

Из вычислений также следует, что чем меньше скорость горения ВВ зависит от начальной температуры, тем более вероятен переход ВВ на другой стационарный режим горения по прекращении действия света, т. е. тем больше критические световые потоки.

*Поступила в редакцию
12/X 1970*

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Михеев, С. С. Хлевной. ФГВ, 1968, 4, 1.
2. В. Ф. Михеев, С. С. Хлевной. ФГВ, 1968, 4, 4.
3. А. А. Ковальский, С. С. Хлевной, В. Ф. Михеев. ФГВ, 1967, 3, 4.
4. В. Ф. Михеев. Канд. дисс. ИХКиГ СО АН СССР, Новосибирск, 1970.
5. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1964, 3.
6. Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1962, 5.
7. Б. В. Новожилов. ФГВ, 1969, 5, 1.
8. Э. В. Конев, С. С. Хлевной, ФГВ, 1966, 2, 4.
9. Ю. А. Гостищев, А. Д. Марголин. ФГВ, 1965, 1, 2.
10. А. М. Коротков, О. И. Лейпунский. Сб. «Физика взрыва», № 2. М., Изд. АН СССР, 1953.
11. Э. В. Конев. ФГВ, 1965, 1, 2.

УДК 662.311.1+536.46

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ГОРЕНИИ ПОРОХА

*И. Б. Светличный, А. Д. Марголин, П. Ф. Похил
(Москва)*

Низкочастотные (неакустические) автоколебания горения возникают в определенных условиях при горении пороха как в бомбе постоянного давления, так и в полузамкнутом объеме [1—5].

В данной работе с помощью различных экспериментальных методов исследованы низкочастотные автоколебательные процессы при горении чистого пороха Н и с добавкой 5,8% Al в условиях бомбы постоянного давления (БПД) и в полузамкнутом объеме. Схема опыта в БПД изображена на рис. 1. Цилиндрический образец пороха диаметром 10 или 15 мм, бронированный по боковой поверхности, сжигался в БПД объемом 2,5 л. В опыте измерялись: давление с помощью датчика ДД-10, интегральное свечение продуктов горения в объеме бомбы с помощью фотодиода ФД-2 и электропроводность зоны горения с помощью электродов, вмонтированных в образец пороха параллельно образующей цилиндра. Электроды диаметром 1 мм изготавливались из волокнистого графита и связки — эпоксидной смолы ЭД-5 и прочно скреплялись с материалом пороха [6]. Сигналы всех датчиков записывались на шлейфовом осциллографе Н-107.

В опытах по изучению низкочастотной неустойчивости горения пороха в полузамкнутом объеме цилиндрические образцы пороха длиной 150 мм, диаметром 38 мм с внутренним каналом диаметром 8 мм сжигались в камере сгорания с соплом при малых значениях свободного объема камеры. Измерялось среднее давление в камере сгорания, а так-

же колебания давления с помощью пьезокерамического датчика и электронного осциллографа с механической разверткой.

В литературе имеются указания [3, 7], что включение алюминия в состав топлива способствует возникновению низкочастотной неакустической неустойчивости горения. Исходя из этих данных, нами вначале было исследовано горение пороха Н с добавкой 5,8% Al в условиях БПД. В этих опытах было обнаружено, что горение исследованных образцов при давлениях от 1 до 30—40 атм происходит с ясно выраженными периодическими пульсациями интегральной яркости свечения и электропроводности зоны горения

(рис. 2). Как видно из приведенной осциллограммы, пульсации яркости свечения происходят плавно, синусоидально с частотой от нескольких герц до нескольких десятков герц в зависимости от давления. Колебания электропроводности зоны горения σ происходят с такой же частотой, но форма их не синусоидальная: периоды плавного изменения величины σ чередуются с моментами резкого, пикообразного увеличения электропроводности, которые соответствуют на осциллограммах минимальным значениям яркости свечения. Кроме того, наблюдаются малые нерегулярные колебания электропроводности в течение всего времени горения.

Как показали измерения, частота наблюдаемых колебаний параметров процесса горения состава Н+5,8% Al линейно растет с увеличением давления p (рис. 3) в диапазоне $p=5-35$ атм. При $p<5$ атм колебания яркости свечения и электропроводности нерегулярны; при $p>35$ атм колебания свечения отсутствуют, а колебания электропроводности нерегулярны и имеют хаотический характер (шум).

В опытах с металлизированным порошком Н было исследовано влияние величины площади горячей поверхности на амплитуду колебаний интегральной яркости свечения. Результаты приведены на рис. 4. Увеличение диаметра образца пороха с 10 до 15 мм приводит к увеличению амплитуды колебаний, однако при дальнейшем увеличении размеров горячей поверхности амплитуда колебаний уменьшается и при $l \geq 40$ мм колебания интегральной яркости свечения при горении образцов пороха Н+5,8% Al отсутствуют.

Для выяснения роли добавки алюминия в возникновении низкочастотной неустойчивости горения было исследовано горение пороха Н без

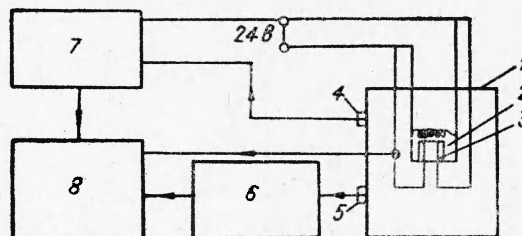


Рис. 1. Схема опыта в БПД.

1 — бомба постоянного давления; 2 — образец пороха; 3 — электроды; 4 — фотолиод; 5 — датчик давления ДД-10; 6 — прибор ИД-2И; 7 — усилитель; 8 — шлейфовый осциллограф.

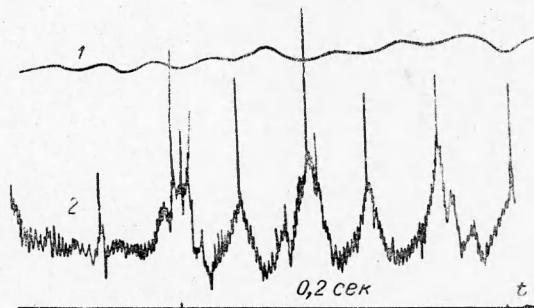


Рис. 2. Участок осциллограммы записи яркости свечения (1) и электропроводности зоны горения (2) при горении образца пороха Н+5,8% Al в БПД; $p=25$ атм.

добавок с помощью тех же экспериментальных методов. Образцы пороха Н диаметром 10 мм сжигались в условиях БПД при различном давлении. В этих опытах пульсирующий характер горения проявляется во всем исследованном диапазоне давлений от 10 до 140 атм. При давлениях 10—70 атм наблюдаются колебания электропроводности зоны горения; пульсации яркости свечения выражены слабее, чем при горении пороха Н с добавкой алюминия.

В области давлений 70—140 атм наблюдаются интенсивные колебания интегральной яркости свечения и электропроводности зоны горения

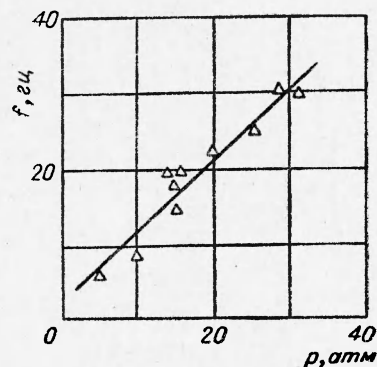


Рис. 3. Зависимость частоты пульсаций горения от давления, порох Н+5,8% Al.

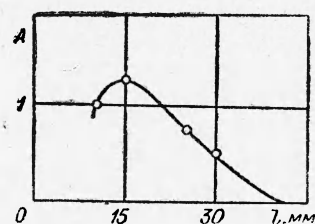


Рис. 4. Зависимость относительной амплитуды колебаний яркости от линейных размеров горящей поверхности.

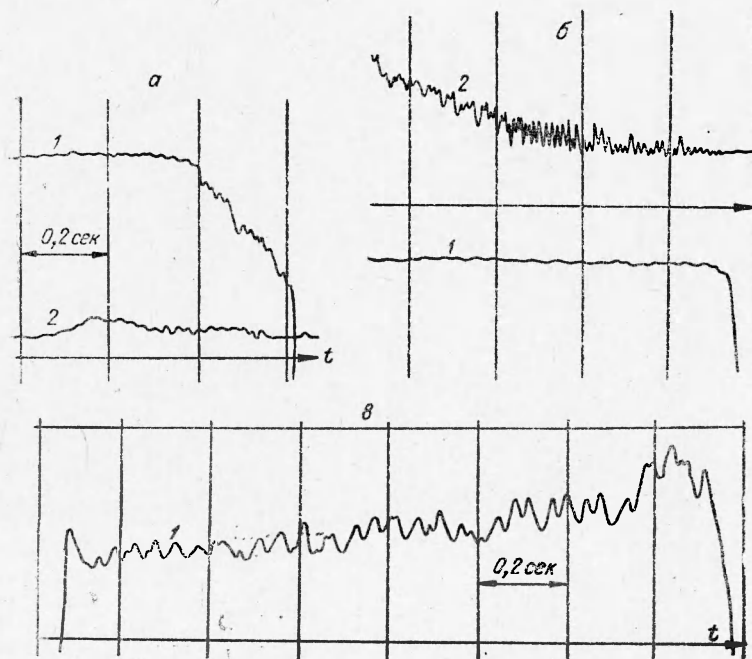


Рис. 5. Образцы записи яркости свечения (1) и электропроводности зоны горения (2) при горении пороха Н в БПД. Давление, атм: а) 50; б) 80; в) 97.

(рис. 5, б, в). (Большинство опытов в этом диапазоне проведено без измерения электропроводности). Следует отметить характерный факт появления двух значений частоты пульсаций в одном опыте (рис. 5, б).

Зависимость частоты колебаний f , наблюдаемых при горении пороха Н, от давления приведена на рис. 6. При $p < 35$ атм частота линейно увеличивается с ростом давления (кривая 1), причем значения f совпадают со значениями частот пульсаций горения образцов Н+5,8% АІ.

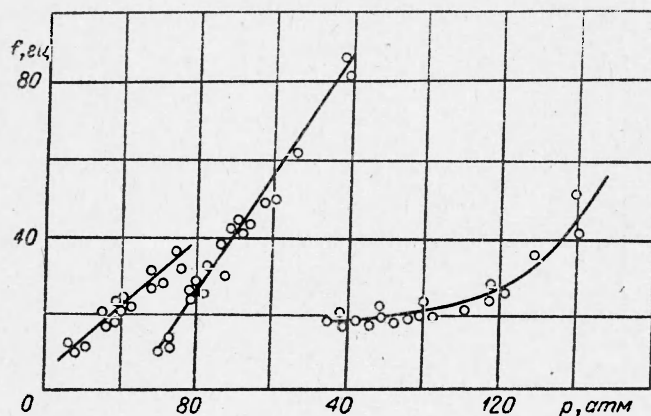


Рис. 6. Зависимость частоты колебаний от давления при горении пороха Н в БПД.

При $p = 35-80$ атм наблюдается также линейный рост частоты с давлением (кривая 2), но прямая $f(p)$ в этой области наклонена более круто к оси p . Наконец, в области давлений от 70 до 140 атм частота пульсаций изменяется по закону $f = cp^{1.55}$ (кривая 3). Отметим, что в области давлений 30—35 и 70—80 атм, где зависимости $f(p)$, соответствующие кривым 1, 2 и 2, 3, наблюдаются одновременно, на некоторых осциллограммах фиксируются в одном опыте два различных значения частоты пульсаций, отвечающих различным видам зависимости $f(p)$.

Проведенное в работе исследование низкочастотной неустойчивости горения пороха Н в полузамкнутом объеме показало, что при малом значении свободного объема камеры сгорания внутри камеры развиваются интенсивные автоколебания давления частотой в десятки герц (рис. 7). Амплитуда колебаний давления достигает 20 атм. Неустойчивость наблюдалась в диапазоне средних давлений в полузамкнутом объеме от 50 до 150 атм. При $p < 50$ атм развитие низкочастотной неустойчивости приводит к срыву горения с последующим характерным «чиханием».

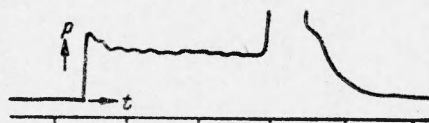


Рис. 7. Автоколебания давления при горении пороха Н в полузамкнутом объеме.

Частота колебаний давления зависит от p по закону $f = cp^{1.55}$. Исследования этого вида неустойчивости в работе [5] показали, что частота колебаний не зависит от величины свободного объема камеры сгорания. Согласно нашим измерениям, наблюдаемые значения частоты полностью соответствуют зависимости $f(p)$ (рис. 6), полученной при горении пороха Н в условиях бомбы постоянного давления. Опыты также показали, что горение образцов пороха Н+5,8% АІ в полузамкнутом объеме го-

раздо более устойчиво по отношению к низкочастотным колебаниям, чем горение пороха Н. Слабые колебания давления частотой $f \approx 20$ гц наблюдались в опытах при $p = 40\text{--}50$ атм. Следует отметить и большую устойчивость пороха Н с добавкой алюминия к срыву горения и чиханиям при низких давлениях. Образцы этого пороха устойчиво горели в полузамкнутом объеме при $p = 25$ атм, в то время как образцы пороха Н без добавок при давлениях ниже 50 атм затухали.

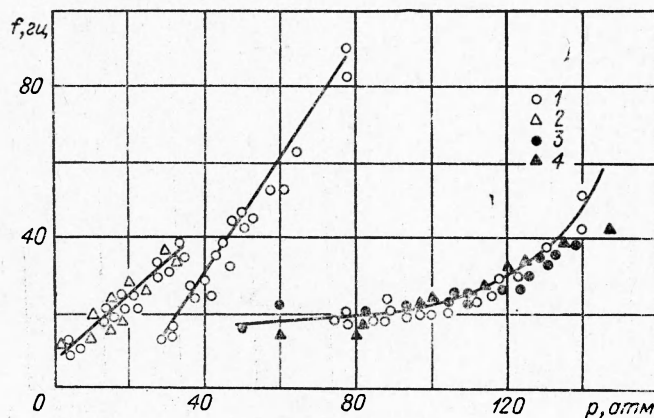


Рис. 8. Зависимость частоты автоколебаний процесса горения пороха от давления.

1 — горение пороха Н в БПД; 2 — горение образцов пороха Н+5,8% Al в БПД; 3 — горение пороха Н в полузамкнутом объеме; 4 — горение пороха Н в полузамкнутом объеме (данные работы [5]).

Таким образом, экспериментально показано, что при горении пороха Н и пороха Н+5,8% Al в условиях БПД и в полузамкнутом объеме происходят низкочастотные неакустические колебания параметров процесса горения в широком диапазоне давлений. Зависимость частоты пульсаций горения от давления, построенная по результатам всех опытов данной работы, показана на рис. 8. На этом же рисунке представлены частоты колебаний давления в полузамкнутом объеме при горении пороха Н, полученные в работе [5].

Обсуждение результатов

Автоколебательные режимы горения развиваются и поддерживаются вследствие перехода части энергии горения в энергию колебаний. Для выявления механизма наблюдаемых в опытах пульсаций горения важно установить, какие стадии (или зоны) процесса горения могут «порождать» колебания с частотой в несколько десятков герц. Одним из медленных процессов при горении является тепловая релаксация прогретого слоя пороха, характерное время которой τ_2 пропорционально отношению $\frac{\kappa}{u^2}$, где κ — температуропроводность конденсированной фазы пороха; u — скорость горения пороха. Согласно теории Я. Б. Зельдовича [8], горение пороха в полузамкнутом объеме становится неустойчивым, когда отношение времени истечения продуктов сгорания из камеры сгорания к времени релаксации прогретого слоя становится меньше некоторой критической величины. Теория предсказывает также низкочастотные колебания давления в полузамкнутом объеме на пределе

устойчивости. Пределы устойчивости исследованы экспериментально в работе [9].

В работе [5] подробно исследован низкочастотный автоколебательный режим горения пороха в полузамкнутом объеме и показано, что частота колебаний давления пропорциональна давлению p в степени 2ν , где ν — показатель степени в законе скорости горения $u = b p^\nu$, т. е. $f \sim \frac{u^2}{\tau} \sim \frac{1}{\tau_2}$. Частота колебаний, по данным работы [5], не зависит

от величины свободного объема камеры, что косвенно указывает на определяющую роль именно процесса горения пороха в развитии неустойчивости. Теоретические выводы о возможности автоколебаний горения, в основе которых лежит неустойчивость процессов в конденсированной фазе при горении пороха, содержатся в работе [10].

Из результатов наших экспериментов (см. рис. 8) видно, что значения частоты пульсаций горения пороха Н в опытах в БПД и частоты колебаний давления при горении пороха в полузамкнутом объеме в диапазоне давлений 70—140 атм полностью совпадают. Полученная зависимость частоты от давления $f = c p^{2\nu}$ соответствует для пороха Н зависи-

мости $f \sim \frac{u^2}{\tau} \sim \frac{p^{2\nu}}{\tau}$. Таким образом, результаты опытов указывают на единую природу пульсационного горения пороха Н в условиях БПД при повышенном давлении и низкочастотного автоколебательного горения пороха в полузамкнутом объеме. Из этих опытов также следует, что в основе механизма возникновения автоколебаний горения при повышенных давлениях, вероятно, лежит неустойчивость процесса тепловой релаксации прогретого слоя конденсированной фазы пороха.

При низких давлениях наблюдаемая в опытах линейная зависимость частоты пульсаций горения пороха Н и Н+5,8% Al не может быть объяснена только на основе представления о релаксирующем прогретом слое пороха. Характер изменения электропроводности зоны горения образцов пороха Н с добавкой алюминия (рис. 2) (плавное изменение и затем резкое увеличение электропроводности, соответствующее минимальному значению яркости свечения) показывает, что за время одного периода происходит как бы подготовка к замыканию зоны горения расплавленным слоем алюминия и затем быстрый разрыв образовавшейся пленки.

В случае горения пороха Н без добавок колебания электропроводности плавные, без резких пиков. Совпадение частоты пульсаций горения пороха Н и образцов с добавкой алюминия указывает, что причина пульсаций заложена в механизме горения самого пороха Н.

В некоторых работах [4, 12] высказывалось предположение о периодическом взрывном выгорании пороха по механизму теплового взрыва. Однако имеются и противоположные выводы [2]. Пульсации могут возникать в результате одновременного выгорания компонентов конденсированной фазы пороха, обладающих различной реакционной способностью и различной летучестью. Представление о таком механизме пульсаций развивается в работах по колебательному горению гетерогенных смесей [13, 14]. В случае пороха Н такими компонентами могут являться нитроглицерин и нитроклетчатка, обладающие различной летучестью.

Пульсирующий характер горения пороха при низких давлениях, по-видимому, тесно связан с неполнотой горения и диспергированием реакционного слоя конденсированной фазы в этих условиях [11]. Изменение вида зависимости частоты колебаний от давления в диапазоне $p=30-80$ атм (см. рис. 8), вероятно, объясняется переходом в этой об-

ласти от неполноты горения пороха к режиму полноты сгорания с ясно выраженными зонами горения.

Таким образом, в работе установлено, что горение образцов нитроглицеринового пороха в условиях бомбы постоянного давления имеет периодический, пульсирующий характер в широком диапазоне давлений от 5 до 140 атм, причем при повышенных давлениях автоколебания горения происходят также при горении пороха в полузамкнутом объеме. Самостоятельный интерес представляет вопрос, каким образом происходит синхронизация колебаний между отдельными точками поверхности горения, далеко отстоящими друг от друга. Из результатов опытов, показанных на рис. 4, видно, что увеличение линейных размеров горячей поверхности образца пороха до 30—40 мм приводит к уменьшению амплитуды колебаний вплоть до исчезновения пульсаций. В то же время увеличение диаметра образца пороха от 10 до 15 мм увеличивает амплитуду наблюдаемых колебаний. Это явление может быть объяснено тем, что пульсирующее горение отдельных малых участков поверхности, достаточно удаленных друг от друга, происходит несинхронно, в результате чего в среднем по поверхности параметры процесса горения меняются квазистационарно.

Фактором, синхронизирующим по фазе колебания горения в различных точках горячей поверхности, может служить тепловая волна в прогревом слое конденсированной фазы. Действие этого фактора может распространяться на расстояние, пропорциональное ширине прогреваемого слоя пороха при данных условиях опыта. Можно полагать, что колебания давления достаточно большой амплитуды способны синхронизировать колебания скорости горения пороха на большой поверхности. Не исключено, что такая синхронизация происходит при низкочастотной неустойчивости горения пороха в полузамкнутом объеме. Если указанная синхронизация колебаний горения в удаленных точках горячей поверхности имеет место, то в определенных условиях синхронизация может быть искусственно вызвана с помощью генерации волн давления (жесткое возбуждение). В этих условиях после жесткого возбуждения амплитуда автоколебаний давления продуктов сгорания должна значительно возрасти.

Поступила в редакцию
7/XII 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Зенин, О. И. Лейпунский и др. Докл. АН СССР, 1966, 169, 3.
2. Э. И. Максимов. ЖФХ, 1963, 37, 5.
3. Инами, Шэнфилд. Рак. техн. и косм., 1964, 7.
4. Янт, Эйнджелес. Рак. техн. и косм., 1964, 7.
5. В. М. Маргулис, А. Д. Марголин и др. ФГВ, 1970, 6, 2.
6. И. Б. Светличный, А. Д. Марголин и др. Матер. 9-й межвуз. конф. по воп. горения, испарения и газовой динамики дисперсных систем. Одесса. ОГУ им. Мечникова, 1969.
7. Оберг. Рак. техн. и косм., 1968, 2.
8. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1963, 1.
9. О. И. Лейпунский. Докт. дисс., М., 1945.
10. Б. В. Новожилов. ПМТФ, 6, 1965.
11. П. Ф. Похил. Сб. «Физика взрыва». М., 1953.
12. I. D. Haffington. Trans. Far. Soc., 1954, 50, 613.
13. Г. Г. Шелухин, В. Ф. Булдаков, В. П. Белов. ФГВ, 1969, 5, 1.
14. H. Seizer. AIAA Paper. 1969, 177.