуктах вниз по потоку (рис. 5). То есть наблюдался еще один режим горения. В этом режи-



Рис. 5. Режим горения, при котором жидкость находится только в продуктах (пламя, края трубы и жидкости выделены)

ме пламя устойчиво, без каких-либо колебаний, стояло на границе жидкости и перемещалось вместе с ней по мере ее испарения. Скорость пламени в этом режиме уменьшалась с увеличением глубины жидкости.

При распространении пламени над жидкостью перед передним краем горения в жидкой фазе визуально наблюдалась характерная картина, связанная с нагревом и движением жидкости вследствие возникновения градиента показателя преломления при нагревании жидкости. Причем наблюдался прогрев всего слоя жидкости, что подтверждало данные работы [6] о том, что такие глубины соответствуют мелкой жидкости.

Из общих соображений понятно, что распространение пламени над жидкостью зависит как от скорости движения окислителя над жидкостью, так и от объема свободного пространства. Однако чувствительность волны горения к скорости подачи воздуха в зону горения должна быть выше. С этой точки зрения необходимо различать ситуации, когда расход тот же самый, а объем свободного пространства разный из-за различного количества жидкости, заливаемого в трубку. Поэтому разумнее строить зависимость средней скорости пламени от средней скорости подачи воздуха во фронт пламени, а не от расхода. Средняя скорость газа определялась по известному расходу и глубине жидкости перед передним краем пламени. Необходимо отметить, что при определении глубины в каждом эксперименте измерялась зависимость глубины от координаты пламени. В пределах ошибки измерения глубина не менялась в процессе распространения пламени. Значения скорости пламени, полученные при разных глубинах жидкости перед фронтом, приведены на рис. 6. Видно, что при изменении глубины жидкости в пределах $1 \div 2.5 \text{ мм}$ все точки в пределах экспериментальной ошибки ложатся на одну кривую.

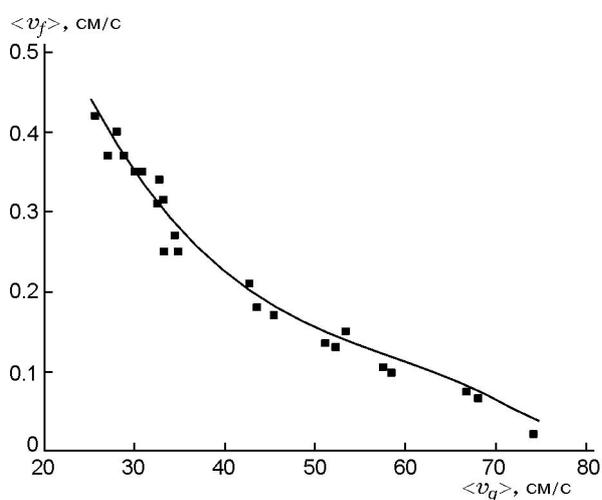


Рис. 6. Зависимость средней скорости пламени от средней скорости набегающего газа (глубина жидкости изменяется в диапазоне $1 \div 2.5$ мм)

Сравним полученные результаты с данными, имеющимися в литературе. В [2] исследовался бутанол-1, высота слоя которого соответствовала случаю глубокой жидкости. Исследования проводились в условия микрогравитации и в обычных условиях. В последнем случае пламя распространялось с пульсациями со средней скоростью 4.3 см/с при температуре жидкости 20.4 °С. Скорость пламени была одинаковой при скоростях движения воздуха 20 и 30 см/с. Измеренные в работе [2] скорости отличаются от полученных в настоящих опытах почти на порядок (см. рис. 3). Кроме того, согласно рис. 3 скорость пламени, в отличие от [2], зависит от скорости газа над жидкостью. Внешний вид пламени также отличается: в данной работе (см. рис. 4), в отличие от [2], не наблюдался яркий поднимающийся вверх хвост. Отсутствие хвоста можно объяснить тем, что в [2] было больше свободного пространства над жидкостью, а такие условия были благоприятными для развития свободной конвекции.

Значительное различие скоростей пламени объясняется тем, что в данной работе жидкость была мелкой, тогда как в [2] глубокой. Когда жидкость мелкая, нагретый поверхностный слой жидкости соприкасается со стенкой трубки, благодаря чему возникает поток тепла в стенки трубки. Температура нагретого слоя понижается, что приводит к уменьшению скорости испарения и соответственно скорости пламени. В работе [12] приведены экспериментальные данные, согласно которым скорость

монотонно падает с уменьшением глубины. Полученные в настоящей работе низкие значения скорости пламени, с одной стороны, согласуются с фактом падения скорости с уменьшением глубины, с другой стороны, скорость (в пределах экспериментальной ошибки) от глубины не зависит или зависит слабо (см. рис. 6). Объяснить это противоречие можно следующим образом. Из-за малости глубины температура жидкости перед фронтом снижается, о чем упоминалось выше. В то же время из-за того, что стенка трубки прогревается продуктами горения, возникает заметный (особенно при больших расходах воздуха) поток тепла по стенке от горячего газа в жидкость, вследствие чего при уменьшении глубины жидкости уменьшаются теплотери из нагретой перед пламенем жидкости. Это приводит к тому, что зависимость от глубины ослабевает и при определенных условиях температура жидкости может начать расти с уменьшением глубины.

Передача тепла по твердой фазе играет решающую роль при распространении волны горения по тонкой смоченной металлической подложке [8–10]. Такая система является термически тонкой. Сравним, как и авторы исследований [8–10], характерное время прогрева слоя жидкости и стенки трубки с характерным временем передачи тепла вдоль направления распространения волны горения по стенке и слою жидкости. Характерное время прогрева $\tau_1 = \delta^2/\chi$, где δ — толщина слоя, χ — коэффициент температуропроводности. Характерное время передачи тепла в направлении распространения волны горения $\tau_2 = \chi/v_f^2$, где v_f — скорость распространения пламени. Для кварца $\chi \approx 0.7 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Для бутанола-1 $\chi \approx 0.8 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Толщина стенки и минимальная глубина жидкости (в центре трубки) $\approx 10^{-3}$ м. Минимальная скорость пламени (см. рис. 6) $v_f \approx 10^{-3}$ м/с. Отсюда для кварца $\tau_1 \approx 1.4$ с, $\tau_2 \approx 0.7$ с; для бутанола $\tau_1 \approx 12.5$ с, $\tau_2 \approx 0.08$ с. Слой можно считать термически тонким, когда выполняется условие $\tau_1 \ll \tau_2$, и термически толстым при обратном соотношении. Эти условия не выполняются ни для кварца, ни для жидкости. Таким образом, настоящая система занимает промежуточное положение между этими двумя предельными случаями, что в некоторой степени осложняет анализ механизма распространения пламени.

Влияние внешнего потока воздуха на ско-

рость распространения пламени теоретически изучалось в работе [7]. Моделировалось распространение пламени над мелкой жидкостью (глубина 2 мм). В качестве горючей жидкости использовался *n*-пропанол. В работе получены зависимости средней скорости пламени от скорости набегающего воздуха при разных температурах. Наблюдается хорошее качественное согласие с зависимостями, полученными в настоящей работе. С ростом температуры, как и в настоящей работе (см. рис. 3), скорость растет. С увеличением скорости набегающего воздуха в полном согласии с рис. 6 скорость пламени монотонно падает.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе установлено, что пламя способно распространяться над поверхностью жидкости в узкой трубке при наличии внешнего потока окислителя, причем оно распространяется в пульсационном режиме. Подтверждены имеющиеся в литературе данные о чувствительности скорости распространения пламени над жидкостью к температуре жидкости. С ростом температуры скорость растет. Кроме того, показано, что средняя скорость пламени уменьшается с увеличением скорости набегающего на пламя окислителя. В то же время эксперименты показали, что средняя скорость пламени не зависит либо слабо зависит от глубины слоя жидкости. Одним из возможных объяснений этого факта может быть возникновение потока тепла по стенке трубки от продуктов сгорания в жидкость, находящуюся перед фронтом пламени. Получен режим устойчивого горения, при котором пламя перемещается вниз по потоку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Garcia-Ybarra P. L., Castillo J. L., Antoranz J. C., Sankovitch V., San Martin J. Study of the thermocapillary layer preceding slow, steadily spreading flames over liquid fuels // Twenty-Sixth Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Inst., 1996. P. 1469–1475.
2. Ross H. D., Miller F. J. Detailed Experiments of flame spread across deep butanol pools // Ibid. P. 1327–1334.
3. Schiller D. N., Sirignano W. A. Opposed-flow flame spread across *n*-propanol pools // Proc. Combust. Inst. 1996. V. 26. P. 1319–1325.
4. Schiller D. N., Ross H. D., Sirignano W. A. Computational analysis of flame spread across alcohol pools // Combust. Sci. Technol. 1996. V. 118. P. 203–255.
5. Takahashia K., Itoa A., Kudoa Y., Konishib T., Saitoc K. Scaling and instability analyses on flame spread over liquids // Proc. Combust. Inst. 2005. V. 30. P. 2271–2277.
6. Takahashi K., Kodaira Y., Kudo Y., Ito A., Saito K. Effect of oxygen on flame spread over liquids // Proc. Combust. Inst. 2007. V. 31. P. 2625–2631.
7. Schiller D. N., Sirignano W. A. Opposed-flow flame spread across *n*-propanol pools // Twenty-Sixth Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Inst., 1996. P. 1319–1325.
8. Коржавин А. А., Бунев В. А., Намятов И. Г., Бабкин В. С. Распространение пламени над пленкой жидкого топлива на металлических подложках // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 3. С. 25–30.
9. Намятов И. Г., Минаев С. С., Бабкин В. С., Бунев В. А., Коржавин А. А. Диффузионное горение пленки жидкого топлива на металлической подложке // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 5. С. 12–21.
10. Korzhavin A. A., Bunev V. A., Namyatov I. G., Minaev S. S., Babkin V. S. Combustion regimes of liquid fuel film on thermally thin metallic substrate // Fire and Explosion Hazard: Proc. of the Third Intern. Seminar on Fire and Explosion Hazards / D. Bradley, D. Drysdale, G. Makhviladze (Eds). Centre for Research in Fire and Explosion Studies, University of Central Lancashire, Preston, United Kingdom, 2001. P. 379–388.
11. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочник // Под ред. А. Н. Баратова, А. Я. Корольченко. М.: Химия, 1990. Кн. I. С. 193.
12. Torrance K., Mahajan R. L. Fire spread over liquid fuels: liquid phase parameters // Fifteenth Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1975. P. 281–287.

Поступила в редакцию 14/XI 2006 г.