

8. Алдушин А. П., Каспарян С. Г. Докл. АН СССР, 1979, 241, 1, 67.
9. Махвиладзе Г. М., Новожилов Б. В. ПМТФ, 1971, 5, 51.
10. Манелис Г. Б., Смирнов Л. П. ФГВ, 1975, 11, 3, 354.
11. Алдушин А. П., Луговой В. Д., Мержанов А. Г. и др. Докл. АН СССР, 1978, 243, 6.

Поступила в редакцию 24/II 1987,
после доработки — 28/IX 1987

УДК 536.46 — 534.222.2

УСЛОВИЕ НАЧАЛА ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА В РАЗгерметизированном сосудаде прямоугольной формы

В. А. Горев, В. В. Беляев, В. Н. Федотов
(Москва)

При горении газов в ограниченных сосудах и помещениях темп роста и величина максимального избыточного давления p сильно зависят от скорости горения смеси и площади отверстий, через которые истекают газы, а следовательно, сбрасывается давление. Один из наиболее интенсивных режимов горения — вибрационный, который ранее изучался в связи с устойчивостью работы двигателей. В работах [1—3] отмечен аномальный рост p при горении газов в разгерметизированных сосудах, причем указывается на присутствие акустических колебаний. В случае взаимодействия пламени с колеблющимся потоком для поддержания и усиления колебаний необходимо выполнение условий критерия Рэлея [4, 5].

Если до момента разгерметизации сосуда, т. е. в замкнутом сосуде, используемые рядом авторов модели хорошо описывают процесс роста давления при горении [6], то после вскрытия сбросного отверстия та же модель, хотя и учитывающая истечение газов, часто не в состоянии объяснить темп роста и падения величины p . Так, в [7] предполагается, что при разгерметизации сосуда горение интенсифицируется, причем коэффициент интенсификации (отношение скоростей горения после и до вскрытия сосуда) выбирается из условия совпадения максимальных избыточных давлений в эксперименте и по модели. Однако при таком описании динамики изменения величины p обнаруживается сильное расхождение во времени достижения p_{\max} после разгерметизации: при расчете пик давления наступает раньше, чем дает эксперимент.

Авторы работы [1] связывают ускорение горения газовых смесей в камере с отверстием с действием на фронт пламени волны разрежения, которая генерируется в момент смены истечения из сосуда холодной исходной смеси. В качестве второго механизма называется турбулизация пламени непосредственно у места истечения, вызванная разной скоростью движения горячих и холодных газов. Очевидно, эти механизмы должны проявиться в случае зажигания в центре сосуда раньше, чем при иницировании у стенки, противоположной отверстию. Однако осциллограммы давления, приведенные в [1], указывают на то, что рост величины p начинается при зажигании в плоскости, противоположной отверстию, через 0,45 с, а в случае зажигания в центре сосуда — через 0,6 с.

В работе [2] отмечается, что аномально быстрое увеличение p в сосуде (с размерами $2 \times 2 \times 1,2$ м) сопровождалось акустическими колебаниями с частотой ~ 200 Гц, что соответствует основной моде стоячей волны между стенками, расположенными на расстоянии 2 м. Изменив условия проведения опыта (боковые стенки, а также верх и низ камеры были покрыты стекловатой), авторы добились подавления колебаний, а вместе с этим и аномального роста давления.

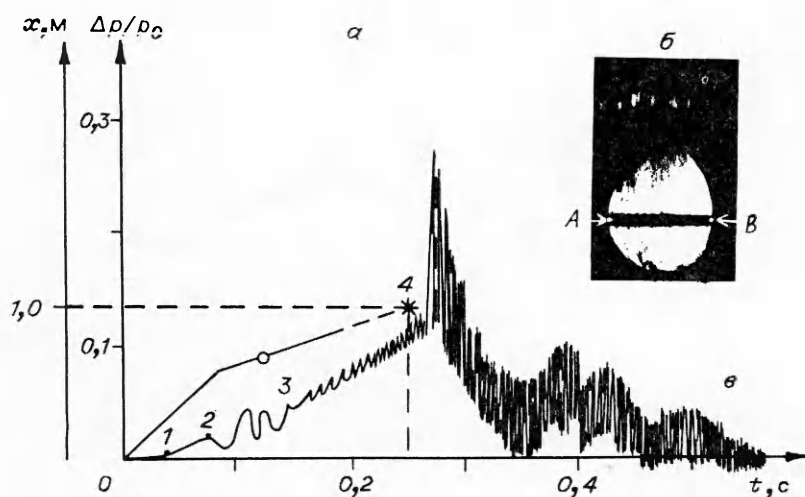


Рис. 1. Кинокадр взрывного горения смеси 4,5 % пропана + воздух ($AB = 0,6$ м, вверху светятся истекающие продукты сгорания) (б), зависимость расстояния X между точками A и B от времени (а) и осциллограмма давления внутри камеры при $\delta = 0$ (в).

Точка \circ соответствует рис. 1, б, точка \times — моменту касания стенок пламенем.

Еще один важный экспериментальный факт, обнаруженный в [2], состоит в том, что колебания усиливались и давление аномально росло только при горении богатых смесей пропана и воздуха, т. е. смесей, склонных к образованию ячеистой структуры. В [3] аномальный рост давления объясняется уменьшением темпа сброса при истечении газов из отверстия, причем уменьшение скорости истечения газов связывается с волновым движением среды в сосуде. Таким образом, предлагается два объяснения аномального роста давления после начала истечения продуктов сгорания: 1) интенсификация горения, вызванная или действием волны разрежения на фронт пламени (развитие тейлоровой неустойчивости) или взаимодействием фронта пламени со стоячей звуковой волной; 2) акустические колебания, возбужденные нестационарными процессами при истечении продуктов сгорания, которые уменьшают эффективную скорость истечения газов из сосуда.

В данной работе изучается механизм ускорения горения, тесно связанный с акустическими колебаниями внутри камеры, и предпринимается попытка указать причину возникновения последних.

Экспериментальное изучение процесса взрывного горения газов велось в кубической камере объемом 1 м^3 с квадратным отверстием сечением $0,36 \times 0,36$ м в центре верхней грани; в одну боковую сторону вставлено стекло размером $0,8 \times 0,8$ м, что давало возможность снимать процесс горения кинокамерой СКС-1М. Характер изменения давления внутри камеры измерялся датчиками давления ДМИ-0,3 и ДМИ-1. Горючая смесь готовилась добавлением к воздуху необходимого количества пропана, затем вентилятором 5 мин она перемешивалась и после этого выдерживалась еще 5 мин. Отверстие в это время было закрыто стальной пластиной толщиной $\delta = 2$ мм. Зажигание осуществлялось в центре камеры. В ряде опытов перед зажиганием пластина убиралась и горение затем проходило в разгерметизированном объеме ($\delta = 0$).

Процесс горения в данном опыте (рис. 1) можно разбить на стадии.

1. Сферическое горение с постоянной скоростью распространения пламени $3,15$ м/с. На оси времени этой стадии соответствует участок $0-1$. Темп роста давления медленный.

2. Вторая стадия характеризуется деформацией очага горения — происходит вытягивание объема продуктов сгорания, которые ограничены замкнутым фронтом пламени, в сторону отверстия, через которое истекает исходный газ. На оси времени эта стадия отмечена участком

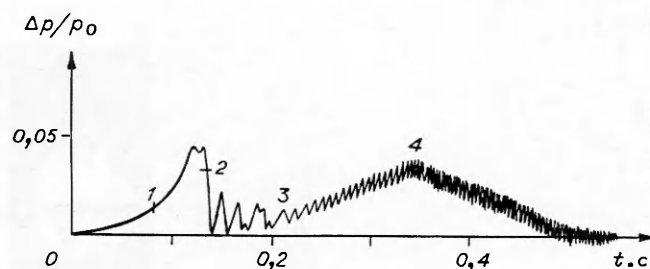


Рис. 2. Осциллограмма давления; $\delta = 2$.

1—2. Темп роста давления здесь несколько выше за счет более прогрессивного (по сравнению со сферической формой) увеличения поверхности пламени. Скорость распространения пламени в направлении, перпендикулярном истечению газов, вдоль линии AB та же, что и на первой стадии.

3. Начало третьей стадии характеризуется тем, что фронт пламени быстро устремляется в отверстие и начинается истечение продуктов сгорания. С этого момента продукты сгорания уже не полностью ограничены фронтом пламени, а приходят в соприкосновение и с атмосферным воздухом в месте истечения. Давление резко падает, затем опять возрастает, т. е. происходит несколько пульсаций заметной, но уменьшающейся амплитуды. Амплитудное значение пульсаций сравнимо с величиной давления, при котором начали истекать продукты сгорания. Очевидно, что скорость истечения горячих продуктов больше, чем холодных газов исходной смеси в $\sqrt{\rho_0/\rho_1}$ раз. В результате в начале третьей стадии внутри камеры распространяется волна разрежения, которая при взаимодействии с фронтом пламени «тащит» его назад, что приводит к развитию неустойчивости и ускорению горения. Однако нестационарные процессы низкой частоты быстро затухают (см. рис. 1, а, участок 2—3).

4. Четвертая стадия (участок 3—4 на рис. 1, а) характеризуется плавным ростом давления, постоянной скоростью распространения пламени 1,7 м/с; из отверстия истекают исключительно горячие газы, а в камере происходят слабые акустические колебания. Частота колебаний по мере увеличения объема, занятого продуктами сгорания, возрастает.

5. В момент времени, соответствующий точке 4, когда пламя касается стенок камеры, амплитуда акустических колебаний начинает резко расти, увеличивается и давление в камере. Частота колебаний ~ 400 Гц. При уменьшении концентрации пропана ниже 4% характер осциллограмм давления на первых четырех стадиях сохраняется, а на пятой, после того как пламя коснулось стенок и его поверхность начинает уменьшаться, давление плавно падает.

На рис. 2 приведена осциллограмма давления для горения смеси с содержанием пропана $C = 3,5\%$ (первый пик давления вызван наличием металлической пластины, закрывающей отверстие в камере). В условиях этого опыта акустическая составляющая давления хотя и присутствует, но ее интенсивность не растет. При $C = 3\%$ акустическую составляющую давления обнаружить не удалось. Режим вибрационного горения реализовывался в опытах, где концентрация пропана была больше стехиометрической.

Для поддержания и усиления колебательной составляющей давления необходимо выполнение критерия Рэлея. Вибрационное горение возбуждалось после касания пламенем стенок камеры. Этот экспериментальный факт объясняется, вероятно, тем, что наиболее благоприятные условия для усиления звуковой стоячей волны возникают тогда, когда источник тепловыделения (в данном случае фронт пламени) расположен в окрестности твердой стенки и, как показано в [4], критерий Рэлея

в данном случае выполняется. Но для того чтобы росла скорость горения, а вместе с ней и резко увеличивалось давление, необходимо, чтобы амплитуда акустических колебаний превышала некоторую пороговую величину (зависящую от частоты колебаний) [8]. Возможно, что при горении смесей, которые в отсутствие колебаний имеют ячеистую структуру, этот порог достигается легче.

Обратим внимание на то обстоятельство, что скорости горения и истечения горячих газов из камеры для смесей с содержанием пропана 3,5—4,5 % не столь сильно отличаются, так что механизм ускорения горения, связанный с наличием разрыва скорости вдоль пламени при истечении газов, скорее всего срабатывал или нет для всех смесей одновременно.

Исходя из того, что возбуждение вибрационного горения происходит после касания пламенем стенок, можно объяснить необычный порядок появления пиков давления в опытах работы [1] при изменении места инициирования горения. Действительно, чем дальше место инициирования горения от места истечения газов, тем позже начнется истечение продуктов сгорания, тем дольше видимая скорость пламени будет сохранять большее значение и тем раньше пламя подойдет к стенкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Solberg D. M., Pappas J. A., Skrawstard E. // 18th Symp. (Intern.) on Combustion, 1981.
2. Van Wingerden C. J. M., Zeenwen J. P. Comb. Flame, 1983, 51, 109.
3. McCawn D. P. J., Thomas G. O., Edwards D. H. Arch. Comb., 1985, 5, 1, 83.
4. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение.— М.: Физматгиз, 1961.
5. Рэлей Дж. В. Теория звука.— М., 1955.— Т. 2.
6. Bradley D. B., Mitcheson A. Comb. Flame, 1978, 32, 221.
7. Yao C. // Hass Prevention Symp., 1971.— V. 8.
8. Маркштейн Дж. // Вопросы горения и детонационных волн.— М.: Оборонгиз, 1968.

Поступила в редакцию 25/XII 1985,
после доработки — 8/IX 1987

УДК 536.46

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АГЛОМЕРАЦИИ АЛЮМИНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕВЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

О. Б. Ковалев
(Новосибирск)

Эффективность использования смесевых конденсированных систем (СКС) существенно зависит от степени агломерации порошкообразного металла на реагирующей поверхности. Процесс агломерации металлов на поверхности горения исследуется более двух десятков лет. К настоящему времени накоплен огромный экспериментальный материал [1—9], на основе которого определились физические представления этого явления и удалось сформулировать ряд качественных закономерностей влияния на него природы горючего и окислителя, концентраций и размеров дисперсных компонентов, давления и скорости обдува поверхности горения.

Один из главных вопросов в теории агломерации — определение размеров агломератов, покидающих поверхность горения. Полное описание механизма агломерации с учетом многообразия физических процессов горения СКС затруднено, поэтому применимость существующих моделей [10—14] сильно ограничена. Модель накопления и установления контактов между исходными частицами металла в жидковязком поверх-