

пламени на нижнем пределе по давлению имеет конвективную природу.

С целью исключения влияния поджатия смеси в момент гашения и эффектов нестационарного участка, обусловленных, как отмечалось выше, особенностями закрытого сосуда, дальнейшие опыты проводились по схеме I с верхним расположением ресивера по методике, описанной выше. Для опытов выбрана система $3,5\text{CH}_4 + 96,5\text{N}_2\text{O}$, пламена которой дают сильные сигналы ионизационных датчиков и инициируются искрой при $p_i = 0,15$ МПа. При повышении начального давления реализуется переход из области гашения пламени в область стационарного распространения сверху вниз. Величина предельного давления при комнатной температуре составляет 0,28 МПа.

Данные по нормальным скоростям пламени смеси $3,5\text{CH}_4 + 96,5\text{N}_2\text{O}$, необходимые для расчета предельных условий, определялись методом начального участка в закрытой сферической бомбе и по показаниям ионизационных датчиков. Результаты измерений приведены на рис. 6. Видно, что барический показатель скорости пламени положителен в диапазоне 0,1—0,6 МПа и равен 0,15. На пределе $S_u = 3,9$ см/с, а $Re_0 = 428$. Экспериментальные и теоретические значения комплексов (3) соответственно равны 1,51 и 0,59 (в расчете принято $T_b = 2276$ К, $\rho_0 = 4,88$ кг/м³, $c_p = 0,902$ кДж/(кг·К), $\lambda_0 = 17,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/м·К, $E = 167,5$ кДж/моль, $E_i = 11,1$). Таким образом, в системе $3,5\text{CH}_4 + 96,5\text{N}_2\text{O}$ также реализуется нижний конвективный предел по давлению.

Поступила в редакцию
10/VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Бабкин, А. В. Вьюн.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1972.
2. В. Н. Кривулин, Л. А. Ловачев и др.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1972.
3. В. С. Бабкин, А. М. Бадалян, В. В. Никулин.— В сб.: Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка, 1977.
4. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ: 1941, 11, 1, 159.
5. А. И. Розловский. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М., Химия, 1972.
6. Б. А. Иванов, С. М. Когарко. ПМТФ, 1964, 2, 160.
7. В. С. Бабкин, В. И. Бабушок и др. Archivum Thermodynam. Spalania, 1975, 6, 1, 101.
8. Э. А. Штессель. ФГВ, 1979, 15, 3, 10.
9. В. С. Бабкин, Л. С. Козаченко. ФГВ, 1966, 2, 3, 77.
10. А. Г. Блох. Основы теплообмена излучением. М.—Л., ГЭИ, 1962.
11. В. Лескнер. Combustion and Flame, 1972, 19, 1, 33.
12. Дж. Дж. Стокер. Волны на воде. М., ИЛ, 1959.

НОРМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ АЦЕТОНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

В. В. Мольков, В. П. Некрасов

(Балашиха)

Для расчета критических параметров различных систем взрывозащиты замкнутого технологического оборудования, в котором обращаются взрывоопасные газо- и паровоздушные смеси, необходимо знать величину нормальной скорости распространения пламени S_u в широком диапазоне давлений и температур. Имеющихся в литературе данных по скорости горения ацетоно-воздушных смесей явно недостаточно [1—3].

С целью определения нормальной скорости горения стехиометрической ацетано-воздушной смеси использован метод бомбы постоянного объема, позволяющий проводить исследования одновременно в области высоких давлений и температур, где методы горелки, трубы и мыльного пузыря трудно применимы. Эксперименты проводились в сосуде объемом 21,5 дм³ с эквивалентным радиусом 172,5 мм и отношением длины к диаметру ~1. Внутренняя поверхность сосуда отличалась от цилиндрической тем, что острые кромки цилиндра заменены коническими поверхностями с целью приближения ее к сферической. Источником зажигания служил разряд высоковольтной индуктивной искры длительностью ~3 мс и энергией ~14 МДж. Стехиометрическая ацетано-воздушная смесь задавалась по парциальным давлениям. Процесс регистрировался скоростной кинокамерой СКС-1М и тензометрическим датчиком давления, связанным с тензометрическим усилителем ТА-5 и шлейфным осциллографом Н117.

В опытах влияние конвекции и волн сжатия не учитывается. Минимальное значение числа Фруда, характерное для конечной стадии взрыва, составляет ~0,6, что превышает критическое значение 0,1—0,2 [4, 5]. Число Маха заведомо меньше величины 0,1, определяющей границу эффекта волн сжатия.

Появление спонтанной неустойчивости (ячеистой структуры) соответствует значению $Re \sim 10^3$ [6]. В проведенных экспериментах при начальных атмосферных условиях Re возрастает от $\sim 8 \cdot 10^3$ (при 15 мс после зажигания) до $\sim 2 \cdot 10^4$ в конце процесса. Таким образом, в течение, по крайней мере, указанного промежутка времени пламя имеет ячеистую структуру. Однако кинограммы, полученные на СКС-1М, указывают на сферичность пламени и, следовательно, на отсутствие развитой турбулентности ($\Delta r \ll r$).

Пренебрежение толщиной фронта пламени приводит к некоторому уменьшению значения S_u (практически ошибка лежит в пределах экспериментальной ошибки метода бомбы постоянного объема, не превышающей ~5% [7]). Из сказанного выше следует, что условия проведения эксперимента позволяют использовать для описания динамики развития взрыва модель сгорания газа в сферическом объеме с центральным зажиганием [8, 9].

Для определения значений максимального давления p_e и адиабатической температуры $T_{ад}$ взрыва, а также отношения теплоемкостей продуктов сгорания $\gamma_b = (c_p/c_v)_b$, используемых в теоретической модели, на основе метода [10] составлена программа численного решения на ЭВМ. Определенные значения конечного давления p_e и $T_{ад}$ для стехиометрической ацетано-воздушной смеси при начальной температуре $T_i = 298,15$ К и начальных давлениях p_i приведены ниже.

p_i , МПа	0,0993	0,0811	0,0608	0,0405
p_e , МПа	0,916	0,746	0,556	0,368
$T_{ад}$, К	2576,75	2566,17	2550,95	2529,43

Вычисленные значения отношений теплоемкостей составляют $\gamma_b = 1,24$ и $\gamma_u = 1,36$ (индекс u соответствует параметрам свежей смеси).

Зависимость S_u от давления и температуры принималась в виде

$$S_u = S_{ui}(T/T_i)^m (p/p_i)^n. \quad (1)$$

В предположении адиабатичности сжатия свежей смеси можно перейти от температурного и барического показателя m и n к смешанному показателю степени $\varepsilon = m + n - m/\gamma_u$ и записать для изменения в течение взрыва

$$S_u = S_{ui}(p/p_i)^\varepsilon. \quad (2)$$

Два неизвестных параметра модели S_{ui} и ε определялись методом оптимизации теоретических зависимостей $p(t)$, $r(t)$ по осредненным экспери-

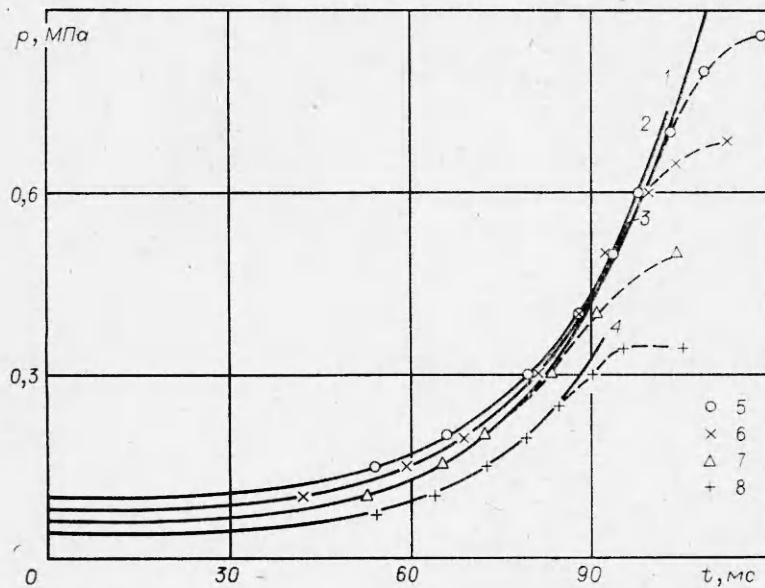


Рис. 1. Изменение давления в течение развития взрыва (сплошные линии — расчет).

p_i , МПа: 1, 5 — 0,0993; 2, 6 — 0,0811; 3, 7 — 0,0608; 4, 8 — 0,0405.

ментальным с использованием ЭВМ. Погрешность экспериментов, характеризующая воспроизводимость опытов, не превышала $\pm 5\%$ (сдвиг по оси времени). Ошибка оптимизации не превышала погрешности эксперимента, которая, следовательно, определяет ошибки полученных в работе величин. Данные эксперимента и оптимизированные теоретические зависимости приведены на рис. 1, 2 (обозначения точек и линий на рис. 1—4 одинаковы). Для стехиометрической ацетона-воздушной смеси найдено $\varepsilon = 0,24 \pm 0,04$. Величина S_{ui} зависит от p_i и T_i . На точность определения скорости горения оказывает влияние точность используемых в вычислениях параметров γ_b, γ_u, p_e . Например, расчеты в приближении $\gamma_b = \gamma_u = 1,4$ приводят к завышению на $\sim 6\%$ значения S_{ui} и к уменьшению на $\sim 20\%$ величины ε . Совместное использование неточно определенных параметров γ_b, γ_u и p_e может привести к еще большим погрешностям.

Использование уравнений, полученных в предположениях модели [8], позволяет получить сведения об особенностях изменения в процессе развития взрыва основных параметров свежей смеси и продуктов сгорания. Так, температура продуктов сгорания T_b имеет минимум при $t \sim \sim 0,2t_e$ (рис. 3), который можно объяснить наличием двух противоположных тенденций: уменьшение T_b за счет расширения продуктов сгорания

T , К	p , МПа	n	m	T , К	p , МПа	n	m
296	0,04—0,06	—0,13	1,4	425	0,16—0,25	—0,10	1,28
	0,06—0,08	—0,25	1,85		0,25—0,33	—0,25	1,85
	0,08—0,1	—0,28	1,96		0,33—0,4	—0,29	2,00
325	0,06—0,09	—0,12	1,36	475	0,25—0,37	—0,08	1,21
	0,09—0,12	—0,24	1,81		0,37—0,5	—0,25	1,85
	0,12—0,14	—0,33	2,15		0,5—0,61	—0,30	2,04
375	0,1—0,15	—0,10	1,28	520	0,35—0,52	—0,06	1,13
	0,15—0,2	—0,24	1,81		0,52—0,7	—0,25	1,85
	0,2—0,25	—0,31	2,08		0,7—0,86	—0,32	2,12

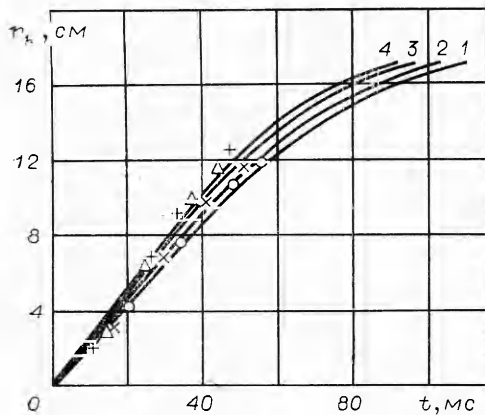


Рис. 2. Изменение радиуса пламени в течение развития взрыва.

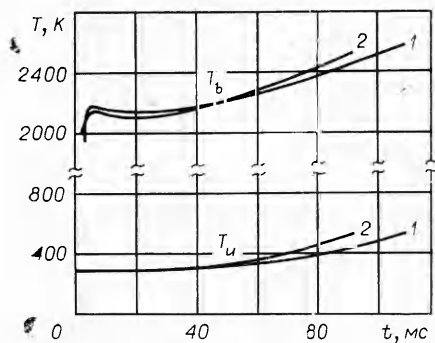


Рис. 3. Теоретические зависимости температуры продуктов сгорания T_b и свежей смеси T_u от времени развития взрыва при p_i , равном 0,0993 (1) и 0,0405 МПа (2).

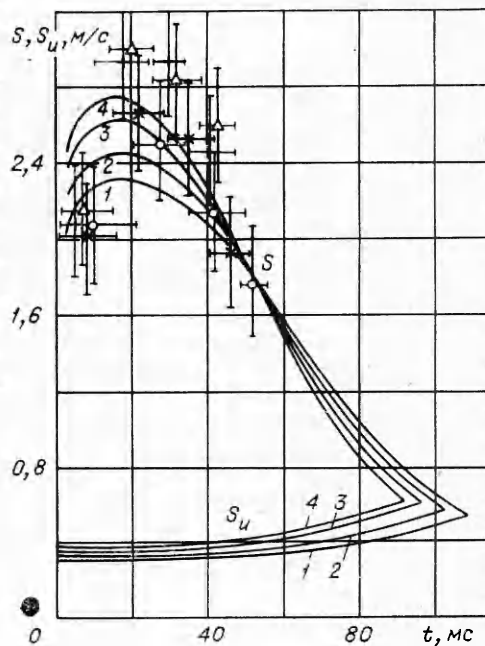


Рис. 4. Изменение видимой S и нормальной S_u скорости распространения пламени в течение развития взрыва.

и увеличение T_b из-за сжатия продуктов сгорания вследствие роста давления в сосуде.

Данные теории и эксперимента (обработанные экспериментальные зависимости радиуса пламени от времени развития взрыва на рис. 2) по скорости горения представлены на рис. 4. Видимая скорость достигает максимума при $t \approx 0,15t_0$. Существование максимума подтверждается экспериментально как в данной работе, так и в работе [11].

Для получения семейства кривых, описывающих изменение S_u от давления при постоянных значениях температуры (рис. 5), использовались зависимости изменения нормальной скорости в течение взрыва (2) и условие адиабатичности сжатия свежей смеси $p/p_i = (T_u/T_i)^{\gamma_u/(\gamma_u-1)}$. Аналогичный подход к определению $S_u = S_u(p, T)$ использовался для

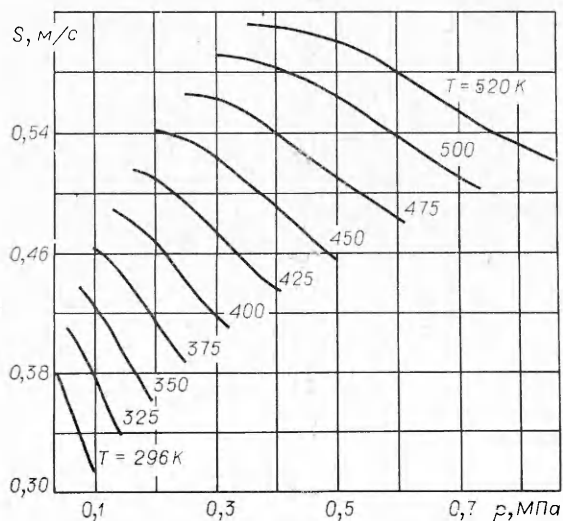


Рис. 5. Зависимость нормальной скорости распространения пламени стехиометрической ацетон-воздушной смеси от давления и температуры.

стехиометрических ацетилено- [12] и метановоздушных [7] смесей.

По определенной зависимости $S_u(p, T)$ для ацетоно-воздушной смеси (см. рис. 5) можно получить значения барического n и по связи ϵ , n и m температурного m показателей степени в (1). Средние значения m и n в исследованной области давлений и температур приведены в таблице и изменяются в пределах $n \approx - (0,05-0,33)$ и $m \approx 1,32-2,15$.

Таким образом, применение метода бомбы постоянного объема совместно с методом оптимизации позволило обнаружить ряд особенностей динамики развития взрыва в замкнутом объеме, в частности, немонотонность изменения температуры продуктов сгорания и видимой скорости, а также определить для стехиометрической ацетоно-воздушной смеси температурную и барическую зависимость нормальной скорости распространения пламени в достаточно широком диапазоне давлений и температур.

Авторы выражают благодарность В. С. Бабкину и В. Т. Монахову за обсуждение результатов работы и критические замечания.

Поступила в редакцию
10/VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Щелки, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
2. В. И. Водяник. Взрывозащита технологического оборудования. Киев, Техника, 1979.
3. Г. Г. Орлов. ЖВХО им. Д. И. Менделеева, 1976, XXI, 4.
4. В. С. Бабкин и др. Archiwum termodynamik i spalania, 1975, 1.
5. В. С. Бабкин, А. В. Вьюн. ФГВ, 1976, 12, 2.
6. Л. А. Гуссаки др. ФГВ, 1977, 13, 1.
7. A. M. Garforth, C. T. Rallis. Comb. and Flame, 1978, 31, 53.
8. В. С. Бабкин, Ю. Г. Кононенко. ФГВ, 1967, 3, 2.
9. В. С. Бабкин, В. И. Бабушок, В. А. Суюшев. ФГВ, 1977, 13, 3.
10. А. М. Гурвич, Ю. Х. Шаулов. Термодинамические исследования методом взрыва и расчеты процессов горения. М., Изд-во МГУ, 1955.
11. Нестационарное распространение пламени. Под ред. Дж. Г. Маркштейна. М., Мир, 1968.
12. C. T. Rallis, A. M. Garforth, T. A. Steinz. Comb. and Flame, 1965, 9, 345.

НАСТИЛЬНЫЙ ФАКЕЛ НЕПЕРЕМЕШАНЫХ ГАЗОВ

К. Е. Джаугаштин, А. Л. Ярин
(Ленинград, Москва)

Приводятся результаты численного исследования плоских ламинарных факелов, развивающихся вдоль теплоизолированных и изотермических поверхностей в затопленном пространстве и в спутном потоке при истечении из щели конечного размера.

Рассмотрим полуограниченную струю топлива или окислителя, считая движение существенно дозвуковым. Суммарный порядок реакции топлива с окислителем положим равным двум, а зависимость константы скорости реакции от температуры — аррениусовской. Термо- и бародиффузией и различием в физических свойствах компонентов, участвующих в реакции, пренебрежем. Будем также считать, что зависимость вязкости от температуры линейна, а коэффициенты температуропроводности и диффузии изменяются пропорционально квадрату температуры. При этих