

При обращении в нуль постоянной Маркштейна μ (8) преобразуется в известное уравнение эволюции фронта пламени, рассматриваемого как гидродинамический разрыв. Ранее в [5] методом геометрической акустики подробно изучена эволюция такого бесконечно узкого фронта пламени. В частности, продемонстрирован эффект самостабилизации волны горения и установление стационарной негладкой формы ее поверхности при распространении в гармоническом и амплитудно-модулированном реагирующем потоках. Более общий расчет по уравнению (8) стационарной формы зоны реакции с учетом диссипативного сглаживания линий излома будет проведен в следующей работе.

Таким образом, показано, что зависимость скорости нормального распространения фронта пламени от кривизны зоны реакции в форме Маркштейна вытекает из специального класса решений тепловой задачи горения. Более того, нарушение формулы Маркштейна означает, что для пламени с конечной тепловой толщиной решений типа (2) в квазистационарном случае не существует.

Поступила в редакцию 18/IV 1984

ЛИТЕРАТУРА

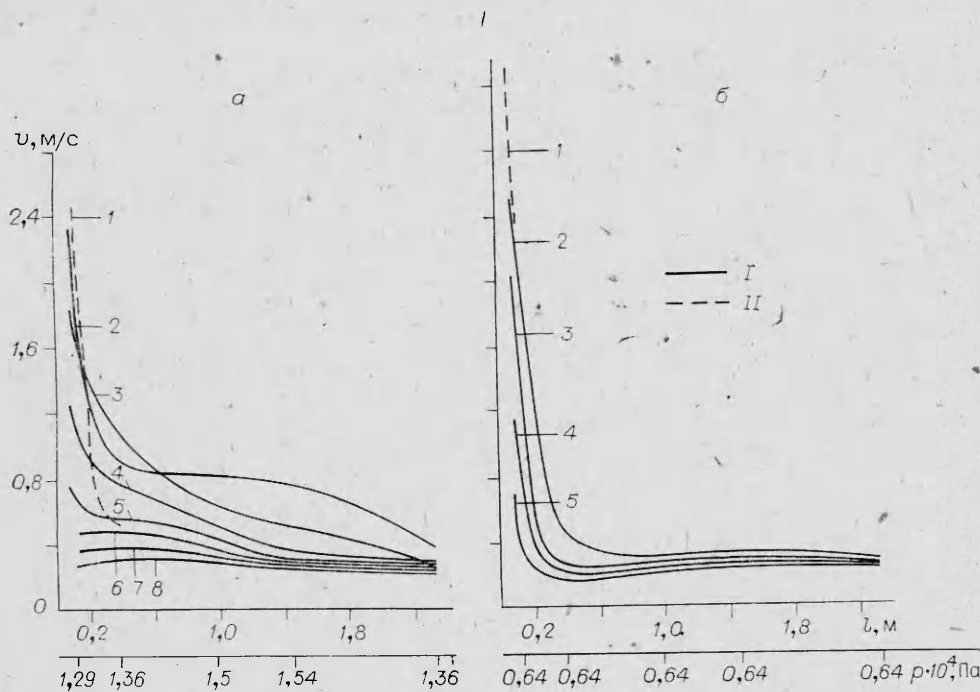
1. Дж. Г. Маркштейн. Нестационарное распределение пламени. М.: Мир, 1968.
2. А. П. Алдушин, С. Г. Каспарян. Докл. АН СССР, 1979, 244, 1.
3. В. П. Маслов. УМН, 1983, 38, 6 (234).
4. Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
5. Б. Е. Рогоза. ФГВ, 1983, 19, 3.

ЭФФЕКТ ОБЕДНЕНИЯ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ ПЕРЕД ФРОНТОМ ПЛАМЕНИ

Л. К. Парфенов
(Томск)

Появление искривленной структуры многие исследователи объясняли влиянием внешних ускорений на фронт пламени или же за счет теплового расширения продуктов горения. В этом случае они полагали, что пламена всегда должны образовывать «складки» и распадаться на ячейки.

Образованию кривизны могут способствовать также дополнительные эффекты процессов переноса. Так, при отсутствии ускорения потока в направлении, перпендикулярном поверхности пламени, констатировали самопроизвольное образование «складок» и распад пламени, присущих только для смесей, состав которых отличается от стехиометрических. При этом коэффициент диффузии недостающего компонента существенно превышает коэффициент избыточного компонента. Последнее приводит к самопроизвольному частичному расслоению компонентов смеси непосредственно перед фронтом пламени. Поскольку скорость горения зависит от состава, это разделение ведет к локальным увеличениям и уменьшениям скорости горения: на поверхности пламени образуются «складки», приводящие к ячеистой структуре. В [1] обнаружено различие в пределах распространения пламени для водородно-воздушных смесей при распространении вверх (4% водорода) и вниз (9% водорода). Различия в пределах распространения пламени в [2] объяснены так: горение вблизи предела в водородных-смесях поддерживается за счет диффузии водорода к сферической поверхности поднимающегося шарика горячих газов. Приток водорода к шарiku благодаря более высокому коэффициенту диффузии водорода по сравнению с кислородом вызывает смещение состава в область богатых смесей, что дает возможность достичь



Зависимость видимой скорости распространения пламени от пройденного пути от искрового промежутка при $p_0 = 1,29 \cdot 10^4$ (а) и $0,64 \cdot 10^4$ Па (б).
 I — распространение вверх; II — распространение вниз. Содержание водорода, %: а) 1, 2 — 10, 3 — 9, 4 — 8, 5 — 7, 6 — 6, 7 — 5, 8 — 4,5; б) 1, 2 — 10, 3 — 9, 4 — 8, 5 — 7.

температуры воспламенения и объясняет также неполноту сгорания. Во многих исследованиях доказано, что состав изменяется под действием диффузии, что послужило причиной отсутствия сомнений в реальности так называемой избирательной диффузии. Но рассуждения многих авторов об этом эффекте несколько неопределенны, так как доказательство Гольдманна, кажущееся на первый взгляд простым и убедительным, при детальном рассмотрении содержит некоторые трудности.

Вывод работы [2] о том, что конвективный подъем пламени необходим для подведения к нему свежей смеси, так как диффузионный процесс истощает недостаточный компонент в области, находящейся вблизи пламени, приводит к заключению — в условиях невесомости бедные водородные пламена будут затухать. Но, как показывают результаты исследований пламен в условиях невесомости, бедные водородные пламена распространяются, только скорости их распространения имеют другую величину, чем в нормальных условиях (см. табл. 1 в работе [3]).

Объяснение всех замеченных аномалий при исследовании процессов горения и распространения пламени необходимо искать в явлении обеднения смеси задолго перед фронтом пламени. Для объяснения этого явления проведены экспериментальные исследования водородно-воздушных смесей. Ошибка эксперимента составила $\pm 5\%$.

На рисунке представлены графики зависимости скоростей распространения пламени v от пути, пройденного им от искрового промежутка (поджигающего) l . При экспериментальном исследовании распространения пламени водородно-воздушных смесей с содержанием водорода до 7% и начальном давлении $p_0 = 1,29 \cdot 10^4$ Па наблюдается небольшое увеличение скорости распространения пламени на начальном отрезке пути. После разгонного участка скорость уменьшается и достигает стационарной величины 20—30 см/с. Длина разгонного участка укорачивается по мере роста в смеси содержания водорода. При 7% водорода разгонный участок исчезает (скорость фиксируется с $l = 0,08$ м), скорость распространения пламени уменьшается сразу же на начальном отрезке пути. Чем богаче смесь, тем больше снижение v (см. рисунок, а), но

начиная с $l \approx 0,2$ м скорость уменьшается медленнее. Интересно отметить, что величина v для более богатых смесей, как и для бедных (4,5% водорода), стремится к $v = 20$ см/с. Скорости распространения пламен в смесях с начальным содержанием водорода 4,5 и 9%, измеренные в конце пути, одинаковы по величине. Очевидно, к этому моменту содержание водорода тоже одинаково — 4,5%.

При распространении пламени в смеси с содержанием водорода 10% задержка снижения v отмечается сразу за первоначальным резким уменьшением. Другими словами, на расстоянии с 0,6 до 1,3 м наблюдается постоянство величины v , после чего она снова падает. В этом случае на задержку спада скорости или на ухудшение обеднения исходной смеси оказывает влияние возрастающее давление в камере, изменение которого представлено на рисунке (см. нижнюю абсциссу). Видно, что с $l = 0,3$ м начинает возрастать давление, которое сопровождается задержкой уменьшения v . С расстояния 1,3 м давление уменьшается и снова скорость замедляется, стремясь к $v = 20 \div 30$ см/с. Из этого следует, что при распространении пламени по камере на выход скорости на стационарную величину существенное влияние оказывает давление. Чем меньше давление (независимо какое — начальное или в результате расширения продуктов реакции), тем раньше скорость приобретает стационарную величину 20—30 см/с.

На рисунке *a* (кривая 1) представлена зависимость скорости распространения пламени от пройденного пути при распространении сверху вниз, видно, что скорость распространения падает больше, чем при распространении снизу вверх, и пламя может распространяться только на $l \sim 0,4$ м, после чего затухает. В этом случае диффузионный поток усиливает обеднение исходной смеси до предельного значения, при котором пламя не может распространяться. Интересно, что скорость, замеренная на первоначальном отрезке $l = 0,08$ м, несколько больше при распространении сверху вниз, чем при распространении снизу вверх. А при дальнейшем распространении она оказывается значительно ниже.

При $p_0 = 0,64 \cdot 10^4$ Па скорости пламен, способных распространяться при таких давлениях, приобретают стационарную величину 20—30 см/с гораздо раньше, чем при $p_0 = 1,29 \cdot 10^4$ Па (см. рисунок, *b*). Обеднение исходной смеси происходит тем быстрее, чем меньше давление в камере. На рисунке *b* заметны незначительные уменьшения скоростей ниже стационарной величины с последующим возвращением их на постоянную величину. В смесях с содержанием водорода менее 7% пламена не способны распространяться из-за большого обеднения исходной смеси перед фронтом пламени или же из-за уменьшения v ниже стационарной величины на начальном участке пути. Скорость распространения пламени, замеренная на первоначальном пути 0,08 м, в составе с содержанием водорода 10% при распространении сверху вниз больше, чем при распространении снизу вверх (см. рисунок *b*, кривая 5). При давлении $0,64 \cdot 10^4$ Па пламя, распространяющееся сверху вниз, быстрее теряет скорость, чем при $p = 1,29 \cdot 10^4$ Па, и затухает, не дойдя до отметки $l = 0,38$ м.

Максимальное обеднение исходной смеси и установившиеся скорости распространения пламен, лежащие в пределах 20—30 см/с, будут предпочтительны для любых начальных давлений в камере, поскольку при повышенных давлениях ухудшается процесс обеднения начальной смеси. Это хорошо иллюстрируется кривой 2 на рисунке *a*, где небольшое увеличение давления в камере (порядка $0,25 \cdot 10^4$ Па) приводит к задержке обеднения, и на конечном отрезке пути скорость еще не успела принять стационарную величину. При еще больших давлениях (первоначальных либо в результате расширения продуктов реакции) обеднение еще больше замедлится, а скорость от стационарной величины отклонится. Хорошей иллюстрацией обеднения исходной смеси и выхода величины v на стационарный режим служат результаты исследований при низких начальных давлениях, когда расширение продуктов реакции компенсируется

убытием числа молей в ходе химической реакции, и все процессы в камере происходят при постоянном давлении.

Явление обеднения исходной смеси подтверждено экспериментально. В устройстве для отбора исходной смеси для анализа на хроматографе электромагнитный клапан устанавливали в конце камеры на расстоянии 2,4 м от поджигающих электродов. Открывание и закрывание клапана фиксировали шлейфовым осциллографом, в открытом состоянии он находился $\sim 0,25$ с. Исходную смесь отбирали в заданное время. Исследование проводили при начальном давлении в камере $0,64 \cdot 10^4$ Па со смесями, содержащими $\sim 10\%$ водорода, при распространении пламени снизу вверх. В серии из 10 опытов показания хроматографа таковы: содержание водорода в исходной смеси составляет $9,6\%$ до начала процесса горения в камере и $7,9\%$ при нахождении фронта пламени в конце камеры на расстоянии примерно 0,23 м перед открывшимся клапаном.

Экспериментальные исследования подтверждают наличие явления обеднения исходной смеси перед фронтом пламени, распространяющегося по камере конечных размеров.

Поступила в редакцию 24/1 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. H. F. Coward, F. Brinsley. J. Chem. Soc., 1914, 105, 1859.
2. F. Goldmann. Z. Phys. Chem., 1929, B5, 305.
3. Л. К. Парфенов. ФГВ, 1978, 14, 4, 9.

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ ЛАЗЕРНЫМ МОНОИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*В. Б. Иоффе, А. В. Долголаптев, В. Е. Александров, А. П. Образцов
(Люберцы)*

Использование импульсного лазерного излучения в качестве инструмента воздействия открывает новые возможности для исследования быстропотекающих процессов во взрывчатых веществах. Практически ни один из традиционных способов воздействия (удар, трение, ударная волна и т. д.) не позволяет в столь широком диапазоне регулировать энергию при постоянстве времени энерговода и размеров зоны воздействия, что значительно упрощает анализ экспериментальных результатов.

Наибольший интерес представляет выявление факторов, определяющих порог восприимчивости ВВ к лазерному излучению, и установление количественных связей между параметрами источника и свойствами системы, воспринимающей воздействие. Теоретическое решение этой задачи, связанное с описанием нестационарных процессов, пока затруднительно, а имеющийся экспериментальный материал крайне разнороден и не поддается однозначной количественной интерпретации в силу того, что большинство исследователей не принимают во внимание влияние на результат масштабных факторов — диаметров пятна облучения d_n и образца d_o .

Форма и длительность лазерного импульса также в значительной мере определяют возможность корректного подхода к анализу экспериментальных результатов. К примеру, в режиме свободной генерации, когда воздействие осуществляется хаотичным цугом из нескольких десятков импульсов, инициирование, как правило, вызывается самым интенсивным из них [1], общая длительность воздействия τ_n при этом значительно превышает время задержки воспламенения τ_3 . Поэтому наиболее корректными и удобными для анализа представляются результаты, полученные при воздействии на ВВ моноимпульсного излучения, когда $\tau_n \ll \tau_3$.