

амплитуда скорости тепловыделения в начале пламени может превысить в несколько десятков раз относительную амплитуду слабых периодических звуковых колебаний давления $|p'/\bar{p}|$ (или скорости $|v'/c|$, где c — скорость звука в газе перед зоной горения). Угол фазового сдвига между местными колебаниями скорости тепловыделения и колебаниями давления газа в фиксированной точке камеры не зависит от амплитуды звукового давления ($4 \cdot 10^{-5} \leq |p'/\bar{p}| \leq 44 \cdot 10^{-5}$) и изменяется почти линейно с расстоянием от стабилизатора.

Перечисленная выше последовательность физических процессов раскрывает возможный механизм обратной связи, поддерживающий автоколебания газа в камере на режиме вибрационного горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Фурлетов. ФГВ, 1983, 19, 2, 65.
2. Л. Крокко, Чжен Синь-и. Теория неустойчивости горения в жидкостных ракетных двигателях. М.: ИЛ, 1958.
3. Д. И. Абугов, О. И. Обрезков, В. П. Пикалов. ФГВ, 1981, 17, 4, 44.
4. В. А. Скляров, В. И. Фурлетов. ФГВ, 1983, 19, 2, 49.
5. Дж. Бендат, А. Пирсол. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974.
6. В. Е. Дорошенко, В. И. Фурлетов. ФГВ, 1972, 8, 3, 388.
7. В. П. Ляшенко, В. И. Ягодкин. МЖГ, 1983, 3, 34.
8. В. А. Скляров, В. И. Фурлетов. ПМТФ, 1974, 1, 84.

*Поступила в редакцию 8/IV 1985,
после доработки — 7/I 1986*

ПЕРЕДАЧА ПЛАМЕНИ ЧЕРЕЗ УЗКИЕ КАНАЛЫ В ОТСУТСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ПРИ ЕГО НАЛОЖЕНИИ

*Н. И. Майоров
(Москва)*

Изучение передачи пламени через узкие каналы привлекает внимание исследователей в связи с обеспечением взрывобезопасности технологических процессов, в ходе которых возможно образование горючих смесей. Представляет оно интерес и для обеспечения безопасной эксплуатации электрооборудования, работающего в условиях, не исключающих возможность возникновения взрывчатых смесей, и газопроводов, по которым транспортируются горючие газы. При защите газопроводов приходится заботиться не только о надежной работе огнепреградителей, но и о том, чтобы их гидравлическое сопротивление, лимитирующее пропускную способность газопровода, не было слишком большим.

Исследования [1] показали, что при наложении постоянного электрического поля на каналы, размеры которых значительно превосходят критические, средняя скорость распространения пламени в них увеличивается с ростом разности потенциалов. При наложении электрического поля на каналы, размеры которых лишь на несколько десятков процентов превосходят критические, средняя скорость пламени в них уменьшается и при некотором пороговом значении разности потенциалов пламя через канал не проходит. Это явление может быть использовано для создания огнепреградителей с небольшим гидравлическим сопротивлением [2]. Поскольку о средней скорости распространения пламени в каналах как круглого, так и прямоугольного сечения авторы судили по разности времен входа в канал и выхода из него, открытым остался вопрос об изменении скорости пламени по длине канала. Недостаточно данных было получено и об изменении формы фронта пламени. Так же представляет

интерес влияние на передачу пламени влажности сгорающей смеси. Освещению этих вопросов, необходимых для оптимизации процесса предотвращения передачи пламени через узкие каналы, посвящена данная работа.

Опыты проводили в полузамкнутой горизонтальной трубе квадратного сечения (36×36 мм), в противоположные стенки которой вмонтированы плоскопараллельные пластины из оптического стекла, позволяющие просматривать все сечение трубы по длине 200 мм. В середину просматриваемой части трубы помещали две вставки из изоляционного материала АГ-4с, образующие канал прямоугольного сечения (сужение) с прозрачными стенками длиной $l = 10$ и шириной 36 мм, высотой $h = 10 \div 2,1$ мм. Электрическое поле налагали на узкий канал и холодный конец трубы. Высокое напряжение отрицательной полярности подавали на электрод, расположенный заподлицо с верхней стенкой трубы. Нижний электрод заземлили. Электроды зажигания помещали вблизи открытого конца трубы, что позволяло реализовать режим равномерного распространения пламени на большей части трубы до сужения.

В качестве горючей смеси использовали сухую и влажную (1,5% H_2O) стехиометрические метановоздушные смеси. Горючее брали из технического баллона, содержащего 88% CH_4 . Съемку вели методом Теплера, используя в качестве визуализирующей диафрагмы щель и многоцветные линейные растры. Распространение пламени регистрировали одновременно скоростной кадровой съемкой с частотой ~ 4000 кадр/с камерой СКС-1 и методом щелевой развертки. Временную развертку процесса осуществляли на уровне оси канала с помощью двухобъективного фоторегистратора, созданного на базе откидного кронштейна прибора ИАБ-451 [3].

Передача пламени через узкие каналы в отсутствие электрического поля

В этой серии экспериментов узкий канал располагали на уровне оси трубы. Работали с каналами высотой 10; 5; 3,1; 2,9; 2,5; 2,3 и 2,1 мм. Опыты показали, что наличие в трубе вставки с узким каналом приводит к деформации фронта пламени (рис. 1), распространяющегося с постоянной скоростью вблизи открытого конца трубы. На верхнем кадре зарегистрирован еще недеформированный фронт. Деформация фронта пламени, зафиксированного на остальных кадрах, сопровождается уменьшением скорости его распространения. Она начинается на расстоянии около 10 мм и качественно происходит одинаково, независимо от высоты канала. Установлено, что замедление тем заметнее, чем меньше высота канала и чем ближе к нему пламя подходит.

Анализ теплерограмм показал, что распространение пламени в узких каналах всех высот носит пульсационный (колебательный) характер. Амплитуда пульсаций тем больше, чем меньше высота канала.

На рис. 2 приведены типичные временные развертки процессов передачи пламени через канал высотой 2,5 мм (а) и гашения в канале с $h = 2,1$ мм (б). Видно, что в первые моменты после входа в узкий канал амплитуда пульсаций невелика. Затем она несколько растёт. Если



Рис. 1. Распространение пламени вблизи канала высотой 2,5 мм. Кадры следуют через 7,8 мс.

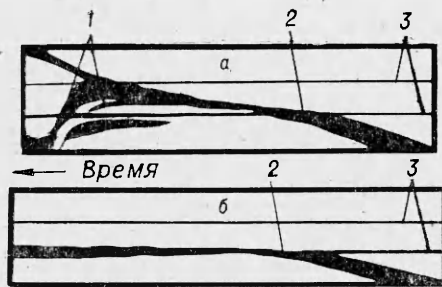


Рис. 2. Временные развертки.
1 — продукты сгорания; 2 — фронт пламени;
3 — границы канала.

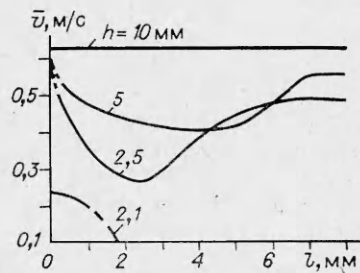


Рис. 3. Изменение \bar{v} по длине канала.

в случае прохождения пламени амплитуда пульсаций после роста остается практически постоянной (см. рис. 2, а), то при погасании она затухает (см. рис. 2, б). По перемещению неоднородностей за фронтом можно проследить за движением продуктов реакции. Их движение к выходу из канала начинается после усиления амплитуды пульсаций. Однако они не выходят, за пределы канала, пока пламя находится в нем.

Пульсационный характер распространения пламени в узком канале обусловлен сложной гидродинамикой течения реагирующего газа, вызванной как волнами сжатия, проходящими через канал, так и изменением условий на выходе из него из-за догорания смеси перед сужением (в момент входа фронта в узкий канал в нижней части трубы в силу менискообразности формы фронта остается несгоревшая свежая смесь, см. рис. 1). Временное сопоставление кинематографического материала, полученного одновременно методами скоростной кадровой съемки и щелевой развертки, показало, что при догорании смеси вблизи сужения амплитуда пульсаций пламени усиливается.

Распределение средней скорости распространения пульсирующего пламени \bar{v} по длине канала зависит от его высоты (рис. 3). При больших h величина \bar{v} сохраняется неизменной. В каналах меньшего размера сразу же после входа пламени в канал скорость его уменьшается до минимального значения, тем меньшего, чем меньше h . Расстояние, на котором оно достигается, уменьшается вместе с h , затем \bar{v} начинает расти. Достигнув определенного значения, пламя до выхода из канала сохраняет эту скорость. Коренным образом отличается распределение $\bar{v}(l)$ при $h = 2,1$ мм. Средняя скорость распространения пламени монотонно уменьшается и при $l \sim 1,5 \div 2,0$ мм горение прекращается.

Характер распределения $\bar{v}(l)$ по мере уменьшения h связан с изменениями условий теплоотвода в стенки канала и выхода из него. При больших значениях h теплоотвод мал. В канале критического размера теплоотвод в стенки настолько возрастает, что \bar{v} в нем монотонно уменьшается до величины, при которой горение оказывается невозможным. В случае промежуточных значений h снижение скорости вблизи входа в канал тем больше, чем меньше его высота, что обусловлено ростом теплоотвода в стенки по мере уменьшения высоты канала. Последующее повышение связано с запиранием выхода продуктов сгорания (они из канала не истекают) за счет поднятия давления вблизи входа пламени в канал из-за догорания смеси перед сужением. В этой стадии процесса пламя в канале распространяется, как при поджиге у закрытого конца. После догорания смеси перед сужением выход продуктов реакции открывается и они начинают двигаться в сторону открытого конца трубы, а средняя скорость распространения выходит на стационарный уровень.

Передача пламени через узкий канал во влажной смеси качественно протекает так же, как и в сухой. Разница лишь в том, что пульсации выражены менее отчетливо и скорость распространения несколько меньше.

Влияние электрического поля на передачу пламени через узкие каналы

Если в отсутствие электрического поля деформация фронта пламени в трубе обусловлена только влиянием сужения на профиль скорости w холодного газа, вызванного расширением продуктов сгорания, то при его наложении фронт деформируется и под влиянием поля. Вследствие этого w начинает изменяться в зависимости от приложенной разности потенциалов U на расстоянии, в $1,5 \div 2$ раза большем, чем в отсутствие электрического поля.

Увеличение вытянутости фронта пламени в электрическом поле приводит к тому, что в момент входа его в узкий канал в нижней части трубы остается больше несгоревшей смеси, чем в отсутствие поля, но догорание ее происходит быстрее. Более быстрое догорание приводит к более быстрому изменению условий на выходе продуктов сгорания из канала. Увеличение w перед фронтом в трубе при наложении на зону горения электрического поля и тем самым скорости газа в узком канале способствует усилению амплитуды пульсаций пламени и движения продуктов реакции.

На рис. 4 представлены типичные временные развертки процессов передачи (а) и предотвращения передачи (б) пламени через канал при наличии электрического поля. Видно, что амплитуда колебаний пламени в электрическом поле увеличивается. Она в 3—4 раза больше, чем при $U = 0$. Область, занятая пульсациями пламени большей амплитуды, возрастает. Интенсифицируется и движение продуктов реакции. Они в отличие от случая $U = 0$ начинают двигаться к выходу из канала несколько раньше усиления амплитуды колебаний пламени, а при ее увеличении начинается истечение продуктов реакции уже за пределы канала. Так же, как и в канале критического размера, при пороговой разности потенциалов амплитуда пульсаций сначала невелика. После отброса пламени следует ее увеличение, а затем колебания затухают.

Поскольку при использовании в качестве визуализирующей диафрагмы щели фронт пламени и продукты реакции на теплорограммах регистрируются областями одинаковой освещенности, по ним невозможно судить, когда и как происходит гашение пламени. Для этого использовано цветное изображение процесса, позволяющее регистрировать изменение распределения градиентов показателя преломления в объекте исследования. Анализ полученных результатов показывает, что при усилении амплитуды пульсаций пламени и тем самым движения продуктов реакции в них появляется область больших градиентов из-за потока тепла в направлении, противоположном распространению пламени (охлаждения). В случае погасания пламени в узком канале в продуктах реакции тоже наблюдается область больших градиентов. Причем она появляется раньше, чем происходит изменение порядка следования цветов в передней зоне теплорограммы (во фронте). Это свидетельствует о том, что погасание пламени в узком канале сопровождается увеличением градиента температуры в продуктах реакции. Полученный результат находится в соответствии с тепловой теорией гашения пламени в узких каналах [4].

Распределение средней скорости распространения пламени по длине канала, в котором возможно предотвращение передачи пламени электрическим полем, видно на рис. 5. Опыты показали, что при значении U , близком к пороговому, после догорания смеси в нижней части трубы перед сужением \bar{v} увеличивается, а при пороговой разности потенциалов $U_{п} = 2,3$ кВ она уменьшается и при $l \approx 7$ мм горение прекращается. Дальнейший рост U сокращает расстояние, на котором происходит гашение пламени.

Определяя момент гашения пламени на черно-белых теплорограммах по аналогии с моментом гашения, найденным по цветному изображению, и проводя обработку черно-белых разверток с последующим рас-

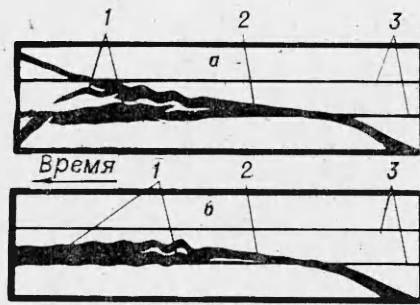


Рис. 4. Временные развертки процесса распространения пламени в канале высотой 2,5 мм при $U = 2,2$ (а) и 2,3 кВ (б).
1 — продукты сгорания; 2 — фронт пламени; 3 — границы канала.

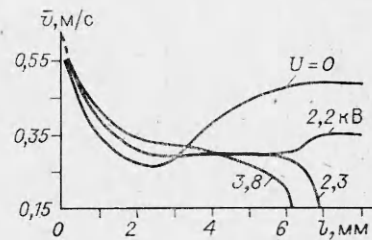


Рис. 5. Изменение \bar{v} по длине канала.

четом на ЭВМ, установили, что гашение пламени в электрическом поле происходит при $\bar{v} = 19 \div 16$ см/с. Если $U = 0$, $\bar{v} = 7 \div 5$ см/с. В этом различии, по-видимому, нет ничего удивительного. Поскольку в электрическом поле теплотери из зоны горения в стенки канала увеличиваются из-за растяжения фронта пламени, то и его гашение может происходить при бодьшей скорости.

Изменение характера распределения $\bar{v}(l)$ при увеличении U качественно можно объяснить следующим образом. Интенсификация движения продуктов реакции в электрическом поле способствует началу их перемещения к выходу из канала раньше догорания смеси перед сужением. Поэтому «запирание» выхода из канала ослабевает, а теплоотвод в стенки возрастает за счет увеличения зоны контакта с ними растянутого под влиянием поля фронта пламени. Ослабление «запирания» выхода из канала способствует тому, что на большей части канала скорость остается неизменной. Несколько большее ее значение, чем в отсутствие поля, связано с увеличением вытянутости пламени. Последующее повышение \bar{v} обусловлено ростом амплитуды его пульсаций после догорания смеси перед сужением. Меньшее ее значение, чем при $U = 0$, связано со свободным истечением продуктов реакции из-за интенсификации их движения.

При пороговой разности потенциалов горение прекращается, когда из-за растяжения пламени теплотери настолько возрастают, что распространение пламени становится невозможным. Уменьшение расстояния от входа в канал, на котором происходит погасание, при повышении U связано с ростом теплотерь ввиду увеличения вытянутости пламени и ослабления «запирания» выхода из канала, поскольку снижается время догорания смеси перед сужением.

С увеличением h пороговая разность потенциалов возрастает по линейному закону. Если для канала высотой 2,5 мм она составляет 2,3 кВ, то для канала с $h = 3,1$ мм $U_{\text{п}} = 6$ кВ. Это и естественно, поскольку с увеличением h теплотери в стенки уменьшаются, в силу чего для гашения фронта пламени приходится растягивать его еще больше, накладывая большую разность потенциалов.

Наличие влаги в смеси уменьшает вытянутость фронта и амплитуду его пульсаций. Как показали опыты, для предотвращения передачи пламени через узкий канал во влажной смеси приходится использовать электрическое поле большей напряженности. Так, при влажности 1,5% $U_{\text{п}} = 2,6$ кВ для канала с $h = 2,5$ мм. Различие $U_{\text{п}}$ в одном и том же канале, наполненном сухой и влажной смесью, связано со значительно большим влиянием электрического поля [5] на сгорание сухих смесей, чем влажных.

В каналах, высота которых достаточно велика, значение \bar{v} возрастает либо по всей длине ($h = 10$ мм), либо в первой его половине ($h = 5$ мм), несколько уменьшаясь по сравнению со скоростью пламени в отсутствие поля вблизи выхода его из канала. Последнее связано со

свободным истечением продуктов реакции из канала из-за интенсификации их движения.

Таким образом, наложение на зону горения электрического поля интенсифицирует процесс горения в каналах, высота которых достаточно велика, и уменьшает его вплоть до полного подавления в каналах меньшего размера (3,1 мм и меньше). Непременным условием погасания при этом является снижение \bar{v} . При $U > U_{\text{п}}$ сокращается расстояние от входа в канал, на котором происходит погасание. Это свидетельствует о том, что запас надежности действия огнепреградителей, основанных на явлении деформации пламени в электрическом поле, может регулироваться за счет вариации разности потенциалов выше порогового ее значения без уменьшения размеров пламягасящих каналов, как это делается до сегодняшнего времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Д. Саламандра.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
2. Г. Д. Саламандра, И. М. Вентцель, А. А. Зеленков. БИ, 1973, 11.
3. Г. Д. Саламандра, И. К. Федосеева.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка, 1977.
4. Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
5. Г. Д. Саламандра, Н. И. Майоров. ФГВ, 1978, 14, 3.

Поступила в редакцию 23/XII 1985

К ДЛИННОВОЛНОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛАМИНАРНОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

А. С. Плешанов
(Москва)

При распространении ламинарного пламени в горизонтальной трубе с вертикальным внешним электрическим полем в случае, когда верхний электрод имеет больший потенциал, по достижении некоторого критического напряжения U_* наблюдается переворачивание несимметричного фронта пламени [1]. Обнаружено, что если применены голые электроды, величина U_* меньше при изолированных электродах. Кроме того, установлено, что в случае голых электродов электрический ток идет преимущественно по фронту пламени.

Трактуя переворачивание фронта как потерю его устойчивости, заключаем, что фронт пламени во внешнем электрическом поле должен обладать меньшей устойчивостью в случае голых электродов, чем при их изоляции. Преимущественное прохождение тока по фронту означает, что в свежей смеси концентрация носителей тока (в данном случае — положительных ионов) мала. Простейшая модельная ситуация такова: в свежей смеси ток вообще отсутствует, а потенциал продуктов сгорания постоянный. Устойчивость фронта в такой постановке следует сравнить с таковой при наличии тока в свежей смеси и постоянном потенциале продуктов сгорания [2]. Вторая постановка моделирует ситуацию с изолированными электродами, когда внешнее электрическое поле при отсутствии тока во внешней цепи разделяет заряды разных знаков внутри трубы, и их перемещение к электродам создает внутренний ток. Строго говоря, движение среды и электрическое поле в такой ситуации могут быть описаны лишь в рамках двумерной теории. Однако на расстояниях, малых по сравнению с диаметром трубы, применимо одномерное описание [2].