

УДК 536.46

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАМЕНИ В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОМ ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ

Я. В. Козлов, В. В. Замашников, А. А. Коржавин

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

Экспериментально изучено распространение пламени в закрытом сосуде, содержащем стехиометрическую пропановоздушную смесь и частично заполненным пористой средой. Показано, что предел распространения волн горения в пористой среде определяется текущим давлением при подходе пламени к ней, а также переходными процессами при входе волны в пористую среду. Исследовано явление динамического предела — предела распространения пламени в пористой среде, связанного с непрерывным падением давления. Показано, что область начальных давлений, в которой наблюдается динамический предел, определяется не только изменением числа молей в газовой фазе, как при распространении пламени в сосудах, полностью заполненных пористой средой, но также и охлаждением газа в свободном пространстве. Диапазон начальных давлений, в котором возможна реализация динамического предела, может быть значительно больше, чем обусловленный изменением числа молей. Этот диапазон в основном определяется теплообменом газа со стенками сосуда в области, свободной от пористой среды.

Ключевые слова: пламя, закрытый сосуд, пористая среда.

DOI 10.15372/FGV20190302

ВВЕДЕНИЕ

С точки зрения взрывобезопасности закрытых сосудов, содержащих горючую смесь, одной из важных проблем является предотвращение разрушения сосуда при воспламенении горючей смеси. Существует несколько подходов к решению этой технической задачи, одним из которых является заполнение сосуда пористой средой (ПС).

Возможность распространения пламени внутри ПС зависит от размера пор. Существует критический (гасящий) размер пор: при меньшем размере пламя не способно распространяться. Критический размер пор зависит от нормальной скорости пламени и, таким образом, от вида топлива, окислителя, начальной температуры и давления. При увеличении давления критический размер уменьшается [1].

Известно, что в закрытом объеме, полностью заполненном ПС, в зависимости от размера поры, нормальной скорости, начального давления и температуры горючей смеси пламя распространяется в различных режимах, характеризующихся своим диапазоном скоростей распространения и реализующихся давлений в

волне горения. Обзоры по режимам горения газа в ПС можно найти в [2, 3]. При скоростях распространения до 10 м/с давления, развиваемые в закрытых объемах после воспламенения горючей смеси, можно снизить до безопасных значений [4, 5].

При распространении пламени (волны горения) в сосудах, частично заполненных ПС, имеется ряд особенностей. Характеристики волны горения в свободном пространстве отличаются от ее характеристик в ПС. При входе в ПС происходит перестройка волны горения, при этом может произойти гашение пламени. Поэтому возникает вопрос о возможности распространения пламени в ПС после инициирования горения в свободном пространстве. Распространение волны дефлаграционного горения в свободном пространстве сопровождается повышением давления, поэтому пламя будет входить в ПС при давлении выше начального, и если в этих условиях пламя способно распространяться, то начнется формирование волны горения в ПС. Этот процесс не всегда заканчивается успешно, пламя может погаснуть при входе в ПС [3]. Природа этого явления не ясна. В случае распространения пламени по ПС, если размер ее каналов близок к критическому, пламя проходит некоторое расстояние

и затем гаснет вследствие снижения давления до значений, при которых размер пор становится ниже критического для распространения пламени. Снижение давления обусловлено теплообменом между горячими продуктами горения и твердой фазой. Это явление динамического предела при распространении пламени в закрытом сосуде, полностью заполненном ПС, отмечалось ранее. Диапазон его реализации по начальному давлению очень узок, так как падение давления ограничено разностью между парциальным давлением паров воды в продуктах сгорания в адиабатическом случае (в отсутствие теплообмена) и равновесным давлением паров воды при равновесной температуре продуктов сгорания и ПС, которая во многих случаях близка к начальной [6, 7]. Можно ожидать проявления динамического предела в сосуде, частично заполненном ПС, в случае, если охлаждение продуктов сгорания в свободном пространстве за время распространения пламени по ПС вызовет падение давления в сосуде ниже критического.

Цель работы — экспериментально исследовать процесс входа пламени из свободного пространства в пористую среду и его влияние на величину максимального давления, показать экспериментально возможность расширения динамического предела по начальному давлению горючей смеси в условиях относительно высоких теплотерь из продуктов сгорания в свободном пространстве.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Использовался тот же экспериментальный сосуд, что и в [5], — вертикальная труба квадратного сечения (48×48 мм), длиной 1.68 м с регулярно расположенными окнами, на каждом из которых установлены фотодиоды. Длина трубы позволяла установиться стационарному режиму распространения пламени в ПС, если коэффициент заполнения $k = l/L$ был достаточно велик (где L — длина трубы, l — длина заполненной пористой средой части трубы [5]). От этого коэффициента зависит, прежде всего, максимальное давление, достигаемое в трубе [5]. Основные параметры установки и методика эксперимента приведены в [5].

Эксперимент, как и в [5], проводился следующим образом. Формировалась засыпка определенной высоты из шаров диаметром 6 мм, сосуд вакуумировался, а затем заполнялся гомогенной горючей смесью, заранее приго-

товленной в смесителе высокого давления. В качестве горючей смеси использовалась пропановоздушная (пропан чистотой 99.99 %) с объемной долей пропана 4 %; точность ее приготовления 0.1 %. Диапазон начальных давлений смеси $p_0 = 0.1 \div 0.2$ МПа. Падение давления вследствие конденсации паров воды из продуктов полного сгорания этой смеси было небольшим и составило $0.12p_0$, охлаждение продуктов сгорания в свободном пространстве позволяет получить динамический предел в более широком диапазоне начальных давлений. Поперечный размер трубы обеспечивал достаточный теплообмен продуктов сгорания со стенками в свободном пространстве.

После зажигания горючей смеси электрической искрой вблизи верхнего конца трубы проводилась регистрация текущего давления и сигналов фотодиодов. По полученным данным определялась скорость волны горения. Фиксировались также давление при входе пламени в ПС и максимальное давление, достигаемое в процессе распространения пламени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распространение пламени в трубе, частично заполненной ПС, можно разделить на три стадии. Первая — зажигание горючего газа в объеме без ПС и распространение пламени до поверхности ПС с непрерывным ростом давления. На этой стадии волна горения в свободном пространстве движется с непостоянной скоростью. Вторая стадия — вход пламени в ПС и формирование волны горения в ПС. Третья стадия — от момента окончания переходного процесса до момента прекращения горения вследствие выгорания горючей смеси.

Давление, достигаемое на границе раздела «объем, не заполненный ПС/пористая среда» в момент окончания первой стадии назовем давлением входа и обозначим p_{ent} , безразмерное давление $P_{ent} = p_{ent}/p_0$. Это давление влияет на скорость распространения пламени [8], а близость его к предельному определяет существование динамического предела при распространении пламени. Поэтому p_{ent} является важным параметром, задающим свойства волны горения в ПС.

Увеличение коэффициента заполнения приводит к уменьшению P_{ent} и максимального относительного давления в сосуде. Влияние коэффициента заполнения на максимальное

относительное давление подробно рассмотрено в работе [5].

На второй стадии распространение пламени сопровождается либо колебаниями давления на фоне его общего снижения, либо небольшим ростом давления до максимального значения. После окончания переходного процесса колебания прекращаются (если они были). Следует отметить, что продолжительность распространения пламени с колебаниями давления сокращается с увеличением давления при входе пламени в ПС [5].

На третьей стадии распространение пламени сопровождается плавным падением давления. Отметим, что при $k = 1$ в момент подхода переднего фронта волны горения к концу трубы начинается кратковременное, более резкое падение давления, после чего оно не изменяется [9]. В частично заполненном пористой среде сосуде в данных экспериментах не наблюдалось заметного падения давления в момент подхода переднего фронта волны горения к концу трубы на фоне его плавного монотонного падения. Окончание горения практически незаметно на записи давления, и его можно фиксировать в данных экспериментах только по сигналам фотодиодов.

Предельный случай заполнения — это труба, полностью заполненная ПС. На рис. 1 (кривая 1) приведена характерная динамика давления при распространении пламени в ПС ($k = 1$) вдали от предела при $p_0 = 0.26$ МПа.

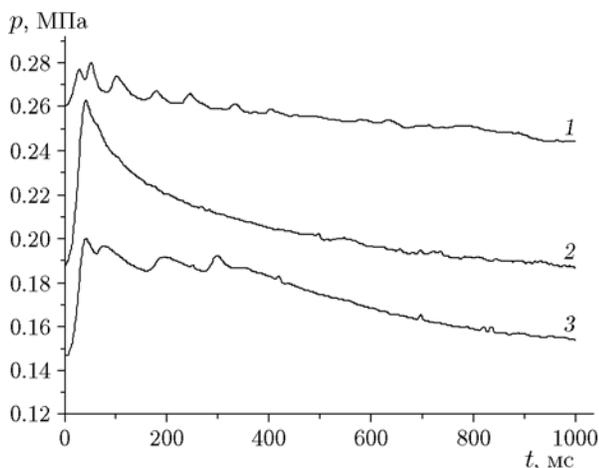


Рис. 1. Зависимость давления в сосуде от времени:

1 — $k = 1$, $p_0 = 0.26$ МПа; $k = 0.82$: 2 — $p_0 = 0.185$ МПа, 3 — $p_0 = 0.146$ МПа

Видно, что при формировании волны горения после незначительного прироста давления ≈ 0.016 МПа наблюдаются его затухающие колебания. Давление в процессе распространения пламени постоянно уменьшается. Однако определенная по сигналам с фотодиодов скорость пламени почти постоянна.

На рис. 1 представлены также зависимости $p(t)$ в случае высокой степени заполнения трубы пористой средой ($k = 0.82$) при двух начальных давлениях. Давление $p_0 = 0.146$ МПа лежит вблизи предела распространения пламени по давлению, а $p_0 = 0.185$ МПа находится достаточно далеко от предела. Отметим, что в последнем случае пламя начинает распространяться в ПС при том же давлении, что и в случае $k = 1$. Видно, что понижение начального давления приводит к увеличению длительности второй стадии, которая сопровождается колебаниями (кривая 3).

При частичном заполнении трубы пористой средой пламя распространялось сначала в свободном пространстве и только затем по ПС. Эксперименты показали, что при распространении в трубе без ПС давление непрерывно растет (теплообмен недостаточно интенсивный), поэтому в трубе, частично заполненной ПС, давление при входе фронта пламени в ПС всегда больше начального и тем больше, чем меньше k (см. рис. 1). Увеличение коэффициента заполнения приводит к уменьшению максимального относительного давления в сосуде [5].

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ, ПРОБЛЕМА ВХОДА ПЛАМЕНИ В ПС

На рис. 2 представлены зависимости координаты фронта пламени x от времени при $k = 0.32$ и различных начальных давлениях, а также при одинаковом давлении 0.175 МПа и различных коэффициентах $k = 0.61$ и 0.32. Рисунок иллюстрирует стационарность распространения пламени на отдельных участках и изменение скорости его распространения после перехода из свободного пространства в ПС. Следует обратить внимание на то, что, как уже отмечалось выше, волна горения в свободном пространстве на начальном участке движется с переменной скоростью, однако далее скорость становится почти постоянной (на рис. 2 нестационарный участок не представлен).

Согласно рис. 2 увеличение коэффициента заполнения при $p_0 = 0.175$ МПа почти в два

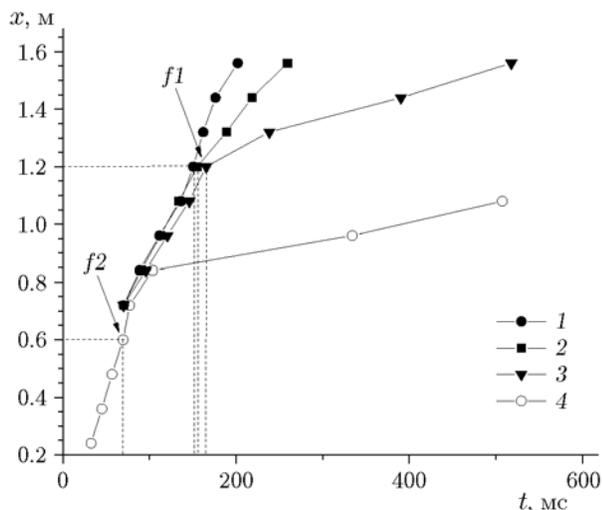


Рис. 2. Зависимость координаты пламени от времени:

$k = 0.32$: 1 — $p_0 = 0.175$ МПа, 2 — $p_0 = 0.148$ МПа, 3 — $p_0 = 0.120$ МПа; 4 — $k = 0.61$, $p_0 = 0.175$ МПа; $f1, f2$ — момент входа волны горения в ПС при $k = 0.32$ и 0.61 соответственно

раза, с $k = 0.32$ до $k = 0.61$, приводит к уменьшению средней скорости распространения пламени в ПС с 7.0 до 1.1 м/с (линии 1 и 4). А увеличение начального давления при $k = 0.32$ в 1.5 раза, от $p_0 = 0.120$ МПа до $p_0 = 0.175$ МПа, приводит к росту средней скорости распространения пламени в ПС от 1.0 до 7.0 м/с (кривые 1 и 3). Это связано с тем, что абсолютное давление газа в момент подхода пламени к ПС уменьшается с увеличением коэффициента заполнения и уменьшением начального давления, а в соответствии с [8] стационарная скорость распространения пламени в ПС пропорциональна квадрату текущего давления. Кроме того, с ростом давления снижается скорость встречного потока свежей смеси, от которого она тоже зависит.

Отметим, что иногда наблюдается гашение при формировании волны горения в сосуде, полностью заполненном ПС, при начальном давлении выше предельного для распространения волны горения в ПС [3]. Исследования [3] показали, что проблема гашения при формировании волны горения в ПС существует для ацетиленовоздушных смесей, но отсутствует для водородокислородных смесей. Следует отметить, что в настоящей работе сложности с формированием волны горения наблюдались также и в сосуде, полностью заполненном ПС, вдали от предела по начальному дав-

лению. То есть при зажигании искрой имело место кратковременное небольшое повышение давления и фиксировалось излучение от пламени в порах, удаленных от места зажигания, а затем наступало гашение. Кроме того, в данной работе при $k = 0.89$ из пяти экспериментов при различных начальных давлениях, превышавших критическое, только в одном зафиксировано входение и распространение пламени. В остальных же случаях процесс входа пламени завершался гашением.

В полностью заполненном сосуде ($k = 1$) прирост давления при образовании волны горения составляет $p_{\max} - p_0 \approx 0.02$ МПа (см. рис. 1, кривая 1). Далее пламя распространяется с понижением текущего давления. При $k = 0.82$ вдали от предела при $p_0 = 0.185$ МПа прирост давления $p_{\max} - p_0 \approx 0.080$ МПа более значителен, чем при $k = 1$, и, по существу, пламя начинает распространяться в ПС при том же начальном давлении, что и в случае $k = 1$. Прирост 0.080 МПа обусловлен в основном сгоранием газа в объеме без ПС. Распространение волны горения в полностью ($k = 1$) и в частично ($k = 0.82$) заполненном сосуде существенно отличается: в частично заполненном сосуде снижение относительного давления за время распространения волны горения больше, а скорость распространения пламени ниже. Средняя скорость волны горения составляет 0.6 м/с при $k = 0.82$, $p_0 = 0.185$ МПа и 1.6 м/с при $k = 1$, $p_0 = 0.26$ МПа. Падение давления в полностью заполненном сосуде определяется только конденсацией воды из продуктов сгорания. В частично заполненном сосуде падение давления обусловлено в основном охлаждением продуктов сгорания в свободном пространстве. Существенное снижение давления в ходе распространения волны горения в ПС приводит к тому, что горение происходит при более низком текущем давлении, чем при $k = 1$. Охлаждение продуктов сгорания также вызывает встречный поток свежей смеси при распространении волны горения. Действие этих двух факторов и приводит к снижению скорости пламени.

Следует отметить, что сильные колебания давления, характерные для экспериментов в полностью заполненном сосуде, возникают также и при входе пламени в ПС в частично заполненных сосудах. Так, при $k = 0.82$, $p_0 = 0.146$ МПа (см. рис. 1, кривая 3) колебания увеличивают время входа волны горения в ПС и прекращаются, как только волна про-

ходит некоторое расстояние по ПС. При $p_0 > 0.170$ МПа и $k = 0.82$ колебания при входе волны горения в ПС исчезают (см. рис. 1, кривая 2).

Рассмотрим подробнее формирование волны горения в ПС на примере записи давления и сигналов фотодиодов в процессе входа пламени в ПС при $k = 0.82$, $p_0 = 0.146$ МПа (рис. 3). Отметим, что максимум чувствительности используемых фотодиодов лежит в близком инфракрасном диапазоне, поэтому сигнал фотодиодов зависит от температуры продуктов сгорания. Вхождение в ПС сопровождается колебаниями сигналов как от фотодиода 3 (вблизи поверхности ПС), регистрирующего интенсивность свечения продуктов сгорания, так и от датчика давления. Видно, что эти колебания происходят в одной фазе с точностью до задержки, обусловленной конечностью скорости звука. После прохождения волной горения дистанции между фотодиодами 3 и 5 (фотодиод 4 находится в ПС на глубине 0.12 м, а фотодиод 5 на глубине 0.24 см от поверхности ПС) колебания давления прекращаются (см. рис. 1, 3). С этого момента начинается стационарное распространение пламени в ПС.

При входе пламени в ПС почти всегда отмечается интенсификация горения, проявляющаяся в возникновении скачка давления и замедлении спада сигналов фотодиодов, расположенных в свободном пространстве вдали от

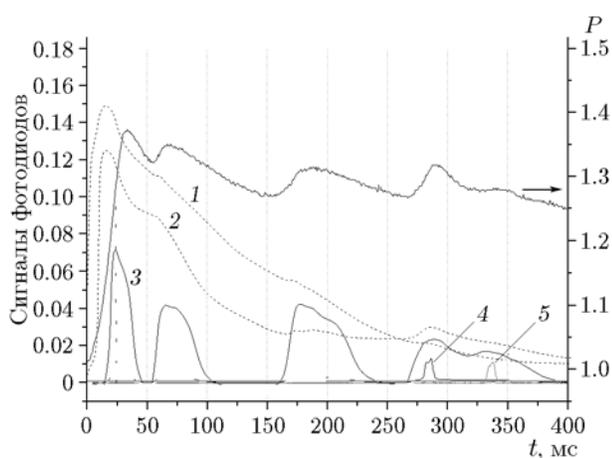


Рис. 3. Вход волны горения в пористую среду. Зависимость текущего давления и уровней сигналов фотодиодов от времени:

$k = 0.82$, $p_0 = 0.146$ МПа; 1–3 — сигналы в объеме без ПС, 3 — фотодиод над поверхностью ПС, 4, 5 — фотодиоды в ПС

границы ПС (рис. 3, сигналы 1, 2, $t \approx 50$ мс). Форма сигналов этих фотодиодов до подхода пламени к ПС определяется следующими причинами: появлением и прохождением фронта пламени, охлаждением газа стенками, сжатием продуктов горения в процессе распространения пламени в свободном пространстве, а также обусловленным им сдвигом более горячих порций газа в область более холодного газа. Быстрый прирост давления при входе в ПС, вызван резким возрастанием поверхности пламени вследствие искривления его поверхности в каналах ПС и, как следствие, возрастанием объема образующихся в единицу времени продуктов сгорания. Первый максимум сигнала фотодиода 3 свидетельствует о вхождении пламени в ПС, что сопровождается ростом давления (см. рис. 3, кривая 1). Высокая скорость пламени в свободном пространстве указывает на то, что фронт пламени не является плоским, и поэтому пламя подходит к ПС неодновременно. На это указывает также некоторое снижение уровня сигнала фотодиода 3 на фоне роста давления. Затем в течение примерно 22 мс давление снижается, что обусловлено охлаждением первой порции газа, сгоревшей в ПС, и охлаждением газа в объеме без ПС. Сигнал фотодиода 3 падает ниже порога чувствительности регистрирующей аппаратуры (рис. 3, первый пик сигнала фотодиода 3). В этот момент в сосуде реализуются максимальные теплотери в единицу времени. В дальнейшем разность между температурами продуктов сгорания в свободном объеме и стенок сосуда уменьшается и тепловой поток снижается. Уменьшение давления вызывает изотермическое расширение свежего газа в ПС [9] со скоростью w , которую можно оценить из соотношения

$$w = \frac{x dp}{p dt} = \frac{x dP}{P dt}, \quad (1)$$

где x — расстояние от сечения в ПС, в котором вычисляется скорость, до конца трубы [4]. При входе пламени в ПС при $k = 0.82$ по данным рис. 3 при первом подъеме давления средняя скорость потока свежей смеси в направлении распространения пламени составляет $w \approx 6$ м/с, а при спаде давления средняя скорость встречного потока свежей смеси порядка $w \approx 3$ м/с.

Сигнал с фотодиода 3 имеет несколько максимумов. Первый, как уже упоминалось выше, возникает при приближении пламени к

ПС. Амплитуда следующих максимумов сравнима с амплитудой первого. Этот факт можно объяснить тем, что горячие продукты горения несколько раз возникают вблизи этого фотодиода. Это может происходить из-за колебаний давления. Выше было показано, что уменьшение давления приводит к выдвиганию горючей смеси и волны горения, находящихся в ПС, в свободное пространство. Оценим смещение столба газа в ПС при падении давления после первого максимума. Относительное падение давления после первого максимума составляет $\Delta P = 0.05$. Длина столба газа в ПС $Lk = 1.68 \cdot 0.82 = 1.38$ м, при уменьшении давления она увеличивается на $\Delta l = Lk \frac{\Delta P}{P} = 138 \frac{0.05}{1.31} \approx 5.3$ см. Согласно рис. 3 при приближении пламени к четвертому фотодиоду сигнал на третьем фотодиоде также возрастает. Это можно объяснить тем, что горение происходит не только вблизи фотодиода 4, но и в свободном пространстве. То есть первые очаги горения сильно опережают последние. Таким образом, перемещение столба газа на 5.3 см при уменьшении давления вполне может приводить к выносу зоны горения вместе с некоторым количеством свежей смеси в свободное пространство. Сгорание вытекающей из ПС свежей смеси будет приводить к росту давления. Скорее всего, механизм возникновения третьего и последующих максимумов на зависимости от времени сигналов с датчика давления и с фотодиода 3 одинаков.

«Очаговое» распространение пламени в ПС продолжается по крайней мере до датчика 4. Этим можно объяснить тот факт, что время между сигналами от фотодиодов 3 и 4 и от фотодиодов 4 и 5 существенно отличается: 0.24 и 0.05 с. При «очаговом» распространении пламени не представляется возможным по сигналам с фотодатчиков определить среднюю скорость пламени, так как фотодиод регистрирует пламя, находящееся в ближайшей к нему поре. На возможность распространения волны горения в виде отдельных очагов указывают также низкие степени выгорания свежей смеси (до 20 %) при распространении пламени в ПС вблизи предела распространения по давлению [6, 7]. После прохождения фотодиода 5 пламя распространяется почти с постоянной скоростью 0.3 м/с, что, скорее всего, указывает на то, что волна горения сформировалась. В дальнейшем, после формирования, волна го-

рения представляет собой зону вдоль трубы, расположенную между двумя плоскостями. На первой плоскости начинается химическое превращение первых молей исходной смеси, а на второй оно заканчивается для последних молей. Зона движется вдоль трубы со стационарной скоростью распространения пламени в данных условиях [9].

Заметим, что скорость сформировавшейся волны горения можно представить как сумму скорости волны горения относительно свежей смеси (некоторой «нормальной скорости» пламени в ПС) и скорости движения самой горючей смеси. Необходимо отметить, что эта «нормальная скорость» растет с ростом давления, а в работе [4] показано, что движение горючей смеси также оказывает небольшое влияние на «нормальную скорость». При движении горючей смеси в направлении распространения пламени «нормальная скорость» немного возрастает. Скорость движения горючей смеси, согласно (1), зависит от скорости падения (в данном случае) давления и расстояния до конца трубы x . При приближении к концу трубы уменьшаются производная по времени от давления (по абсолютной величине) и расстояние x . Это приводит к уменьшению скорости встречного потока. Скорость волны горения в ПС относительно горючей смеси падает вследствие снижения давления. Поэтому в результате сложения двух скоростей: встречного потока и «нормальной скорости» — скорость волны горения становится почти постоянной и равной 0.3 м/с.

Выше, исходя из записи сигнала с фотодиода, находящегося на границе ПС, был описан механизм возникновения колебаний давления. Однако колебания давления наблюдаются и в случае, когда труба полностью заполнена ПС (см. рис. 1, кривая 1), поэтому, скорее всего, описанный выше механизм дополняет следующий механизм. При входе пламени в ПС либо после инициирования горения в трубе, полностью заполненной ПС, давление растет. Его рост обусловлен увеличением поверхности пламени и массовой скорости сгорания. Скорость роста давления ограничивается гашением пламени в отдельных высокоскоростных пульсациях по механизму, описанному в [8], и ростом теплового потока из продуктов сгорания в твердую фазу. В связи с этим давление достигает максимума и начинает падать. Это приводит к уменьшению видимой скорости пламени и массовой скорости сгорания. Давление

достигает минимума, при этом прекращается встречное движение свежей смеси, возникающее при падении давления. Скорость волны горения начинает возрастать, цикл повторяется. Однако амплитуда колебаний снижается, так как скорости потоков против и в направлении распространения, от которых зависит массовая скорость сгорания, снижаются согласно (1). Опыты показали, что действительно после начального периода формирования волны горения амплитуда колебаний снижается и далее волна горения распространяется в ПС почти стационарно с плавным падением давления, обусловленным либо конденсацией воды, либо охлаждением продуктов сгорания в свободном пространстве и конденсацией воды.

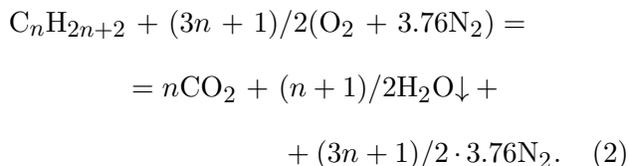
В заключение отметим, что, по нашему мнению, основной причиной гашения пламени при входе в ПС является смешение свежей смеси с охлажденными продуктами сгорания на границе ПС при интенсивных колебаниях давления и, следовательно, изменении направления потоков свежей смеси и продуктов сгорания. После переходного процесса, когда волна заходит на достаточную глубину в ПС, пламя всегда распространяется до конца (если текущее давление превышает предельное). Предсказать условия, когда это явление будет воспроизводиться, пока не представляется возможным. Отметим только, что вблизи предела гашение происходит чаще.

О ДИНАМИЧЕСКОМ ПРЕДЕЛЕ

Как уже упоминалось выше, существует минимальное давление, ниже которого волна горения не способна распространяться в ПС. При распространении волны в ПС давление может падать. Если даже начальное давление при входе в ПС больше предельного, в процессе перемещения волны горения по ПС оно может стать ниже предельного, наступает гашение пламени. Это явление в работах [6, 7] названо явлением динамического предела. Под динамическим предельным давлением понимается давление в сосуде в момент гашения пламени.

При горении в закрытом сосуде конечное давление может изменяться в диапазоне от максимального, которое достигается в адиабатических условиях, до некоторого меньшего значения, зависящего от теплотерь. Конечное давление определяется температурой продуктов горения и изменением количества мо-

лей, зависящими от горючей смеси. Например, для стехиометрической смеси предельного углеводорода C_nH_{2n+2} с воздухом уравнение химической реакции следующее:



В адиабатическом случае, при $n > 1$, горение происходит с увеличением числа молей. При $k = 1$ снижение давления в основном определяется уменьшением числа молей по уравнению (2) вследствие конденсации паров воды в ПС. Из-за того, что в нашем случае теплоемкость твердой фазы много больше теплоемкости продуктов сгорания, газ охлаждается почти до комнатной температуры. Конденсация обусловлена тем, что давление насыщенных паров воды при комнатной температуре (порядка 1 кПа) ниже его парциального давления в продуктах сгорания большинства углеводородовоздушных пламен. Пары начинают конденсироваться уже в процессе распространения пламени.

При распространении пламени в ПС или в частично заполненном ПС сосуде давление сначала растет, а затем падает. При этом диапазон начальных давлений, для которого существует динамический предел, определяется конденсацией воды, и он небольшой. В случае, когда имеется свободное пространство, т. е. при $k < 1$, давление до подхода пламени к ПС растет и пламя входит в ПС при давлении больше начального. В связи с этим при распространении пламени в частично заполненном ПС сосуде, при инициировании горения в свободном пространстве, появляется еще один фактор, который может влиять на диапазон начальных давлений, при которых имеет место динамический предел, — давление при входе пламени в ПС.

Рост давления в начале процесса приводит к тому, что даже при начальном давлении ниже предельного возможно распространение пламени в ПС. Таким образом, диапазон начальных давлений, при которых существует динамический предел, для трубы, частично заполненной ПС, зависит от двух факторов: начального роста давления и падения давления при распространении пламени в ПС. Выше уже упоминалось, что для наших параметров установки

увеличение давления тем больше, тем больше свободное пространство. Кроме того, при достаточно большом свободном пространстве над ПС падение давления при конденсации воды в ПС существенно меньше падения давления за счет охлаждения продуктов горения в свободном пространстве. Поэтому в трубе, частично заполненной ПС, в отличие от трубы, полностью заполненной ПС, изменение давления в процессе распространения пламени в ПС может быть существенно больше.

Оценим, как будет изменяться диапазон начальных давлений, при которых имеет место динамический предел, при изменении k . Этот диапазон начальных давлений определяется из условия равенства предельному давлению давления, достигаемого при распространении волны горения в ПС. Таким образом, рост давления при горении в свободном объеме, приводит только к смещению диапазона начальных давлений, при которых возможен динамический предел. Увеличение свободного объема вызывает возрастание давления на начальном этапе распространения пламени и далее сдвиг диапазона вниз по давлению. Ширина же этого диапазона зависит от падения давления во время распространения волны горения в ПС. Скорость падения давления в трубе определяется скоростью охлаждения горячих продуктов, находящихся в свободном объеме, которая зависит от площади поверхности стенок трубы в свободном объеме, — величины, пропорциональной $1 - k$, а падение давления зависит от времени распространения пламени в ПС — величины, пропорциональной k . Если уменьшать свободный объем, то скорость падения давления уменьшится, а время распространения пламени в ПС возрастет. Но так как время распространения величина конечная, то при $k \rightarrow 1$ падение давления вследствие охлаждения газа в свободном объеме будет стремиться к нулю. Падение давления в этом случае определяется разностью между парциальным давлением в продуктах сгорания и давлением насыщенных паров воды. С уменьшением k падение давления сначала возрастает, так как увеличивается поверхность охлаждения в свободном объеме, а затем уменьшается за счет меньшего времени распространения волны горения в ПС. Таким образом, зависимость падения давления за время распространения волны горения в ПС от коэффициента заполнения должна иметь максимум.

В случае низких теплотерь из продуктов сгорания в свободном пространстве (малые значения поверхности единицы объема или высокие давления) диапазон начальных давлений, в котором реализуется явление динамического предела, будет малым, он определяется только конденсацией воды из продуктов сгорания в ПС и, следовательно, меньше рассчитанного по уравнению (2). В этом случае конденсация паров происходит только в ПС, а это не все продукты сгорания. В случае очень высоких теплотерь из свободного пространства (большие значения поверхности единицы объема, низкие давления или большая длина сосуда) диапазон реализации динамического предела также будет малым. Действительно, при высоких теплотерях в момент подхода пламени к ПС давление близко к начальному и дальнейшее его падение определяется только конденсацией воды из продуктов сгорания в свободном пространстве и в ПС по уравнению (2).

Таким образом, расширение области динамического предела можно наблюдать только при определенных условиях. С одной стороны, теплотери не должны быть слишком большими за время распространения пламени в свободном пространстве, а с другой стороны, они должны быть существенными за время распространения в ПС.

На рис. 4 представлены зависимости относительного давления P_{ent} при входе пламени

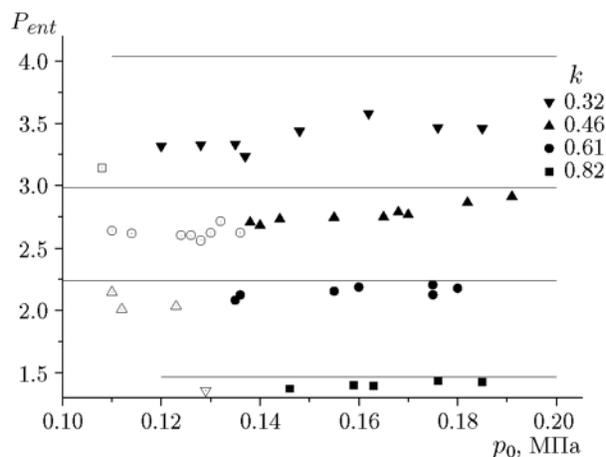


Рис. 4. Зависимость $P_{ent}(p_0)$:

светлые значки — область существования динамического предела; темные значки — распространение пламени до конца сосуда; прямые, лежащие выше экспериментальных символов, — теоретическая оценка [5]

в ПС от начального давления p_0 при различном заполнении трубы пористой средой. Светлыми точками показаны эксперименты, в которых пламя входит в ПС и распространяется с последующим гашением, не доходя до конца сосуда, темными точками — устойчивое распространение до конца сосуда. Прямыми линиями, параллельными оси абсцисс, представлены теоретические зависимости $P_{ent}(p_0)$ [5] в предположении адиабатического сгорания газа в свободном пространстве.

Из рис. 4 видно, что при высоких коэффициентах заполнения относительное давление при входе пламени в ПС близко к теоретическому, т. е. теплотери малы. С уменьшением коэффициента заполнения экспериментальные точки всё больше отклоняются от теоретической прямой. Это обусловлено увеличением времени распространения пламени до ПС, что вызывает увеличение теплотери. С увеличением начального давления это отклонение уменьшается, что указывает на снижение теплотери с ростом давления.

В полностью заполненной трубе ($k = 1$) предельное начальное давление около 0.15 МПа, а безразмерное равно 1. Равенство $P_{ent} = 1$ обусловлено тем, что горение начинается сразу в ПС и в этом случае отсутствует прирост давления за счет объема без ПС, а давление входа совпадает с начальным. При уменьшении степени заполнения трубы происходит расширение пределов за счет большего прироста $\Delta p_{ent} = (P_{ent} - 1)p_0$. Из рис. 4 видно, что при различных коэффициентах заполнения диапазон начальных давлений, при которых возможна реализация динамического предела, различен. Например, при $k = 0.82$ и $p_0 > 0.146$ МПа волна горения распространяется до конца сосуда; при $p_0 < 0.146$ МПа распространение происходит не далее 0.36 м в ПС. При $k = 0.32$ и $p_0 > 0.120$ МПа волна горения проходит всю пористую среду; при $p_0 < 0.120$ МПа наблюдалось неполное распространение. При $k \leq 0.18$ в рабочем диапазоне давления отсутствовало частичное распространение в ПС. При $k = 0.46$ диапазон давления с частичным распространением волны горения максимален и лежит в пределах $0.11 \div 0.135$ МПа, а не в диапазоне $0.135 \div 0.15$ МПа, как в случае, когда он обусловлен только конденсацией воды из продуктов сгорания.

Так как гашение может наступать на раз-

личных расстояниях до конца трубы, скорость встречного потока свежей смеси в этот момент также различна (1). Чтобы узнать, влияет ли скорость потока на предельное давление, изучалась зависимость динамического предельного давления от начального давления и коэффициента заполнения k . Полученные экспериментальные данные группируются в области 0.135 МПа (стандартное отклонение 5 %). Это значение несколько ниже предела распространения, если под ним понимать начальное давление в смеси, при котором пламя способно распространяться на всю длину трубы при $k = 1$ (0.15 МПа), но близко к предельному давлению, обусловленному конденсацией паров воды ($0.88p_0$). Это указывает на независимость полученных предельных давлений от скорости встречного движения свежей смеси, обусловленного охлаждением продуктов сгорания в свободном пространстве позади волны горения.

ВЫВОДЫ

1. При формировании волны горения при переходе из свободного пространства в пористую среду важную роль играют колебания давления. Они могут приводить к прекращению распространения пламени в пористой среде как вблизи предела распространения пламени, так и вдали от него, вследствие смешения свежей смеси с охлажденными продуктами сгорания.

2. Экспериментально исследовано распространение волн горения в сосуде, частично заполненном пористой средой, вблизи предела распространения пламени в пористой среде по давлению. Показано:

- в частично заполненных сосудах предел распространения пламени в пористой среде по начальному давлению снижается. Предел определяется текущим давлением при входе пламени в пористую среду;
- область начальных давлений, в которой реализуется явление динамического предела, существенно шире, чем в сосудах, полностью заполненных пористой средой. Расширение области реализации предела обусловлено подъемом давления выше предельного за счет сгорания газа в свободном пространстве и последующего его охлаждения;

- расширение области реализации динамического предела зависит от коэффициента заполнения сосуда пористой средой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения / отв. ред. Р. И. Солоухин. — М.: Наука, 1980.
2. Babkin V. S. Filtrational combustion of gases. Present state of affairs and prospects // Pure Appl. Chem. — 1993. — V. 65, N 2. — P. 335–344.
3. Пинаев А. В., Лямин Г. А. Основные закономерности дозвукового и детонационного горения газов в инертных пористых средах // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 4. — С. 75–85.
4. Бабкин В. С., Бунев В. А., Коржавин А. А., Клименко А. С., Зубков В. И., Григорьев В. М. Горение газа в закрытом сосуде с высокопористой инертной средой // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 5. — С. 17–22.
5. Козлов Я. В., Замашиков В. В., Коржавин А. А., Сеначин П. К. Максимальное давление при распространении пламени в закрытом сосуде, частично заполненном пористой средой // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 4. — С. 18–29.
6. Korzhavin A. A., Bunev V. A., Babkin V. S. Dynamics of gas combustion in closed systems with an inert porous medium // Combust. Flame. — 1997. — V. 109. — P. 507–520.
7. Коржавин А. А., Бунев В. А., Бабкин В. С. Нестационарные эффекты при горении газа в закрытых сосудах с инертной пористой средой // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 1. — С. 24–32.
8. Babkin V. S., Korzhavin A. A., Bunev V. A. Propagation of premixed explosion flames in porous media // Combust. Flame. — 1991. — V. 87, N 2. — P. 182–190.
9. 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.

Поступила в редакцию 09.04.2018.

После доработки 12.07.2018.

Принята к публикации 12.09.2018.
