

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ МЕТИЛНИТРАТА

Э. И. Максимов, А. А. Байраш
(Москва)

Наблюдавшаяся К. К. Андреевым [1] неустойчивость горения ряда жидких взрывчатых веществ была удовлетворительно объяснена им гидродинамической автотурбулизацией фронта горения, рассмотренной Ландау [2]. Теория Ландау может фактически только предсказать наступление неустойчивости, но не описывает закономерностей горения в условиях развитой неустойчивости в силу предположения о малости возмущений. В ряде экспериментальных работ по неустойчивому горению жидких ВВ показано, что горящая поверхность колеблется [1], эти колебания являются тангенциальными (в круглых стаканчиках) [3], зона пламени (при горении нитроэфиров выше некоторого давления обычно появляется удаленное вторичное пламя) взаимодействует с колеблющейся поверхностью горения, может возникнуть детонация или произойти затухание горения [1]. В настоящее время остается неясным, почему неустойчивость проявляется как колебательный режим горения, в каких условиях происходит детонация (или горение затухает), какое влияние оказывает на турбулизацию вторичное пламя. Поэтому представлялось интересным подробно проследить развитие гидродинамической неустойчивости горения во времени с целью изучения ее стадий по возможности на простом объекте. Был исследован метилнитрат, полученный нитрованием спирта. Согласно [1], метилнитрат при давлениях выше $1,75 \text{ атм}^1$ горит неустойчиво, но имеет определенную скорость горения, меняющуюся с повышением давления. Опыты проводились в стеклянных стаканчиках с внутренним диаметром 3, 6,2, 10,3 мм и толщиной стенки 1 мм в бомбе постоянного давления, заполняемой техническим азотом (к бомбе объемом 3,5 л присоединялись два буферных баллона 40 л емкостью каждый). Процесс фиксировался кинокамерой, в перпендикулярном направлении к плоскости кинокамера — образец устанавливался фоторегистр. Поскольку свечение при горении отсутствовало, образец просвечивался электролампой. Изменения давления в процессе горения записывались индикатором ИД-2И, мембрана которого выводилась непосредственно в объем бомбы. Зажигание осуществлялось накаленной нихромовой спиралью, устанавливаемой на расстоянии 1 мм от поверхности ВВ и отбрасываемой при воспламенении вещества. Опыты проводились в основном при низких давлениях (до 6 атм), так как при этом существенно облегчается обработка результатов.

Развитие неустойчивости горения удобно проследить как по фоторегистрации (рис. 1), так и по кинограмме (рис. 2). При зажигании сна-



Рис. 1. Фоторегистрация горения

¹ В наших опытах этот предел был ниже — $p=1,3-1,4 \text{ атм}$.

чала проходит спокойное горение без видимых возмущений, затем поверхность начинает колебаться (волнистая линия, рис. 1), растет амплитуда колебаний и скорость горения. На рис. 2 видно, что уровень жидкости на стенке поочередно опускается и поднимается. Затем горение переходит в новый, неколебательный режим, характеризующийся резким увеличением скорости горения. В проходящем свете в этом случае (см. рис. 1) над поверхностью жидкости видны темные полосы. Этот режим горения назвали фонтанирующим, исходя из картины явления, представленной на соответствующих кадрах скоростной кино съемки (рис. 2, кадры 5, 6). «Фонтан» возникает за 0,02 сек. Гребень фонтана обычно распадается на несколько небольших фонтанов, переходящих в темные полосы, которые сверху закручиваются. Скорость горения ($p=1,6 \text{ атм}$), при зажигании составляющая 2 мм/сек, увеличивается к концу колебательного режима до 8 мм/сек, а при фонтанирующем составляет 20—80 мм/сек (различается от опыта к опыту).

В работе [1] вводится средняя скорость возмущенного горения как некоторая величина, характеризующая данное вещество, и на основании ее изменения вводится промежуточный (между невозмущенным и возмущенным) режим горения. Исходя из наших результатов, среднюю скорость горения метилнитрата, по крайней мере вблизи предела возмущенного горения, рассматривать не следует, так как она является функцией высоты столба жидкости. Запись давления указывает (рис. 3, б), что с наступлением фонтанирующего горения давление в бомбе увеличивается (изменение давления в бомбе обуславливается тем, что давление в буферных баллонах и бомбе при большой скорости горения выравнивается с запозданием). В некоторых опытах при зажигании вещества наблюдалась детонация (стекло стаканчика при этом превращалось в пыль). Таким образом, опытным путем показано существование трех режимов гидродинамической неустойчивости горения метилнитрата: колебательного, фонтанирующего и перехода горения в детонацию.

Колебательный режим, по-видимому, возникает практически одновременно с воспламенением при давлениях выше 1,3—1,4 атм, но на киноленте колебания можно различать, когда амплитуда их становилась достаточно большой. Рост амплитуды со временем, полученный из обработки кинолент, имеет приближенно линейный характер. В некоторых случаях при больших амплитудах наблюдалось опрокидывание верхнего края волны от стенки внутрь стаканчика. Частота колебаний имела тенденцию с повышением давления к уменьшению (рис. 4), изменение диаметра не оказало влияния на частоту.

Значительное число опытов было направлено на выяснение природы фонтанирующего горения. Разница в возникновении и протекании фонтанирующего горения в стаканчиках диаметром 6,2 и 10,3 мм мала, только в последнем случае чаще наблюдается два-три «фонтана». В стакан-

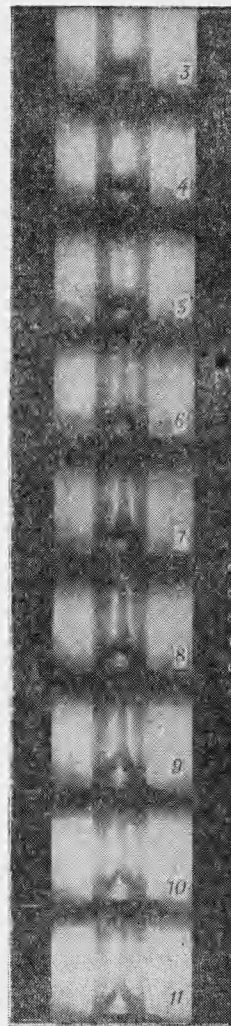


Рис. 2. Кинограмма горения.

чиках диаметром 3 мм переход колебательного горения в фонтанирующий не наблюдался. Были проделаны опыты по горению в стаканчиках различной высоты, налитых ВВ до верхнего края. Во всех опытах фонтанирующий режим возникал приблизительно на расстоянии 7—10 мм от верхнего края, в стаканчиках меньше указанной величины фонтанирующий режим не возникал. Следовательно, дно стакана не влияло на смену режимов горения. Оказалось, что существенное влияние на возникновение фонтанирующего режима горения оказывало положение верхнего края стаканчика. Незначительное понижение первоначального уров-

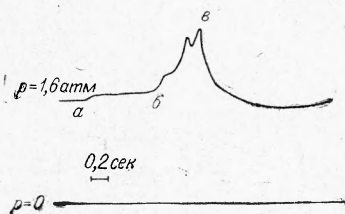


Рис. 3. Давление в бомбе при горении метилнитрата.
а — начало горения; б — возникновение фонтанирующего режима; в — конец горения.

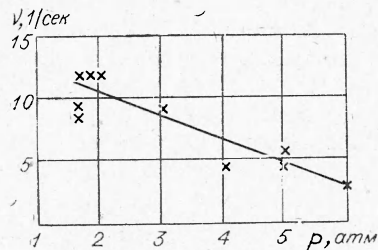


Рис. 4. Влияние давления на частоту колебаний при горении метилнитрата.

ня ВВ по отношению к верхнему краю не влияло на место возникновения фонтанирующего горения (см. таблицу), а в стаканчиках, имеющих уровень жидкости ниже 10 мм, фонтан возникал практически мгновенно с зажиганием. Видимая скорость горения (по фоторегистрации) в фонтанирующем режиме увеличивается с возрастанием расстояния между уровнем жидкости и верхним краем стакана.

| Давление в бомбе, ата | Высота стаканчика, мм | Высота столба жидкого ВВ в стаканчике, мм | Место возникновения «фонтана» (от верхнего края стаканчика), мм |
|-----------------------|-----------------------|---|---|
| 2 | 15 | 15 | 10,5 |
| 1,9 | 25 | 15 | 10,5 |
| 1,9 | 25 | 15 | 13 |
| 1,6 | 25 | 25 | 12,0 |
| 1,6 | 25 | 25 | 10,5 |
| 1,6 | 25 | 25 | 10 |
| 1,6 | 25 | 15 | 13 |

В опытах со стаканчиками высокой свободной части h более 30 мм наблюдалась детонация (при $h=30$ мм детонация не возникла, в опытах с $h=42$ мм и $h=50$ мм возникала). Фоторегистрация показывает (рис. 5), что детонация предшествует сгоранию вещества в фонтанирующем режиме.

Сама детонация сопровождается вспышкой свечения (яркая полоска на рис. 5) и скачком давления в бомбе, стекло стаканчика дробится в пыль.

Исходя из настоящих экспериментальных и литературных данных [1—3], картина развития возмущенного горения метилнитрата представляется следующей. При горении метилнитрата при давлениях выше критического растут в первую очередь возмущения (наиболее опасные) с большой длиной волны и пучностями скорости движения на стенке. Однако стенка, по-видимому, ограничивает рост возмущения, приводя к возникновению колебательного движения поверхности горения. Причина тормозящего действия стенки, вероятно, заключается в условиях движения вязкой жидкости вблизи нее и в теплообмене с ней. Отмеченный вы-

существа в фонтанирующем режиме. Сама детонация сопровождается вспышкой свечения (яркая полоска на рис. 5) и скачком давления в бомбе, стекло стаканчика дробится в пыль.

ше рост скорости горения с ростом амплитуды в колебательном режиме можно связать с увеличением средней величины поверхности горения вследствие изогнутости последней. Приближенная оценка площади горения по кинограммам показывает ее увеличение примерно на ту величину, на какую изменилась скорость горения.

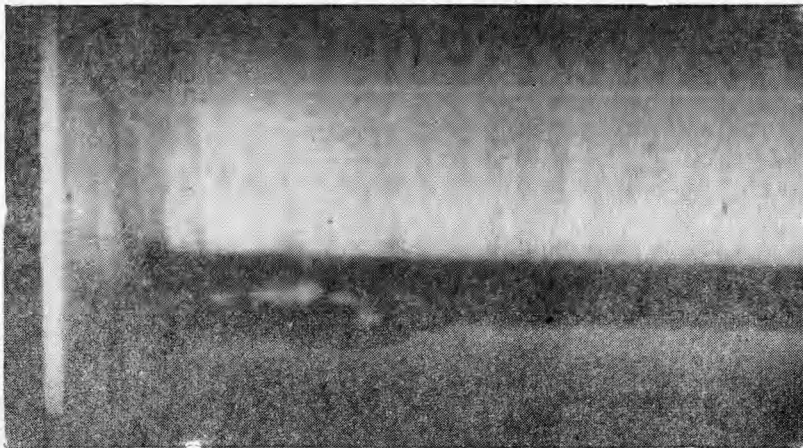


Рис. 5. Переход горения в детонацию в метилнитрате.

Когда возникает волна, имеющая пучность в центре стакана, стенка не оказывает тормозящего влияния на нее, но высота верхнего края стакана влияет на рост этого возмущения или на его возникновение. Механизм этого влияния еще неясен. Это «центральное» возмущение, которое на фотографии представляется в виде фонтана (см. рис. 2), растет не колеблясь. Темные нити, отходящие от вершины «фонтана» вверх, а дальше закручивающиеся, вероятно, являются струями жидкости, которые вытекают из «фонтана» и разрушаются в объеме. Благодаря такому механизму фонтанирующего горения видимая скорость горения (по убыли столба жидкости) резко возрастает. «Фонтан» работает как насос, выкачивающий и распыляющий жидкость. При достаточно большой высоте верхнего края стакана большое количество распыленной жидкости оказывается в горячем объеме (в противном случае капли попадают в холодный объем бомбы), что приводит к возникновению детонации этой аэровзвеси.

*Поступила в редакцию
15/VII 1968*

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1966.
2. Л. Д. Ландау. ЖЭТФ, 1944, 14.
3. А. Д. Марголин, Л. Ф. Чекирда, С. В. Чуйко. Инж.-физ. ж., 1963, 3, 3.