

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОВОГО ПЛАМЕНИ В УЗКИХ ТРУБКАХ

В. В. Замашников

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

Исследована зависимость кривизны фронта пламени от состава смеси в трубках разного диаметра. Измерены скорости распространения волны горения при разном содержании горючего в смеси. Показано, что зависимость скорости от состава смеси имеет два максимума, один из которых связан с переходом ламинарного режима горения в турбулентный. Турбулизация горения обусловлена неустойчивостью пламени к акустическим колебаниям. Проведены наблюдения за изменениями формы волны горения при возникновении акустических колебаний.

Ключевые слова: колебание пламени, турбулентное горение, форма пламени, влияние кривизны на скорость горения, горение в узких каналах.

ВВЕДЕНИЕ

Форма поверхности волны горения, распространяющейся по трубе, зависит от распределения скорости горючего газа по сечению трубы, а также от свободно-конвективного движения продуктов сгорания и устойчивости фронта пламени [1–5]. Например, в работе [3] наблюдались ячейчатые пламена. При определенных условиях в трубах возбуждаются акустические колебания. При этом поверхность и видимая скорость пламени изменяются. Под действием звука на поверхности пламени могут образовываться ячейки. Принято считать, что они возникают вследствие неустойчивости фронта горения по отношению к ускоренному движению [3].

Большая часть экспериментов проводилась в широких трубках. В узких трубках, диаметр которых сравним с толщиной пламени (т. е. близок к критическому), большую роль в формировании поверхности фронта горения играют теплопотери в стенку трубки. Размер пламени в таких трубках мал, и его кривизна достаточно большая. Размер ячеек, наблюдаемых в эксперименте, значительно превосходит толщину пламени, поэтому в трубках, диаметр которых близок к критическому, образование ячеек маловероятно. Однако эффекты, связанные с кривизной, в этих условиях должны проявиться отчетливо. Цель настоящей работы — попытаться выяснить, под действием

каких процессов формируется поверхность горения в узких трубках и как влияет кривизна поверхности на процесс распространения пламени.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились в горизонтально расположенных трубках с внутренним диаметром $D = 3,2, 5,1$ и $7,0$ мм. Один конец трубки открыт, другой присоединен к системе подачи горючей смеси. В качестве горючего газа использовались пропановоздушные смеси, которые готовились в смесителе по пар-

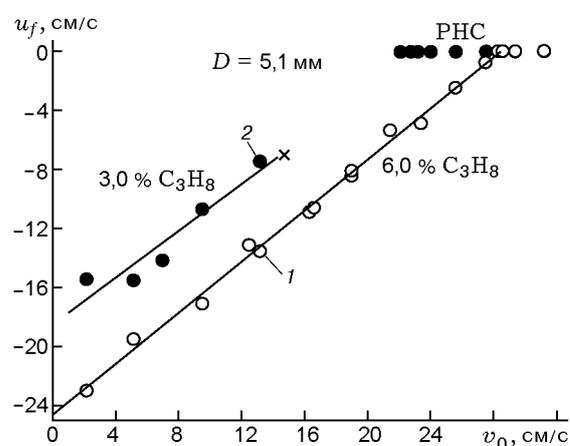


Рис. 1. Зависимость средней видимой скорости распространения пламени от скорости движения горючего газа в центре трубки для двух смесей:

РНС — режим низких скоростей, × — гашение пламени

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 03-03-32357).

циальным давлениям и конвективно перемещивались. Расход газа определялся по перепаду давления в узком канале, измеряемому с помощью U-образного масляного манометра. Расход регулировался натекателем. Точность приготовления смеси 0,1 % об. Систематическая погрешность измерения расхода горючего газа, обусловленная точностью тарировки, составляла $\pm 15\%$, случайная погрешность измерения расхода газа $\pm 3\%$. Средняя скорость распространения пламени в трубке измерялась с помощью двух фотодиодов, установленных вблизи ее концов на расстоянии ≈ 20 см друг от друга. Сигналы с фотодиодов после усиления поступали на частотомер ЧЗ-33, который измерял время между двумя импульсами. Ниже на экспериментальных графиках приведены скорости, соответствующие нулевым расходам. Их определяли следующим образом. Строились зависимости видимой скорости от расхода горючего газа, как правило, экспериментальные точки ложились на прямую линию (рис. 1). Прямая линия продолжалась до нулевых расходов, и определялась скорость, соответствующая покоящейся горючей смеси. Распространение пламени фиксировалось видеокамерой Hitachi VM 7380E. Точность измерения скорости $\pm 15\%$. Эксперименты (при температуре $18 \div 23$ °С и атмосферном давлении) проводили следующим образом: устанавливался нужный расход, настраивался частотомер, запускалась видекамера и после этого осуществлялся поджиг смеси у открытого конца трубы.

ФОРМА ФРОНТА ПЛАМЕНИ

Прежде всего, отметим, что в тех случаях, когда акустические колебания, порожденные горением, были малы, поверхность пламени при его распространении по трубке если и менялась, то незначительно. Если возбуждались интенсивные акустические колебания, то они усиливались по мере перемещения пламени вдоль трубы, поэтому измерения формы поверхности пламени в этом случае проводились на начальном участке, где колебания малы. Обработка видеоматериала показала, что пламя либо аксиально-симметричное, либо имеет наклон вследствие влияния свободной конвекции [1, 2]. Наклон появляется при уменьшении видимой скорости, т. е. при достаточно больших расходах. Причем чем больше внутренний диаметр трубы, тем в большем диапазоне расхо-

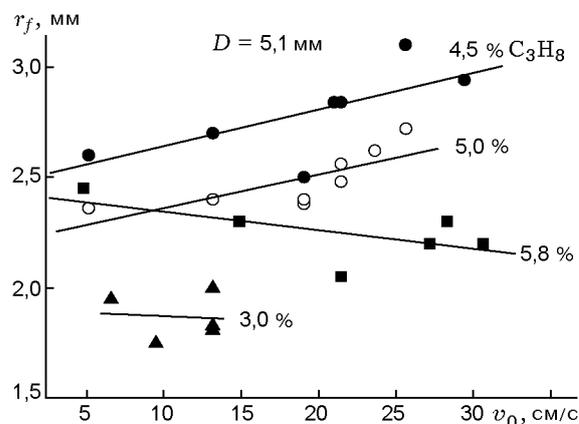


Рис. 2. Зависимости радиуса поверхности фронта пламени от скорости горючего газа в центре трубки для разных смесей

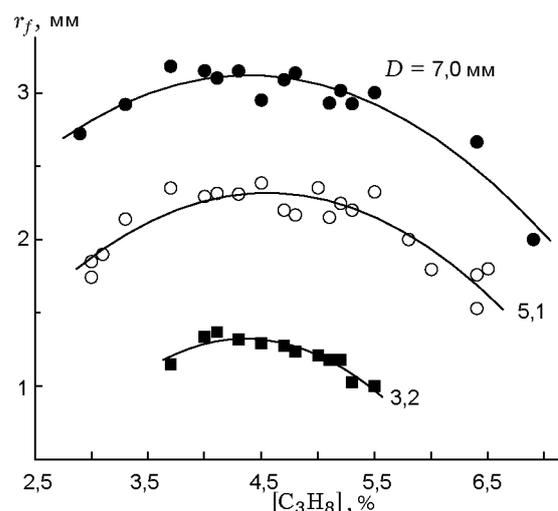


Рис. 3. Зависимости радиуса поверхности фронта пламени от объемного содержания пропана в смеси

дов и составов смесей наблюдаются наклонные пламена. Поверхности симметричных пламен аппроксимируются частью сферы. Отклонение от сферы имеется лишь у стенки трубки, где пламя от нее «отходит», становясь более плоским. Зависимость радиуса этой сферы от расхода горючего газа для симметричных пламен показана на рис. 2. Видно, что при существенном изменении расхода кривизна пламени меняется незначительно. На рис. 3 приведены зависимости радиуса фронта пламени от состава смеси для трех трубок. Поскольку кривизна пламени хоть и слабо, но зависит от расхода

горючего газа (см. рис. 2), измерения проводились при малых расходах. Видно, что все кривые подобны. Радиус кривизны уменьшается при приближении к верхнему и нижнему концентрационным пределам.

Если поверхность пламени при его распространении не изменяется, видимые скорости каждой точки пламени одинаковы. Видимая скорость перемещения каждой точки поверхности пламени складывается из нормальной скорости и скорости движения газа в этой точке. Таким образом, форма волны горения определяется зависимостью нормальной скорости и скорости движения газа от радиальной координаты. Представляет интерес установить причины зависимости нормальной скорости от радиальной координаты и выяснить, влияет ли движение горючего газа на форму волны горения, распространяющейся по узкой трубке. Остановимся на симметричных пламенах (наклонные пламена возникают вследствие наложения свободной конвекции на процессы в симметричных пламенах). Рассмотрим чувствительность формы фронта пламени к изменению расхода горючего газа (см. рис. 2). Видно, что при изменении скорости горючего газа почти в 6 раз радиус изменяется менее чем в 1,2 раза. Скорее всего, именно зависимость нормальной скорости от радиальной координаты играет решающую роль при формировании поверхности горения, во всяком случае при небольших расходах горючего газа. Нормальная скорость изменяется от стенки трубки к центру, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, из-за того, что диаметр трубок близок к критическому, температура во фронте пламени заметно понижается от центра к стенке трубки вследствие теплового потока. Второй причиной может быть зависимость нормальной скорости от кривизны пламени. Известно, что эта зависимость изменяется при изменении состава смеси [3, 6]. Считается, что по этой причине на поверхности богатых пропановоздушных пламен появляются ячейки [3]. В настоящей работе ячейки не наблюдались, но если на формирование поверхности волны горения, распространяющейся по узкой трубке, оказывают влияние процессы, связанные с кривизной, то следовало бы ожидать каких-либо особенностей в поведении кривых в богатой области на рис. 3. Сравним поведение кривых для бедных и богатых смесей (стехиометрии соответствуют смеси с 4,02 % пропана). При обеднении смеси ра-

диус поверхности пламени заметно падает, тогда как при обогащении он почти не изменяется вплоть до значения $[C_3H_8] = 5\%$. Можно предположить, что такое поведение радиуса поверхности пламени в богатой области как раз и обусловлено зависимостью нормальной скорости от кривизны. Однако в области смесей, где наблюдается эта особенность, отмечаются наиболее сильные акустические колебания. В связи с этим, несмотря на то, что измерения проводились при еще незначительных колебаниях, нельзя полностью исключить их влияние на форму поверхности пламени. В пользу того, что этот эффект все-таки связан не с колебаниями, свидетельствует и тот факт, что такое поведение наблюдается для всех трубок, а амплитуда колебаний сильно зависит от диаметра трубки. Итак, вероятнее всего, зависимость нормальной скорости от кривизны оказывает влияние на формирование формы поверхности горения, однако главную роль здесь, скорее всего, играет изменение нормальной скорости от центра к стенке трубки из-за теплопотерь в стенку трубки. В пользу этого предположения говорит тот факт, что при приближении к концентрационным пределам возрастают теплопотери из фронта пламени и должна увеличиваться его кривизна, что и наблюдается в эксперименте (см. рис. 3).

Отметим, что искривление фронта пламени приводит к уменьшению теплопотерь из центральной части и, как следствие, к увеличению нормальной скорости по сравнению со случаем неискривленного фронта. При приближении к концентрационным пределам нормальная скорость уменьшается, при этом теплопотери из фронта пламени возрастают. Пламя дальше отступает от стенки, радиус пламени уменьшается (см. рис. 3), температура в центре уменьшается, но не так сильно, как в случае, когда кривизна не меняется. Все большее искривление пламени при приближении к концентрационным пределам может даже привести к расширению пределов по сравнению со случаем, когда кривизна пламени постоянна.

Возникает вопрос об устойчивости симметричного искривленного пламени, распространяющегося в узкой трубке. По всей видимости, в узкой трубке устойчивость пламени обусловлена не только затуханием малых возмущений, согласно теории Маркштейна. Малые возмущения поверхности пламени могут вызвать нарушение симметрии линий тока га-

за, но благодаря стенке трубки возникает сила, стремящаяся восстановить симметрию. Кроме того, при нарушении симметрии изменяются тепловые потоки в стенку трубки, что также может способствовать затуханию малых возмущений, т. е. обеспечивать устойчивость пламени.

АКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Распространение пламени сопровождалось звуком. Интенсивность звуковых колебаний зависела от диаметра трубки и состава смеси. Согласно [7] энергия для возбуждения колебаний может черпаться либо из тепловой энергии химической реакции, либо из кинетической энергии движущегося свежего газа. При распространении пламени от открытого конца трубы сначала должны возникать высокочастотные собственные колебания газа, т. е. те колебания, у которых пучность давления лежит ближе к открытому концу [7, с. 227]. Однако более высокие гармоники возбуждаются труднее, чем низкие, поэтому часто в первую очередь возникают гармоники, самые близкие к основной, затем основная [7].

Длина трубок, в которых проводились эксперименты, ≈ 32 см. Поэтому во всех трех трубках частоты возбуждаемых продольных колебаний были почти одинаковые: $\approx 280 \div 300$ Гц. При проведении эксперимента один конец трубок всегда был открыт, через второй подавалась горючая смесь, так что собственные частоты колебаний могли зависеть от системы подачи горючего газа. Эксперименты показали, что самые интенсивные акустические колебания наблюдаются для смеси с $\approx 5\%$ пропана независимо от внутреннего диаметра трубки. С уменьшением диаметра при прочих равных условиях интенсивность звука падает. При увеличении расхода горючего газа звук также становится тише. Частота возбуждаемых колебаний близка к частоте основной гармоники. Ее можно вычислить по приближенной формуле для открытой с горячего конца и закрытой с другого конца трубки [3, с. 191]: $\operatorname{tg}(\omega(x-L)/c_u) \operatorname{tg}(\omega x/c_b) = -\rho_u c_u / \rho_b c_b$, где ω — угловая частота, x — координата пламени, L — длина трубы, ρ_u , c_u — плотность и скорость звука, соответствующие свежей смеси, ρ_b , c_b — плотность и скорость звука, соответствующие продуктам горения. Для условий эксперимента $x = 0,21$ м (координата, в

которой наблюдалась максимальная сила звука), $L = 0,32$ м, $\rho_u c_u / \rho_b c_b = \sqrt{7}$, частота равна 275 Гц, что немного меньше значения, полученного в эксперименте. По всей видимости, пучность давления находится не у самого края трубки, а где-то в последней трети, считая от открытого конца. Более высокие гармоники не возбуждаются, вероятно, из-за низкой добротности акустического резонатора, которая уменьшается с уменьшением диаметра трубки.

При распространении пламени вдоль трубки акустические колебания постепенно усиливались и достигали максимума на расстоянии $(1/2 \div 2/3)L$ считая от открытого конца. При этом средняя видимая скорость перемещения фронта горения уменьшалась, а фронт становился более плоским. Видеосъемка показала, что пламя колеблется как целое, т. е. без заметного изменения поверхности за период колебаний, вплоть до области, где амплитуда колебаний достигла максимума. Фронт во время колебаний остается симметричным. В области, где наблюдалась максимальная амплитуда вибраций, поверхность фронта горения изменялась: пламя выгибалось в сторону свежей смеси, поверхность увеличивалась, затем фронт становился почти плоским, но никогда не прогибался в противоположную сторону, т. е. в сторону продуктов горения. Отметим, что пламя при колебаниях с изменением поверхности также оставалось симметричным. Сила звука, амплитуда колебаний и поведение пламени после прохождения этой зоны зависели от диаметра трубки и от состава смеси. Для смесей, близких к составу $[\text{C}_3\text{H}_8] = 5\%$, в трубке диаметром 7 мм после того, как пламя становилось почти плоским в фазе увеличения поверхности, фронт горения резко ускорялся, происходила турбулизация горения. На рис. 4, б первый кадр соответствует моменту перед турбулизацией, следующий — турбулентному горению. Съемка проводилась с применением прерывателя (перед объективом камеры устанавливался вращающийся диск с прорезями), поэтому за время одного кадра фиксировалось несколько изображений светящегося фронта. На первом кадре видны колебания пламени. В трубке диаметром 3,2 мм турбулизация не происходила: пламя проходило место, в котором наблюдалась максимальная амплитуда колебаний, колебания затухали, видимая скорость

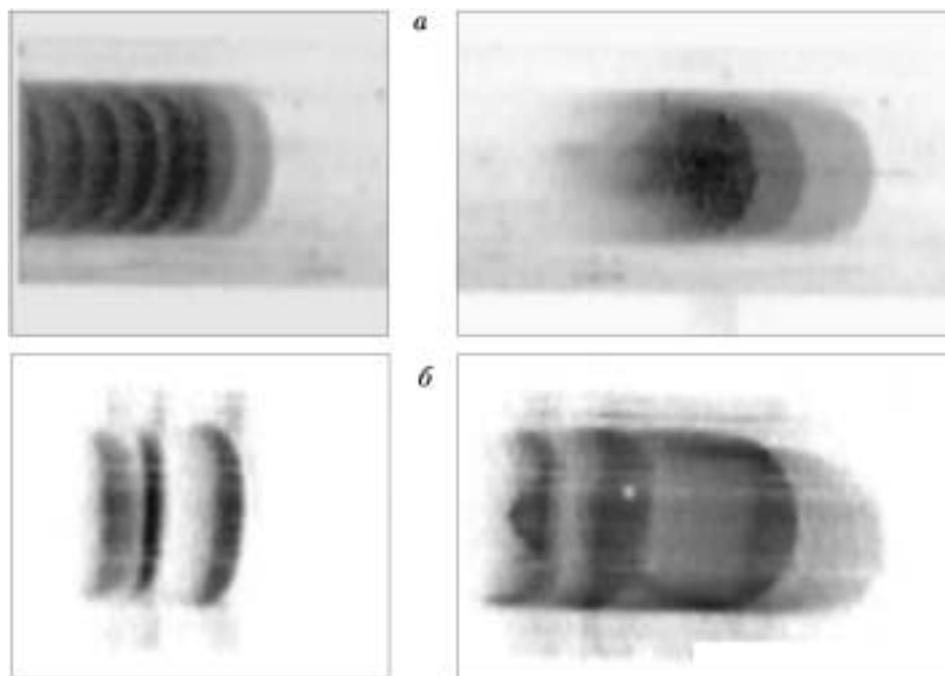


Рис. 4. Последовательные кадры съемки:

частота 25 кадр/с, смесь 5 % C_3H_8 + воздух, *a* — момент гашения в трубке диаметром 5,1 мм, *б* — момент перехода из ламинарного в турбулентный режим в трубке диаметром 7,0 мм

возрастала. В трубке диаметром 5,1 мм пламя в этом месте гасло, причем в тот момент, когда поверхность пламени максимальна. На рис. 4, *a* показаны два последовательных кадра. Второй кадр соответствует моменту гашения. Съемка проводилась без применения прерывателя. На первом кадре наблюдаются полосы, возникающие вследствие колебания пламени. Дополнительная съемка с применением прерывателя показала, что пламя колеблется без заметного изменения поверхности пламени, т. е. как целое. Отметим, что частота колебаний пламени совпадает с частотой звука. Наблюдаемые явления имели место во всем исследуемом диапазоне расходов горючего газа.

При возникновении акустической стоячей волны в трубке, столб газа колеблется таким образом, что у открытого конца плотность газа почти не меняется, зато изменяется скорость его движения. В области, пучности давления, наоборот, скорость меняется незначительно, зато газ претерпевает максимальное сжатие и расширение. Естественно предположить, что по мере перемещения пламени от открытого конца трубки к месту расположения пучности

давления стоячей волны колебания фронта горения как целого должны сменяться колебаниями с изменением площади поверхности пламени, что и наблюдалось в большинстве экспериментов. Необходимо отметить, что, когда пламя находится в области пучности давления, изменение его поверхности происходит не только за счет расширения или сжатия газа, но и благодаря зависимости нормальной скорости от кривизны и растяжения пламени.

Одной из причин постепенного замедления пламени при перемещении от открытого конца к месту, где наиболее интенсивные акустические колебания, может быть уменьшение его поверхности. При уменьшении поверхности падает массовая скорость горения горючей смеси и, как следствие, изменяется скорость движения газа перед фронтом пламени. Если рассматривать ведущую точку фронта в центре трубки, то видимая скорость ее перемещения складывается из нормальной скорости и скорости движения горючего газа. Нормальная скорость также может изменяться при уплощении пламени вследствие ее зависимости от кривизны и изменений теплопотерь в стенку. Кроме того, по мере усиления звука все большая часть

энергии химической реакции идет на поддержание акустических колебаний, в результате все больше понижается температура продуктов горения. Снижение температуры продуктов может привести к уменьшению нормальной скорости и коэффициента расширения. Необходимо отметить, что в работе [3, с. 78] также указывалось на уменьшение скорости распространения пламени при его колебаниях с малой амплитудой.

Причиной гашения пламени в трубке диаметром 5,1 мм, когда оно, распространяясь вдоль трубки, достигает области наиболее интенсивных акустических колебаний, может быть растяжение пламени в условиях существенных теплопотерь. В трубке меньшего диаметра пламя растягивается незначительно, поскольку амплитуда акустических колебаний мала и гашения нет. В трубке большего диаметра пламя растягивается сильно, но так как теплопотери в стенку трубки меньше, гашение тоже не наблюдается.

Согласно принципу Рэлея [7] для возбуждения колебаний должен изменяться теплоподвод. Остается неясным, как возбуждаются колебания в случае, когда пламя совершает периодическое движение как целое, т. е. его площадь не изменяется во время пульсаций. Если не изменяется площадь фронта, то и теплоподвод остается постоянным. В работах [3, 8] колебания всегда сопровождалось изменением площади поверхности фронта горения. Можно предположить, что в нашем случае на генерацию колебаний расходуется кинетическая энергия движущейся свежей смеси, однако такие колебания пламени наблюдаются также при расходах свежей смеси, близких к нулю. Скорее всего, площадь все-таки изменяется, но незначительно, так что на видеокдрах этого не видно (из-за размытости изображения). В случае реального газа (с вязкостью и теплопроводностью) стоячая звуковая волна не является плоской, а имеет мгновенный профиль переменной составляющей скорости газа (имеется в виду, что может быть постоянная составляющая, когда расход свежего газа отличен от нуля). У стенок трубы скорость всегда равна нулю, а в центре профиль скорости газа плоский. Между стенкой и областью плоской волны имеется область, где скорость изменяется от нуля до значения скорости в плоской части в данный момент времени. Толщина этой области $h = 1,3/\nu^{1/2}$ [см] [8, с. 405]. Для нашего случая

$\nu = 280$ Гц, $h = 0,078$ см. Толщина пристеночного слоя сравнима с расстоянием, на которое пламя отстает от стенки трубки. Возможно, при колебаниях пламени как целого изменяется поверхность фронта горения в пристеночной области, где свечение слабое и видеокамера его не регистрирует.

Необходимо отметить особенное, отличное от описанного выше, поведение пламен смесей, содержащих $\approx 5\%$ C_3H_8 , при больших расходах горючего газа. Устойчивые интенсивные колебания возникали сразу после инициирования горения у открытого конца. Медленное перемещение пламени вдоль трубки сопровождалось устойчивыми колебаниями пламени с частотой $280 \div 300$ Гц, при этом интенсивность колебаний если и изменялась, то незначительно. В отличие от описанного выше случая площадь пламени при колебаниях менялась. Когда фронт достигал области пучности давления (область наиболее интенсивных колебаний для случаев, описанных выше), возникали бегущие колебания. Возможно, что в этом случае изменяется механизм возникновения колебаний. Если при небольших расходах энергия для возбуждения колебаний черпается из тепловой энергии, выделяемой в результате химической реакции, то в данном случае она берется из кинетической энергии движущего горючего газа.

ВИДИМАЯ СКОРОСТЬ

На рис. 1 приведены зависимости видимой скорости от скорости горючего газа в центре трубки ($v_0 = 2\langle v \rangle$, $\langle v \rangle = Q/\pi R^2$, Q — расход, R — радиус трубки). Предполагалось, что профиль скорости горючего газа является пуазейлевским. Видно, что зависимости неплохо аппроксимируются прямой линией. При увеличении расхода видимая скорость уменьшается и, когда она становится достаточно малой, наблюдается переход в режим низких скоростей (кривая 1) [9]. Необычное явление наблюдается при приближении к пределу по составу смеси. Когда расход небольшой, пламя способно распространяться по трубке, но начиная с определенного расхода наблюдается гашение, и только при достаточно больших расходах пламя опять распространяется по трубке, но уже в режиме низких скоростей (см. рис. 1, кривая 2). Причина такого поведения пока не ясна. Как уже упоминалось выше, поверхность пламени при распространении в узкой трубке вогнута в

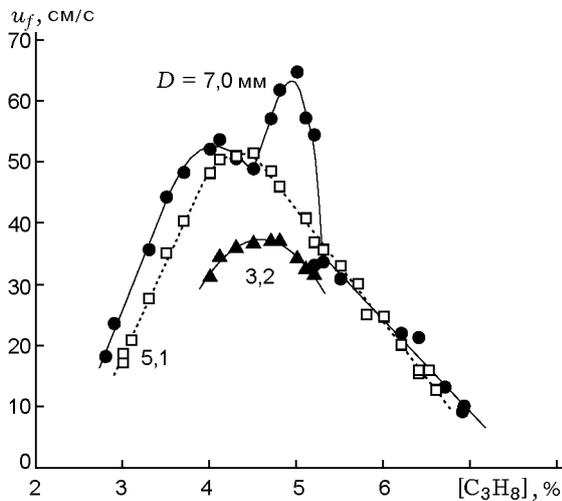


Рис. 5. Зависимость видимой скорости распространения пламени, отнесенной к нулевому расходу горючего газа, от содержания пропана

область свежей смеси и аппроксимируется частью сферы. В связи с тем, что профиль скорости горючего газа пуазейлевский, можно ожидать, что увеличение расхода вызовет уплотнение фронта пламени, что приведет к увеличению теплопотерь из зоны горения и к гашению пламени. Однако радиус сферы, которой аппроксимируется поверхность пламени, с увеличением расхода возрастает только для смесей с максимальной нормальной скоростью (см. рис. 2). При приближении к пределу по составу смеси радиус (в пределах экспериментальной ошибки) либо совсем не меняется, либо даже уменьшается (см. рис. 2).

Факт турбулизации горения проявился в поведении зависимости средней скорости распространения пламени от состава смеси (рис. 5). На рис. 5 для трубки диаметром 7,0 мм наблюдается два максимума. Резкий высокий экстремум как раз связан с турбулизацией пламени, вызванной акустическими колебаниями. Второй экстремум соответствует максимуму скорости для случая, когда пламя не турбулизуется. Этот максимум определяется составом смеси и, по всей видимости, кривизной пламени. Максимумы смещены относительно друг друга. Это можно объяснить тем, что для перехода из ламинарного в турбулентный режим (устойчивость искривленного пламени к акустическим возмущениям) важно не только значение нормальной скорости, но и состав сме-

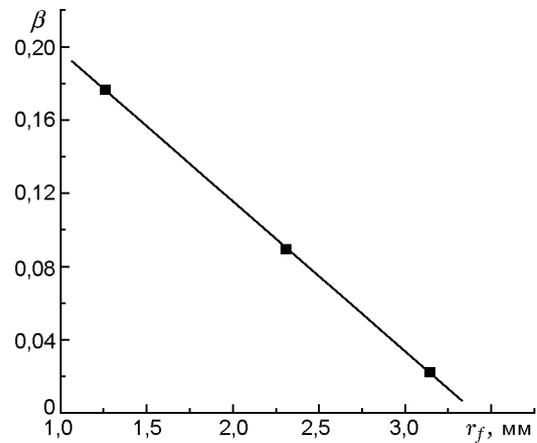


Рис. 6. Смещение максимума ламинарной скорости β при изменении радиуса поверхности фронта пламени

си. По мере обогащения смеси пропаном, с одной стороны, фронт пламени становится менее устойчивым, а с другой стороны, нормальная скорость уменьшается, и при каком-то составе реализуются наилучшие условия для турбулизации пламени. В трубке диаметром 5,1 мм второго максимума не наблюдается, переход из ламинарного режима в турбулентный не происходит. Мало того, как упоминалось выше (см. рис. 4, а), пламя смеси с 5,0 % пропана гаснет. В трубке диаметром 3,2 мм пламя распространяется без существенных особенностей. Как и следовало ожидать, диапазон существования пламени по составу смеси сужается при уменьшении диаметра трубки.

Содержание пропана, соответствующее максимуму скорости для ламинарного пламени, зависит от диаметра трубки. При уменьшении диаметра максимум скорости смещается в богатую область. Такое поведение вполне объяснимо, если считать, что нормальная скорость зависит от кривизны пламени. А эксперименты показали, что кривизна пламени увеличивается с уменьшением диаметра трубки. На рис. 6 приведена зависимость радиуса поверхности фронта пламени от коэффициента $\beta = (C - C_0)/C_0$, где C — содержание пропана в смеси, соответствующей максимальной ламинарной скорости распространения пламени; C_0 — концентрация пропана в стехиометрической смеси. Точки неплохо ложатся на прямую линию, но экспериментальных данных очень мало для того, чтобы делать какие-либо далеко идущие выводы.

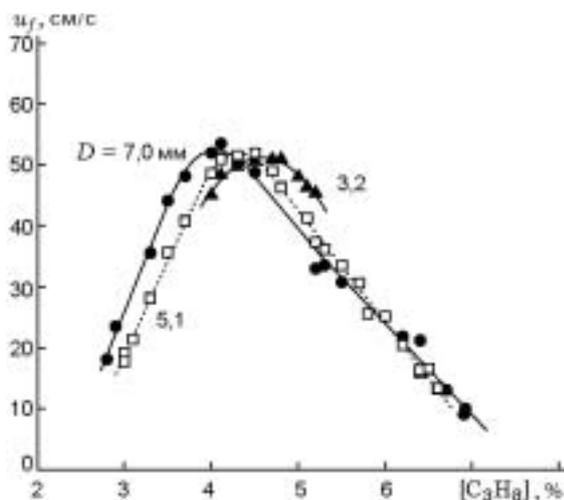


Рис. 7. Зависимости видимой скорости распространения пламени от содержания пропана, приведенные к одной максимальной скорости

Как видно на рис. 5, если не брать во внимание максимум, связанный с турбулентным горением, зависимости скорости пламени от состава смеси с уменьшением диаметра трубки смещаются вниз и вправо. Кривые при наложении друг на друга почти совпадают, отклонение наблюдается только в богатой области. При $[C_3H_8] > 5,5\%$ в трубках меньших диаметров скорость падает быстрее. Смещение зависимости скорости от состава смеси вниз связано, прежде всего, с возрастанием теплопотерь при уменьшении диаметра трубки. Однако маловероятно, что увеличение теплопотерь вызывает сдвиг этой зависимости в богатую область. Смещение кривой вправо, вероятнее всего, обусловлено явлениями, связанными с кривизной пламени. Правда, эти явления могут вызвать перемещение зависимости не только вправо, но и вниз, хотя это смещение, скорее всего, будет гораздо меньше, чем обусловленное ростом теплопотерь из фронта пламени. Поэтому в первом приближении, считая, что изменение кривизны приводит только к сдвигу кривой вправо (рис. 7), можно получить зависимость скорости от кривизны. Как видно из рис. 7, в бедной области ($[C_3H_8] < 4,02\%$) увеличение кривизны пламени при уменьшении диаметра трубки вызывает уменьшение скорости. При приближении к области, соответствующей максимальным скоростям, картина постепенно меняется, так что в конечном ито-

ге увеличение кривизны уже вызывает увеличение скорости. И только при приближении к верхнему концентрационному пределу разница скоростей для трубок разного диаметра уменьшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что вероятнее всего форма симметричного фронта пламени в узких трубках определяется теплообменом между пламенем и стенками трубки. Зависимость нормальной скорости от кривизны пламени и скорости движения горючего также оказывает влияние на форму, но это влияние не является определяющим. Пламя устойчиво, т. е. малые возмущения, возникающие на поверхности пламени, затухают. Реакция пламени на деформации зависит от состава смеси. В смеси, содержащей $\approx 5\%$ пропана, возникает наиболее сильная положительная обратная связь между колебанием давления и массовой скоростью сгорания, что приводит к возбуждению акустических колебаний. При акустических вибрациях пламя сохраняет устойчивость до тех пор, пока амплитуда колебаний не достигнет определенного уровня, после чего наблюдается переход в турбулентный режим. Можно предположить, что переход в турбулентный режим связан с потерей устойчивости пламенем вследствие его ускоренного движения. В более узких трубках амплитуда колебаний мала и переход в турбулентный режим не происходит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968. С. 253–261.
2. Щетинков Е. С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965. С. 244–249.
3. Нестационарное распространение пламени / Под ред. Дж. Г. Маркшейна. М.: Мир, 1968. С. 13–231.
4. Герштейн М. Структура ламинарного пламени // Вопросы горения и детонационных волн: Четвертый Симпозиум (международ.) по вопросам горения и детонационных волн. М.: Гос. изд-во оборон. пром-сти, 1958. С. 35–41.
5. Генош Х., Жуи М. Изменение формы пламени, распространяющихся в трубках // Там же. С. 294–297.
6. Mizomoto M., Asaka Y., Ikai S., Law C. K. Effects of preferential diffusion on the burning intensity of curved flames // Twentieth Symposium (Intern.) on Combustion. 1984. P. 1933–1939.

7. **Раушенбах Б. В.** Вибрационное горение. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. С. 77.
8. **Кэскан В.** Исследование вибрирующих пламен // Вопросы горения и детонационных волн: Четвертый Симпозиум (междунар.) по вопросам горения и детонационных волн. М.: Гос. изд-во оборон. пром-сти, 1958. С. 399–410.
9. **Zamashchikov V. V.** Experimental investigation of gas combustion regimes in narrow tubes // Combust. Flame. 1997. V. 108, N 3.

*Поступила в редакцию 17/VI 2003 г.,
в окончательном варианте — 10/III 2004 г.*
