

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ, СМОЧЕННЫХ ТОПЛИВОМ, В ОБОГАЩЕННОЙ КИСЛОРОДОМ ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

И. Г. Намятов, А. А. Коржавин

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

Проведено экспериментальное изучение распространения пламени над пленкой жидкого топлива на поверхности твердой фазы в условиях, когда давление паров жидкости ниже бедного предела, а твердая фаза представлена в виде гранул пористой среды. Пламя распространялось со скоростями порядка нормальной скорости гомогенной стехиометрической смеси. Выполнено экспериментальное исследование влияния размера характерного элемента пористой среды и концентрации кислорода в газовой фазе на скорость распространения пламени в пористых средах, смоченных *n*-бутанолом.

Ключевые слова: диффузионное горение, бутанол, пористая среда, скорость пламени.

DOI 10.15372/FGV2023.9348  
EDN KBPZTF

## ВВЕДЕНИЕ

Процессы горения в пористых средах (ПС), поверхность которых покрыта жидкой пленкой топлива, а свободный объем пор заполнен газообразным окислителем и парами этого топлива, представляет определенный интерес. С практической точки зрения эта проблема интересна тем, что смоченная инертная ПС может стать пожаро- и взрывоопасной [1, 2]. С другой стороны, ПС используются нередко в качестве взрывозащитного наполнителя топливных баков различных транспортных средств [3], т. е. там, где ПС всегда смочена, например в авиации. Следует отметить, что растворимость кислорода в топливах больше по сравнению с азотом. Поэтому при выделении газов из топлива с набором высоты пространство над топливом обогащается кислородом до 40 % на высотах свыше 12 км [4].

Научный интерес к данной проблеме обусловлен возможностью реализации различных стационарных режимов горения: режима гетерогенной детонации [5], режима высокой скорости [6] и испарительно-диффузионного низкоскоростного режима (ИДНСР) [7]. Скорость соответствующих процессов составляет  $400 \div 1050 \text{ м/с}$  [5],  $0.1 \div 10 \text{ м/с}$  [6] и  $4 \div 10 \text{ см/с}$  [7, 8]. Если при начальных условиях давление паров топлива находится ниже бедного предела, то горение в ПС происходит только в том случае, если осуществляется подвод горючего

с поверхности жидкой пленки в газовую фазу перед волной горения или в саму волну горения. В случае детонации, согласно [5, 9], механизм процесса состоит в относительно медленном испарении жидкости с поверхности, нагретой горячими продуктами сгорания, либо в образовании волн и срыве с их гребней микроподъема жидкости. В случае ИДНСР горючая газовая смесь образуется при испарении топлива с поверхности ПС с последующим смешением с окислителем. В режиме высоких скоростей в газовой фазе уже существует горючая смесь, но пленка жидкого топлива на поверхности ПС также может оказывать некоторое влияние на скоростные и предельные характеристики процесса распространения пламени. Для изучения механизма распространения пламени в ИДНСР в работе [8] использовались в качестве пористой среды высокопористые среды на основе алюминиевой фольги и открытого пеноизола, а также засыпки стальными шарами. В качестве горючей жидкости применялся *n*-октан, а в качестве окислителя — воздух при различных начальных давлениях. Начальная температура системы газ — жидкость — пористая среда также варьировалась. Изучаемый в работе [8] режим горения реализуется в области начальных параметров, исключающих образование горючей газовой смеси в равновесных условиях. Так как необходимая для горения смесь образуется в процессе самого горения в результате испарения жидкости и смешения паров топлива с окислите-

лем, то можно ожидать, что на горение существенное влияние оказывают теплофизические характеристики ПС и топлива. В работе [8] показано, что скорость распространения пламени в ИДНСР практически не зависит от теплопроводности материала ПС, но зависит от теплоемкости единицы объема ПС. Пламя распространяется только в высокопористых средах.

Поэтому с целью расширения методологических возможностей и, в частности, раздельного изучения влияния теплофизических свойств системы и реакционной способности топлив была выбрана новая модельная система — пленка жидкого топлива на тонкой металлической подложке.

В связи с этим началось экспериментальное изучение скорости распространения пламени различных чистых топлив на различных металлических подложках в воздушной среде. Зависимость скорости пламени от толщины подложки, ее теплопроводности, температуры окружающей среды, ориентации подложек в пространстве изучалась в работах [10–17]. Полученные зависимости позволили утверждать, что при распространении пламени на подложках с высокой температуропроводностью основную роль играет передача тепла в предпламенную зону через подложку. Движение пленки жидкости под действием термокапиллярных сил слабо влияет на скорость пламени, но существенно влияет на предел его распространения. В работе [18] изучалось распространение пламени над пленками жидкого топлива на тонких низкотеплопроводных подложках. Показано, что в этом случае скорость пламени зависит от градиента температуры жидкости вблизи передней кромки пламени. Величина градиента температуры определяется не только теплофизическими свойствами топлива и подложки и их толщиной, а в основном зависит от коэффициента поверхностного натяжения от температуры  $\sigma(T)$  и динамической вязкостью  $\mu$  жидкого топлива. Роль подложки сводится к теплопотерям, которые определяются ее теплоемкостью и толщиной. Скорости распространения пламени в случаях высокой и низкой температуропроводности подложек близки, порядка 2 см/с, а механизмы различны.

Таким образом, стали понятными механизмы распространения пламени в высокопористых средах различной теплопроводности в режиме низких скоростей.

В работах [19–21] изучалось распространение пламени над слоями жидкого топлива толщиной порядка 1 мм при встречном потоке окислителя. В качестве окислителя использовалась азотно-кислородная смесь различного состава в диапазоне от воздуха до чистого кислорода. Показано, что скорость пламени растет с увеличением содержания кислорода в атмосфере. Для неподвижной кислородной среды характерные скорости распространения пламени достигают 2.4 м/с.

В работе [22] изучалось распространение пламени над слоями жидкого топлива толщиной порядка 10 мкм на высокотеплопроводных тонких подложках из меди и на низкотеплопроводной толстой подложке из стекла. В качестве окислителя использовалась кислородо-воздушная смесь различного состава в диапазоне от воздуха до чистого кислорода. Показано, что скорость пламени растет с увеличением содержания кислорода в среде. Для кислородной среды характерные скорости пламени совпадают с данными работы [21]. В работе [22] сделан вывод о том, что с ростом скорости распространения пламени влияние теплопотерь в конденсированную фазу снижается, а в области выше 0.3 м/с скорость слабо зависит от таких свойств подложки, как теплопроводность и толщина.

Таким образом, из проведенного обзора следует, что при высоких содержаниях кислорода или, иначе говоря, при высоких скоростях распространения пламени скорость не будет зависеть от плотности и материала пористой среды. То есть можно ожидать, что, в отличие от работ [7, 8], пламя в смоченной топливом пористой среде может распространяться со скоростями порядка 1 м/с при температурах ниже температуры вспышки даже в низкопористых средах (в средах с высокой теплоемкостью единицы объема за счет теплоемкости твердой фазы).

Данная работа является продолжением экспериментального изучения распространения пламени над пленкой жидкого топлива на поверхности твердой фазы в условиях, когда давление паров жидкости ниже бедного предела. В целом работы по этой теме направлены на выявление механизмов распространения пламени.

Цель данной работы — выявить области параметров пористой среды и газовой смеси, в которых реализуется режим распространения

пламени со скоростями порядка нормальной скорости гомогенной стехиометрической смеси, получить параметрические зависимости скорости от характерного размера элемента ПС и концентрации кислорода в окислительной газовой фазе.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Опыты проводили в открытой вертикальной кварцевой цилиндрической трубе внутреннего диаметра 35 мм, наружного — 40 мм и длиной 0.5 м, заполненной ПС, смоченной *н*-бутанолом. Все эксперименты выполнялись при комнатной температуре  $T_0 = 28 \pm 1$  °С. Регистрация распространения пламени осуществлялась посредством видеосъемки с частотой 240 кадр/с.

Исследования проводились в ПС, использовались засыпки из стальных шаров диаметром 1.27, 0.95, 0.8, 0.6 и 0.32 см, фарфоровых шаров диаметром 0.6 см, полиэтилена высокого давления в виде эллипсоидальных гранул с характерными размерами осей 0.48, 0.25, 0.25 см. В качестве топлива использовался жидкий *н*-бутанол, температура вспышки которого 35 °С, что выше температуры проведения экспериментов.

Перед экспериментом труба заливалась *н*-бутанолом. Затем жидкость сливалась через вентиль в нижней части трубы, после чего через это же отверстие осуществлялась продувка газом, состоящим из смеси азота и кислорода. Газ заданного состава приготавливается в смесителе высокого давления по парциальным давлениям воздуха и кислорода. В расчетах принималось, что воздух состоит из 21 % кислорода и 79 % азота. Затем подача газа прекращалась, и проводилось инициирование горения в верхней части трубы, импульсно нагреваемой никромовой спиралью, смоченной *н*-бутанолом. Смачивание спирали необходимо для инициирования процесса в ПС в условиях, когда концентрация паров топлива меньше нижнего концентрационного предела. Скорость распространения пламени рассчитывалась по расстоянию, пройденному передним фронтом пламени за определенное количество кадров. Время продувки порядка 1 мин обеспечивало полное замещение воздуха в порах после слива топлива на газ заданного состава. Для каждой ПС варьировался состав газовой фазы от чистого кислорода до его предельного значения.

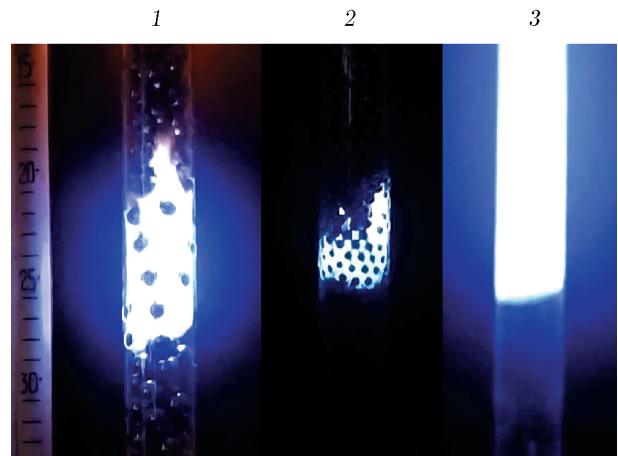


Рис. 1. Пламя в засыпке шарами различного диаметра:  
1 —  $d = 1.27$  см, 2 —  $d = 0.6$  см, 3 — без пористой среды, распространение пламени в кислороде

Давление газа в экспериментах было равно атмосферному.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее [8] было показано, что в перечисленных ПС распространение пламени при температурах ниже температуры вспышки при любых давлениях воздуха невозможно.

На рис. 1 представлены видеокадры распространения пламени в ПС из стальных шаров диаметром 1.27, 0.6 см и в не заполненной пористой средой трубе (слева на кадре — линейка с ценой деления 1 см). Пламя в ПС распространяется в виде светящейся зоны, размер которой зависит от диаметра шаров ПС: чем меньше диаметр шара, тем меньше размер светящейся зоны. Передний фронт светящейся зоны голубой, он не является плоским, а постоянно изменяет свою форму. В незаполненной трубе передний фронт светящейся зоны также голубой. Зона горения белая, как и в ПС, но размер светящейся зоны постоянно увеличивается до тех пор, пока пламя не распространится на всю длину трубы.

В трубе без ПС распространяется пламя белого цвета. Такое свечение характерно для переобогащенного пламени и существует в течение всего процесса распространения пламени по трубе. Горение не прекращается и при достижении передним фронтом пламени конца трубы. Затем через 0.34 с горение застухает, процесс сгорания завершается в виде

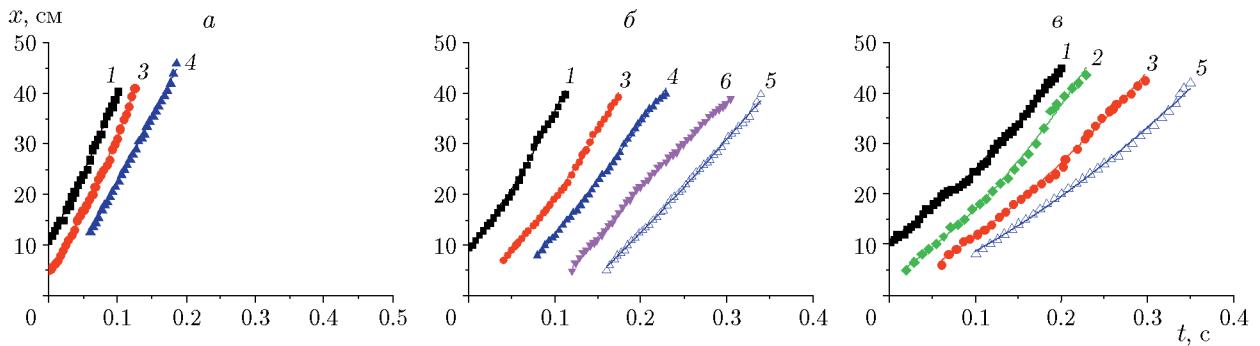


Рис. 2. Зависимость координаты переднего фронта пламени от времени в пористой среде из стальных шаров диаметром 1.27 (1), 0.95 (2), 0.8 (3), 0.6 (4), 0.3 см (6) и из керамических шаров диаметром 0.6 см (5) при содержании кислорода в окислителе 100 (а), 90 (б), 75 % (в)

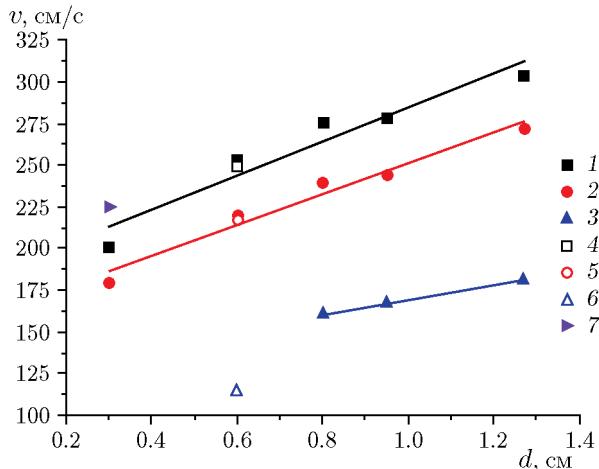


Рис. 3. Зависимость средней скорости распространения пламени от диаметра шаров пористой среды при различных составах окислительного газа:

1–3 — стальные шары: 1 — 100 %  $O_2$ , 2 — 90 %  $O_2$ , 3 — 75 %  $O_2$ , 4–6 — керамические шары: 4 — 100 %  $O_2$ , 5 — 90 %  $O_2$ , 6 — 75 %  $O_2$ , 7 — полиэтиленовые гранулы, 90 %  $O_2$

хаотичных очагов голубого пламени вблизи стенок трубы.

На рис. 2 представлена зависимость координаты переднего фронта пламени  $x$  от времени  $t$  в пяти пористых средах из стальных шаров различного диаметра и в пористой среде из керамических шаров диаметром 0.6 см. Концентрация кислорода 100, 90, 75 % (об.). Видно, что эти зависимости близки к линейным, но все же со временем отклоняются от линейных.

На рис. 3 приведена зависимость средней скорости распространения пламени  $v$  от диаметра  $d$  стальных шаров для окислительной среды с различной концентрацией кислорода в смеси с азотом. Средняя скорость определя-

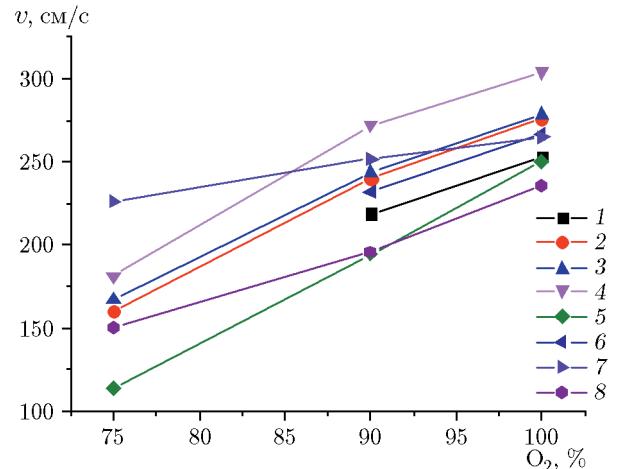


Рис. 4. Зависимость скорости распространения пламени в пористой среде с различными диаметрами шаров от состава окислительного газа:

1–4 — диаметр стальных шаров 0.6 (1), 0.8 (2), 0.95 (3), 1.27 см (4); 5 — диаметр керамических шаров 0.6 см; 6 — скорость пламени вдоль стенок трубы без пористой среды, 7 — нормальная скорость пламени в гомогенной стехиометрической смеси при температуре  $T_{st}$ , 8 — скорость пламени над плоской горизонтальной стеклянной поверхностью [22]

лась как расстояние, пройденное пламенем за определенный промежуток времени. Также на рис. 3 представлены экспериментальные данные, полученные для керамических шаров диаметром 0.6 см и полиэтиленовых гранул эллипсоидной формы с характерным размером 0.3 см. Видно, что скорость растет с диаметром шара, а также с увеличением концентрации кислорода.

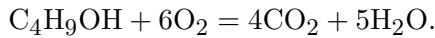
На рис. 4 представлены зависимости скорости пламени от концентрации кислорода при

распространении в различных ПС по данным из рис. 3, а также скорость пламени в трубе без ПС и зависимость нормальной скорости пламени стехиометрической смеси от соответствующей концентрации кислорода.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Так как нет потока газовой смеси через трубу, то горение может протекать до израсходования окислителя, находящегося в свободном объеме.

Оценим расход бутанола на полный расход кислорода из свободного объема в процессе сгорания. Уравнение реакции сгорания бутанола



Видно, что для сжигания 1 моль бутанола необходимо  $n = 6$  моль кислорода или, иными словами, на израсходование 1 моль кислорода требуется  $1/n$  моль бутанола. Для сжигания единицы объема кислорода необходимо сжечь объем жидкого бутанола  $V_L = M/(n\rho_L V_1)$ . Здесь  $M = 0.074$  кг — молекулярная масса бутанола,  $V_1 = 24.6$  л — объем 1 моль газа при температуре 300 К,  $\rho_L = 0.805$  кг/л — плотность жидкого бутанола. Для условий экспериментов  $V_L = 6.23 \cdot 10^{-4}$ , т. е. для реагирования 1 л кислорода требуется  $6.23 \cdot 10^{-4}$  л жидкого *n*-бутанола. При этом на его испарение потребуется тепла

$$\begin{aligned} q_V &= V_L Q_{ev} \rho_L = \\ &= 6.23 \cdot 10^{-4} \times 5.9 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} \times 0.805 \text{ кг/л} = \\ &= 2.96 \cdot 10^3 \text{ Дж/л О}_2. \end{aligned}$$

Для оценки расхода топлива при сгорании рассмотрим подробнее некоторые соотношения, характеризующие ПС. Кроме характеристики отдельных элементов ПС, таких как поверхность и объем, ее также характеризуют долей свободного объема — пористостью  $\varepsilon$ . Таким образом, объем газовой фазы в сосуде объемом  $V$ , заполненном пористой средой, —  $V_g = V\varepsilon$ , а объем твердой фазы —  $V_s = V(1 - \varepsilon)$ . Удельная поверхность ПС на единицу свободного объема  $F$  для упаковок из одинаковых элементов можно выразить через пористость, поверхность и объем элемента ПС. Число отдельных элементов в общем объеме  $N = V(1 - \varepsilon)/(\pi d^3/6)$ ,

тогда их суммарная площадь поверхности,  $S = \pi d^2 V(1 - \varepsilon)/(\pi d^3/6)$ , а площадь поверхности  $F$ , приходящаяся на единицу газовой фазы с учетом стенки трубы, равна

$$F = \frac{\frac{\pi d^2 \pi D^2 L(1 - \varepsilon)}{4\pi d^3/6} + \pi D L}{\pi D^2 L \varepsilon / 4} = \frac{6}{d} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \frac{4}{D\varepsilon}.$$

В представленных экспериментах жидкий бутанол находится в виде пленок на поверхности твердой фазы. Исходя из вышеприведенных соотношений можно оценить изменение толщины пленки топлива  $h_f$  при сжигании единицы объема кислорода:  $h_f = V_L/F$ ,  $h_f \approx 5.4$  мкм для пленки на стенке трубы без засыпки шарами, для засыпки из шаров  $d = 1.27$  см получаем толщину сгорающей пленки  $h_f = V_L \frac{d}{6} \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \approx 1.3$  мкм, а для шаров  $d = 0.6$  см она равна  $h_f \approx 0.4$  мкм.

Средняя толщина пленки топлива, остающегося на поверхности твердой фазы после слива бутанола, рассчитывалась следующим образом. Разность объемов залитого и слитого бутанола делилась на общую поверхность всех шаров и стенки трубы. Для засыпки из стальных шаров диаметром 0.6 см измеренная пористость была 0.4, средняя толщина пленки 67 мкм, а для засыпки керамическими шарами — 144 мкм. В отдельном опыте был измерен объем топлива удерживаемого стенками сосуда без наполнения шарами. Эта величина составляет менее 10 % от объема топлива, удерживаемого в ПС. Следует отметить, что оценка толщины пленки на поверхности ПС является осредненной величиной. В действительности значительная часть объема топлива сосредоточена в местах контакта элементов ПС в виде менисков, вследствие действия сил поверхности натяжения. Таким образом, во всех экспериментах пленка топлива больше, чем необходимо для полного реагирования чисто кислородной смеси и тем более для разбавленной азотом.

Как и при распространении пламени над пленками топлив на плоской подложке [22], при распространении в ПС пламя вблизи лидирующих точек синее, однако дальнейшее реагирование испаряющегося бутанола происходит в виде сплошного пятна белого цвета, за исключением областей, прилегающих к поверхности шаров и трубы, где пламя не может существовать из-за охлаждения.

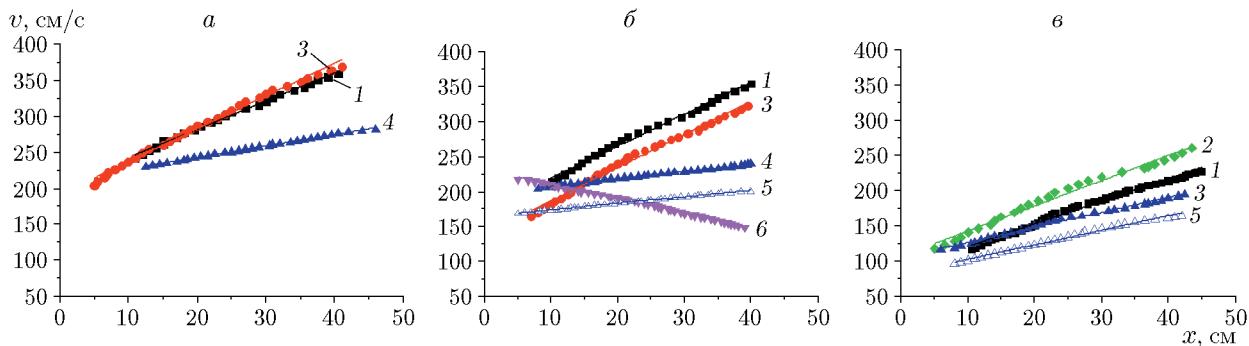


Рис. 5. Зависимость скорости распространения пламени от координаты переднего фронта пламени в пористой среде из стальных шаров диаметром 1.27 (1), 0.95 (2), 0.8 (3), 0.6 (4), 0.3 см (6) и из керамических шаров диаметром 0.6 см (5) при содержании кислорода в окислителе 100 (а), 90 (б), 75 % (в)

Приведенные на рис. 2 зависимости координаты переднего фронта пламени от времени на первый взгляд представляются линейными. Так, например, если для зависимости  $x(t)$  при распространении пламени в ПС из стальных шаров диаметром  $d = 0.3$  см в газовой смеси с содержанием кислорода 90 % использовать линейную аппроксимацию, то получается уравнение  $x = 183.2t + 6.3$ , а величина достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.997$ , если же использовать квадратичную аппроксимацию, то получается  $x = -187.8t^2 + 217.7t + 5.3$ ,  $R^2 = 0.999$ . Видно, что различие в достоверности аппроксимации — в третьем знаке. Если принять линейную аппроксимацию, то следует вывод о стационарности процесса распространения пламени, т. е. о постоянстве скорости. Если принять квадратичную аппроксимацию, то следует вывод о нестационарности процесса распространения пламени, т. е. в одних случаях пламя постоянно ускоряется, а в других замедляется, в зависимости от начальных условий по концентрации кислорода и характерного размера ПС. По имеющейся информации пока нельзя сделать однозначный вывод об обоснованности каждого из способов аппроксимации. Поэтому зависимости координаты фронта пламени для различных ПС при различных концентрациях кислорода аппроксимировались полиномами второй степени вида  $x(t) = at^2 + bt + c$ . На рис. 5 представлена обработка этих данных в виде зависимости скорости  $v = 2at + b$ , но не от времени  $t$ , а от координаты  $x(t)$ , соответствующей данному моменту времени  $t$ . Видно, что зависимости близки к линейным. Для всех кривых на рис. 5 достоверность линейной аппроксимации  $R^2$  выше 0.99.

На рис. 5,а представлены зависимости скорости распространения пламени в ПС из металлических шаров при концентрации кислорода 100 %. Видно, что пламя ускоряется по мере углубления в ПС. Например, для шаров диаметром 1.27 см скорость возрастает от 220 до 360 см/с на участке от 5 до 40 см. Видно, что скорость растет с ростом пройденного пламенем расстояния в пористой среде, причем рост скорости в шарах меньшего диаметра 0.8 см близок и даже больше, чем в шарах диаметром 1.27 см. Интенсивность изменения средней скорости распространения пламени  $k = \frac{dv}{dx}$  в шарах  $d = 0.8$  см составляет  $k = 4.6 \text{ см}^{-1}$ , а в шарах  $d = 1.27$  см коэффициент  $k = 4.1 \text{ см}^{-1}$ . С уменьшением диаметра шара снижаются как средняя скорость пламени, так и коэффициент  $k$ :  $k = 1.5 \text{ см}^{-1}$  для шаров  $d = 0.6$  см.

На рис. 5,б представлена зависимость скорости распространения пламени в ПС из металлических и керамических шаров при концентрации кислорода 90 %. При этой концентрации кислорода скорость в шарах  $d = 1.27$  см выше, чем в шарах  $d = 0.8$  см. Однако, в отличие от рис. 5,а, скорость в этих шарах растет практически с одинаковым коэффициентом пропорциональности  $k = 4.8 \text{ см}^{-1}$ . Этот коэффициент близок к аналогичному коэффициенту при 100%-й концентрации кислорода, но несколько выше его. Для шаров диаметром 0.6 см ниже как средняя скорость распространения пламени, так и интенсивность ее роста ( $k = 1.1 \text{ см}^{-1}$ ), а для шаров диаметром 0.3 см скорость пламени даже падает по мере его распространения ( $k = -0.9 \text{ см}^{-1}$ ).

На рис. 5,в представлены зависимости скорости распространения пламени в ПС из металлических и керамических шаров при концентрации кислорода 75 %. Видно, что при данной концентрации кислорода скорость пламени в шарах диаметром  $d = 0.95$  см выше, чем в шарах  $d = 1.27$  см, а в шарах  $d = 0.8$  см она ниже. Для шаров диаметром 1.27 и 0.95 см скорость растет практически с близким коэффициентом пропорциональности:  $k = 3.2$  и 3.6 соответственно. Для шаров диаметром 0.8 см скорость слабее:  $k = 2.1$ . В ПС из стальных шаров  $d \leq 0.6$  см пламя не распространяется. Однако в ПС из керамических шаров  $d = 0.6$  см пламя распространяется, его скорость при этом ниже, чем в шарах  $d = 0.8$  см, а линия зависимости скорости от координаты практически параллельна линии для металлических шаров  $d = 0.8$  см ( $k = 2.1$ ).

Следует отметить, что распространение пламени в гомогенной газовой смеси в ПС происходит при выполнении с некоторой точностью условия  $\text{Pe} > \text{Pe}_{cr}$ , где число Пекле построено на нормальной скорости  $S_u$ , гидравлическом диаметре  $d_h$  и температуропроводности  $\kappa$  газовой смеси,  $\text{Pe} = S_u d_h / \kappa$ ,  $\text{Pe}_{cr} \approx 65$  [3]. Очевидно, что для распространения диффузионного пламени, как в наших условиях, критерий должен быть еще жестче. Минимальное значение  $\text{Pe} = 168$  в этих экспериментах получено при распространении пламени в ПС из шаров диаметром 3 мм при концентрации кислорода в смеси 90 %. В этом случае и в дальнейшем число Пекле строится по гидравлическому диаметру пористой среды и нормальной скорости стехиометрической смеси, соответствующей данной концентрации кислорода, температуропроводность для всех смесей принята равной  $0.2 \text{ см}^2/\text{с}$ .

На рис. 3 видно, что средняя скорость пламени растет с увеличением диаметра шара. Это характерно также и для распространения гомогенного пламени в ПС [6]. Скорость в ПС из стальных и керамических шаров равных диаметров практически одинакова при скорости пламени выше 200 см/с. Однако при более низких скоростях при концентрации кислорода 75 % пламя в стальных шарах не распространяется, а в керамических распространяется, но скорость существенно ниже, чем можно было бы ожидать из экстраполяции данных для стальных шаров при данной концентрации кислорода. Следует также отметить, что в ПС

из полиэтиленовых гранул с характерным размером 0.3 см пламя распространяется только в 90%-й кислородной смеси, но со скоростью, которую можно ожидать при экстраполяции данных для стальных и керамических шаров при концентрации кислорода 100 %. При концентрации кислорода 75 % пламя в такой ПС не распространяется. Эксперимент в ПС из полиэтиленовых гранул при концентрации кислорода 100 % привел к разрушению стеклянной трубы. Это указывает на то, что пламя распространялось с очень высокой скоростью с характерным повышением давления в волне горения.

Для объяснения особенностей поведения пламен в металлических, керамических и полиэтиленовых средах сделаем некоторые оценки. Теплоемкость единицы объема ПС, приходящаяся на единицу объема газовой фазы,  $c_{s\rho s}(1 - \varepsilon) = 2.2 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  для стали,  $1.2 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  для полиэтилена и примерно столько же для керамики, теплоемкость жидкой фазы  $4.4 \cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ , теплоемкость газовой фазы  $c_g \rho g \varepsilon = 0.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ . Видно, что для перечисленных ПС теплоемкость газовой фазы на три порядка ниже теплоемкости конденсированной фазы, а теплоемкость пленки топлива ниже на два порядка теплоемкости твердой фазы. При сгорании части пленки топлива и полном выгорании кислорода выделяется тепла  $5.5 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{м}^3$  газовой фазы. Если пренебречь затратами тепла на испарение пленки топлива в процессе охлаждения газовой фазы, то равновесная температура газа и конденсированной фазы будет выше начальной равновесной температуры на 2.5 К для ПС из стальных шаров и на 4.5 К для ПС из полиэтилена и керамики. При таких разогревах изменение плотности паров бутанола слишком мало, чтобы прореагировал весь кислород в порах. Из этого следует вывод, что испарение и реагирование топлива происходят в существенно неравновесных условиях. Пленка топлива должна быть перегрета относительно твердой фазы. В работе [22] экспериментально показано, что в диапазоне выше 0.3 м/с скорость пламени не зависит от природы подложки при толщине пленки топлива выше 10 мкм.

Из рис. 4, где кроме данных из рис. 3 приведены также скорости пламени в трубе без ПС, следует, что в ПС из шаров диаметром больше 0.6 см пламя распространяется быстрее, чем в трубе без ПС. На рис. 4 приведены также расчетные данные по нормальной скоро-

сти бутаноло-кислородно-азотной смеси из [22] и данные из этой же работы по скорости распространения пламени над плоской поверхностью стекла в квадратном канале. Во всех случаях скорость распространения в трубе без ПС и с ПС выше, чем над плоской поверхностью из [22]. В кислороде средняя скорость распространения пламени в ПС из шаров диаметром больше 0.6 см выше, чем нормальная скорость стехиометрического пламени бутанол — кислород. Скорость распространения пламени в трубе без ПС и в плоском канале ниже, чем нормальная скорость соответствующей гомогенной стехиометрической смеси.

Таким образом, на основании данных из рис. 4 можно сделать предположения о механизме распространения пламени в ПС. Искривленные поверхности твердой фазы формируют разнонаправленные потоки продуктов диффузационного горения, которые, в свою очередь, формируют неоднородные потоки газа в предпламенных областях. Общая поверхность горения становится больше площади сечения свободного пространства. Распространение волны горения происходит подобно режиму высоких скоростей при распространении горения в гомогенной смеси [23]. Но на то, что механизм распространения отличается от [6], указывают данные из работы [20]. В этой работе исследовалось распространение пламени над плоской поверхностью жидкости в узком плоском канале. Оказалось, что в этих условиях диффузационное пламя может распространяться со скоростями выше нормальной скорости соответствующей стехиометрической гомогенной смеси и при отсутствии искривленных поверхностей твердой фазы. При этом поверхность пламени искривлена.

В режиме, описанном в [23], процесс горения протекает в порах между элементами твердой фазы, размер которых больше критического диаметра для ламинарных пламен в гомогенной смеси. Расширяющиеся продукты сгорания, взаимодействуя с ПС, создают систему струй, которые осуществляют передачу реакции во фронте горения и приводят к высокой скорости сгорания. Пористая среда играет роль теплообменника, на котором имеют место потери тепла в наиболее быстрых пульсациях (струях), в результате чего происходит гашение химической реакции в лидирующих точках. Это — важный элемент в механизме высокоскоростного распростране-

ния пламени, поскольку именно наиболее быстрые пульсации определяют скорость волны горения. Скорость распространения ограничена сверху условием критического теплообмена с ПС в наиболее быстрых пульсациях. Скорость распространения пламени в этой работе представлена в виде зависимости числа Рейнольдса от числа Пекле:  $Re \sim Pe^3$ , где параметр  $Re = (v - S_u)d_h/\eta$  построен, по существу, на скорости пламени в лабораторной системе ( $v \gg S_u$ ),  $\eta = 0.15 \text{ см}^2/\text{с}$  — кинематическая вязкость газа, принятая в этой работе. Таким образом, скорость пламени должна быть пропорциональна  $d_h^2$  [6].

Для диффузационного дефлаграционного пламени в данной работе отношение скоростей распространения в кислородной среде (т. е. при одинаковых значениях  $S_u$ ) в шарах диаметром 1.27 см ( $d_{h1} = 0.84$ ,  $v_1 = 300 \text{ см}/\text{с}$ ) и 0.6 см ( $d_{h2} = 0.27$ ,  $v_2 = 250 \text{ см}/\text{с}$ ) составляет  $v_1/v_2 \approx 1.2$ , а отношение квадратов гидравлических диаметров  $d_{h1}^2/d_{h2}^2 \approx 9.7$ . То есть, хотя тенденция роста скорости с увеличением гидравлического диаметра одинакова, количественно эта зависимость значительно слабее, аналогия с пламенем в гомогенной смеси является неполной. Механизм распространения пламени, по-видимому, другой.

Будем считать, как и в работе [6], что при распространении пламени над пленкой жидкого топлива ведущей точкой, наиболее выдающейся в сторону распространения пламени и наиболее близко находящейся к жидкой фазе, является точка, перед которой имеет место стехиометрическое соотношение концентраций топлива и окислителя. Из рис. 3, 4 видно, что скорость зависит от концентрации кислорода и диаметра шаров ПС. В работе [22] показано, что скорость распространения пламени над поверхностью жидкости линейно зависит от стехиометрической концентрации топлива при данной концентрации кислорода. Поэтому мы попытаемся связать скорость распространения пламени с нормальной скоростью гомогенной стехиометрической смеси данного топлива и окислителя, с характерным размером канала ПС и нормальной скоростью пламени. Из этих величин можно составить безразмерный комплекс  $c_{st} \frac{S_u d_h}{\nu} = c_{st} Pe_{S_u}$  в качестве независимой переменной, а в качестве функции принять  $Pe_v = v d_h / \nu$ . В этих выражениях  $c_{st}$  характеризует энергетику смеси в ведущей

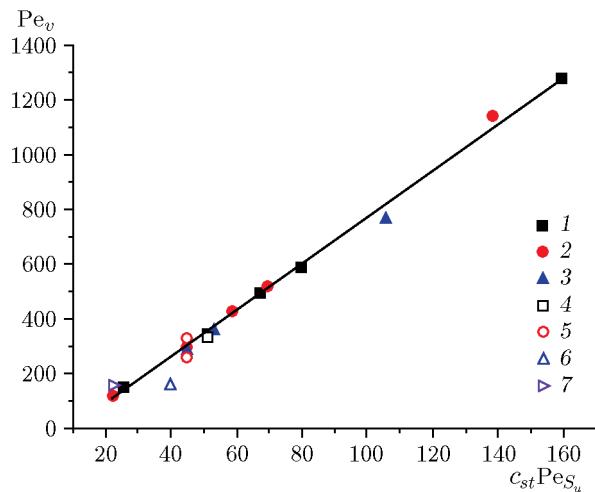


Рис. 6. Зависимость  $Pe_v(c_{st}Pe_{S_u})$ :

число  $Pe_v$  построено по скорости распространения пламени в пористой среде,  $c_{st}Pe_{S_u}$  — по нормальной скорости, соответствующей гомогенной стехиометрической смеси и концентрации топлива в стехиометрической смеси; 1–3 — стальные шары: 1 — 100 %  $O_2$ , 2 — 90 %  $O_2$ , 3 — 75 %  $O_2$ ; 4–6 — керамические шары: 4 — 100 %  $O_2$ , 5 — 90 %  $O_2$ , 6 — 75 %  $O_2$ ; 7 — полиэтиленовые гранулы, 90 %  $O_2$

точке или, другими словами, температурный напор, вызывающий нагрев и испарение жидкой фазы. Число  $Pe_{S_u}$  характеризует, насколько далеко от предела распространения пламени в ПС находится данная гомогенная стехиометрическая смесь. Число  $Pe_v$  характеризует отношение потоков тепла, переносимых конвекцией  $vc_p\rho(T - T_0)$ , и потока тепла (теплопотери) в твердую фазу  $\lambda(T - T_0)/d_h$ .

Из рис. 6 видно, что экспериментальные данные, представленные на рис. 3 и в обработанном виде приведенные на рис. 6, имеют значительно меньший разброс: величина достоверности аппроксимации всех данных на рис. 3  $R^2 = 0.1$ , а на рис. 6  $R^2 = 0.99$ .

Следует также отметить, что рост скорости пламени по мере его распространения указывает на возможность дальнейшего увеличения скорости с возможностью перехода в режим распространения пламени со скоростями порядка скорости звука. Согласно работе [24] переход легче осуществляется в условиях высокого гидравлического сопротивления. На это также указывает то, что в эксперименте с самыми мелкими гранулами (0.3 см) в среде с содержанием кислорода 100 % произошел переход в высокоскоростной режим, что привело к разрушению кварцевой трубы. В ПС из крупных

шаров гидравлическое сопротивление меньше и этого перехода не наблюдалось, по-видимому, из-за недостаточной длины экспериментальной трубы.

## ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное исследование распространения пламени над пленкой жидкого топлива на поверхности твердой фазы в условиях, когда давление паров жидкости ниже бедного предела, а твердая фаза представлена в виде гранулированной пористой среды. Исследовался режим распространения пламени со скоростями порядка нормальной скорости гомогенной стехиометрической смеси.

Выполнено экспериментальное исследование влияния размера характерного элемента пористой среды и концентрации кислорода в газовой фазе на скорость распространения пламени в пористых средах, смоченных *n*-бутанолом.

Показано, что скорость пламени растет с увеличением концентрации кислорода и характерного размера элемента пористой среды.

При высоких скоростях распространения пламени скорость не зависит от теплофизических параметров пористой среды. При более низких скоростях (при меньшем содержании кислорода) скорость выше в материалах с более низкой теплопроводностью.

В пористой среде из крупных шаров скорость пламени возрастает по мере его распространения. Чем крупнее шар, тем выше зависимость скорости от пройденного расстояния. Чем меньше размер шара, тем слабее эта зависимость.

При высоких концентрациях кислорода скорость распространения пламени в пористой среде выше нормальной скорости гомогенной стехиометрической смеси.

Проведено обобщение полученных экспериментальных данных в виде линейной зависимости  $Pe_v$  от  $Pe_{S_u}$ .

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Институту химической кинетики и горения СО РАН (номер госрегистрации FWGF-2021-0001).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров: пер. с англ. / под ред. Ю. А. Кошмарова, В. Е. Макарова. — М.: Стройиздат, 1990.
2. McIntosh A. C., Bains M., Crocombe W., Griffiths J. F. Autoignition of combustible fluids in porous insulation materials // Combust. Flame. — 1991. — V. 99, N 3-4. — P. 541–550. — DOI: 10.1016/0010-2180(94)90047-7.
3. Стрижевский И. И., Заказнов В. Ф. Промышленные огнепрергадители. — М.: Химия, 1974.
4. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: справочник / под ред. Н. Ф. Дубовкина. — М.: Химия, 1985.
5. Лямин Г. А., Пинаев А. В. Гетерогенная детонация (газ — пленка) в пористой среде. Область существования и пределы // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 5. — С. 102–108. — EDN: ZVBOQR.
6. Babkin V. S., Korzhavin A. A., Bunev V. A. Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media // Combust. Flame. — 1991. — V. 87, N 2. — P. 182–190. — DOI: 10.1016/0010-2180(91)90168-B.
7. Коржавин А. А., Бунев В. А., Бабкин В. С. О существовании режима низкоскоростного распространения пламени в инертной пористой среде, смоченной углеводородным топливом // Докл. АН. — 1994. — Т. 337, № 3. — С. 342–344.
8. Коржавин А. А., Бунев В. А., Бабкин В. С. Распространение пламени в пористых средах, смоченных топливом // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 76–85.
9. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Тимофеев Е. И. Взаимодействие пленки жидкости с высокоскоростным газовым потоком за ударной волной // Физика горения и взрыва. — 1984. — Т. 20, № 5. — С. 107–114.
10. Коржавин А. А., Бунев В. А., Гордиенко Д. М., Бабкин В. С. Поведение пламен, распространяющихся по пленкам жидкости на металлических подложках // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 3. — С. 15–18.
11. 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. — EDN: ORFGEX.
12. 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. — EDN: OPWKUD.
13. 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 // Proc. of the 3rd Int. Seminar on Fire and Explosion Hazards, Centre for Research in Fire and Explosion Studies, Univ. of Central Lancashire, Preston, UK, 2001. — P. 379–388.
14. Коржавин А. А., Намятов И. Г., Бунев В. А., Бабкин В. С. Взаимодействие двух диффузионных пламен, распространяющихся вдоль металлической подложки, смоченной различными топливами // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 6. — С. 28–37. — EDN: OJMHGL.
15. Коржавин А. А., Вьюн А. В., Кауткина Н. А., Намятов И. Г., Бабкин В. С. Свободно-конвективный режим распространения пламени над пленкой топлива на подложке // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 21–30. — EDN: OEELFV.
16. Коржавин А. А., Кауткина Н. А., Намятов И. Г. Распространение пламени над пленками топлива при встречном потоке газа // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 37–43. — EDN: MRMKNP.
17. 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. — EDN: PDIUET.
18. Намятов И. Г., Коржавин А. А. Распространение пламени над пленкой жидкого топлива на подложке с низкой теплопроводностью // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 4. — С. 29–37. — DOI: 10.15372/FGV20210403. — EDN: RUSSPO.
19. 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. — EDN: SKIOWR.
20. 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. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.043.
21. Замащиков В. В. О механизме распространения пламени над поверхностью горючей жидкости // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 6. — С. 12–16. — DOI: 10.15372/FGV20200602. — EDN: LEGGGC.
22. Намятов И. Г., Коржавин А. А. Распространение пламени над пленкой жидкого топлива в среде, обогащенной кислородом // Физика горения и взрыва. — 2023. — Т. 59, № 1. — С. 43–53. — DOI: 10.15372/FGV20230104. — EDN: QSFKXZ.
23. Коржавин А. А., Бунев В. А., Абдуллин Р. Х., Бабкин В. С. О зоне пламени при горении газа в инертной пористой среде // Физика горения и взрыва. — 1982. — Т. 18, № 6. — С. 20–23.
24. Бабкин В. С., Коржавин А. А. Контроль перехода дефлаграции в детонацию в системах с сопротивлением // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 5. — С. 75–84. — EDN: OOFQZP.

Поступила в редакцию 20.04.2023.

После доработки 08.06.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.