

К. К. АНДРЕЕВ и А. П. БАКЕЕВ

**К ВОПРОСУ О ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ
БЕЗДЫМНЫХ ПОРОХОВ ОТ ДАВЛЕНИЯ**

(Представлено академиком Н. Н. Семеновым 5 XI 1944)

Известно, что скорость горения бездымных порохов растет с давлением. Однако вопрос о форме этой зависимости до настоящего времени нельзя считать решенным. В общем виде зависимость скорости горения от давления может быть выражена формулой

$$u = A + Br^{\nu}. \quad (1)$$

Однако в последнее время во внутренней баллистике значительное распространение ⁽¹⁾ получила более простая формула

$$u = Br, \quad (2)$$

сторонники которой принимают, следовательно, что $A=0$, а $\nu=1$.

С другой стороны, в работах по горению порохов в ракетных аппаратах было показано, что формула (2) приводит к противоречию с фактами ⁽²⁾. Из сопоставления выражений для расхода газов через сопло и для прихода газов в результате горения следует, что если скорость горения прямо пропорциональна давлению, то равенство прихода газа и газоотвода возможно для данного сопла при любом давлении внутри камеры. В то же время известно, что для пороховых ракет для каждого данного заряда и сопла существует при стационарном режиме определенное устойчивое значение давления внутри камеры. Это может иметь место в том случае, если $\nu \geq 1$, но $A \neq 0$.

Следует подчеркнуть, что все экспериментальные данные основаны не на непосредственном определении значений скорости горения при постоянном давлении, а на выводах из различных кривых, характеризующих ход горения при переменном давлении, возрастающем от 1 до 1000 атм и выше. Не говоря уже о значительной сложности процесса горения в этих условиях, вывод общей формулы зависимости скорости горения от давления был бы законен лишь в том случае, если бы для всего интервала давления эта зависимость оставалась неизменной. Последнее же не доказано.

Больше того, теоретические соображения дают основания сомневаться в неизменности указанной зависимости в широком диапазоне давлений, поскольку сам механизм процесса горения и его характеристики могут существенно меняться при изменении давления. Так, при низких давлениях, когда толщина прогретого слоя пороха велика, значительную роль может играть реакция в конденсированной фазе, на которую давление влияет в основном лишь через величину толщины прогретого слоя. Поскольку эта толщина с ростом давления уменьшается, то абсолютная величина скорости реакции

в конденсированной фазе (количество пороха, разлагающегося в единицу времени) при этом будет уменьшаться. Суммарная скорость горения будет в таком случае суммой двух функций — убывающей (реакция в конденсированной фазе) и возрастающей (реакция в газовой фазе). Кроме того, при повышении давления, под которым идет горение, все в большей и большей степени изменяется суммарное уравнение реакции. При низких давлениях основная часть азота выделяется в виде окиси азота, при высоких — практически весь азот выделяется в элементарном виде. Соответственно меняются количества водорода, воды, окиси углерода и метана, приближаясь к равновесным значениям при достигаемых температуре и давлении. Указанное изменение суммарного уравнения горения означает также значительное изменение теплового эффекта, а следовательно и температуры горения, что в свою очередь должно влиять на скорость горения.

Расчет влияния всех упомянутых факторов на величину скорости горения весьма сложен и поэтому надежность теоретических подсчетов скорости и ее зависимости от давления очень ограничена, по крайней мере для того интервала давления, в котором влиянием названных факторов нельзя пренебрегать. Наиболее достоверные сведения в этом направлении может дать лишь прямой эксперимент — определение скорости горения при постоянном давлении.

Такого рода исследования были начаты К. К. Андреевым совместно с А. Е. Варга в 1937 г. (3). Была изучена скорость горения при постоянном давлении нитроглицеринового пороха с 28% нитроглицерина в интервале давления от минимального, при котором возможно горение, до давления 1600 мм Hg. Опыты ставились с цилиндрами пороха в асбестовой обмотке при повышенных температурах (85 и 115°), поскольку при обычных температурах порох в указанных условиях не горит. Полученные данные показали, что в пределах ~800—1600 мм Hg скорость горения растет с давлением линейно согласно формуле $u = A + Bp$.

Однако данные названной работы относились к очень низкому давлению, а изученный интервал давления был относительно очень узок (~1 атм). Это не давало уверенности в том, что полученную зависимость можно распространить на более высокие давления при сохранении тех же численных значений коэффициентов A и B .

По этим соображениям исследования были расширены на более высокие давления. В данной работе мы рассмотрим результаты, полученные при давлениях до 50 кг/см². Для этих опытов использовалась толстостенная стальная бомба внутренним диаметром 60 мм, длиной 460 мм и объемом 1,3 л. Бомба была соединена двумя медными трубками внутренним диаметром 16 мм с двумя стальными баллонами емкостью 150 л каждый. Перед опытом баллоны и бомба наполнялись воздухом при том давлении, при котором должно было происходить горение. Благодаря большому объему системы и отсутствию или незначительности утечки горение шло практически при постоянном давлении. При небольшом его изменении бралось среднее значение из давления в начале и в конце горения. Порох применялся в виде сплошных цилиндрических шашек диаметром 5 мм и длиной 100 мм, обматывался асбестовым шнуром (толщина обмотки ~2 мм) и в таком виде вводился более или менее плотно в стеклянную трубочку. Наблюдение за горением велось через окопечко, имевшееся в стенке бомбы и закрытое толстым куском органического стекла. Конец горения фиксировался по вспышке небольшого количества черного пороха, помещенного под нижним торцом шашки.

Опыты были проведены с четырьмя сортами порохов:

I. Нитроглицериновый порох состава, изученного ранее Андреевым и Варга;

II и III — нитроглицериновые пороха, близкие по составу к I;

IV — пироксилиновый порох.

Результаты опытов могут быть представлены следующими формулами.

$$\begin{aligned}
 u &= 3,6 + 1,202 p^{0,84} && \text{(порох I)} \\
 u &= 3,1 + 1,20 p^{0,90} && \text{(порох II)} \\
 u &= 1,4 + 0,85 p && \text{(порох III)} \\
 u &= 2,2 + 0,447 p^{1,12} && \text{(порох IV)}
 \end{aligned}$$

Графически они изображены кривыми рис. 1 (пороха I и II) и 2 (пороха III и IV).

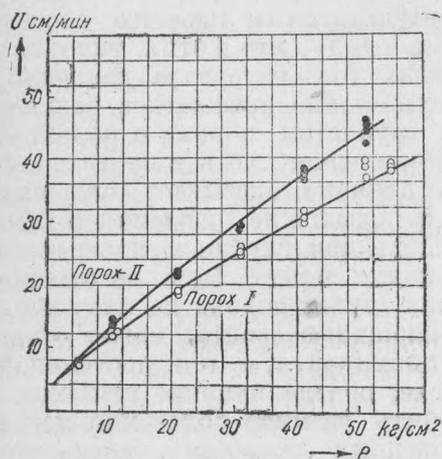


Рис. 1

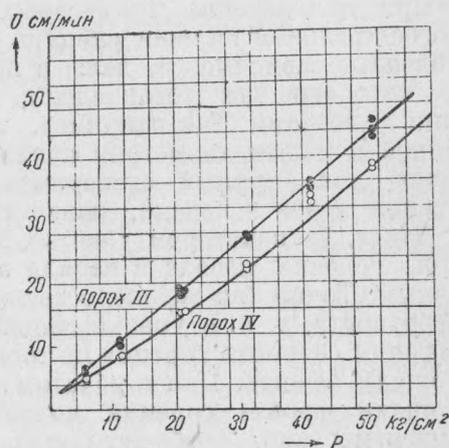


Рис. 2

В согласии с выводами Андреева и Варга, существует некоторый предел давления ($\sim 2 \text{ кг/см}^2$), ниже которого горение в данных условиях эксперимента не идет. При больших давлениях скорость горения растет с давлением.

Для всех четырех изученных порохов в выражение зависимости скорости горения от давления должен входить член A , не зависящий от давления. Величина этого члена составляет от $1/4$ до $1/2$ скорости горения при $p = 5 \text{ кг/см}^2$.

Изменение скорости с давлением идет в рассматриваемом интервале по закону, близкому к линейному. Графики дают значения γ от 0,84 для пороха I до 1,12 для пироксилинового пороха IV.

Если сопоставить полученные зависимости с результатами определений характеристик порохов в манометрической бомбе при плотности заряжения $\Delta = 0,20$, $p_{\text{max}} = 1500 - 2000 \text{ кг/см}^2$, то можно заключить, что при больших давлениях показатель степени для пороха I несколько больше, чем 0,84, а для порохов IV, III и II соответственно меньше 1,12, 1 и 0,9. Повидимому, среднее значение этого показателя для различных порохов в широком интервале давления заключается между 0,84 и 0,90. Можно, следовательно, утверждать, что γ весьма близко к единице и, во всяком случае, несравненно ближе к единице, чем к $1/2$, каковая величина в последнее время выдвигалась в ряде работ на основе теоретических соображений (4).

Таким образом, бездымные пороха при давлениях $2 - 50 \text{ кг/см}^2$ дают приблизительно такой же закон горения $u = A + Bp$, какой был ранее установлен Андреевым и сотрудниками (5) для нитроглицери-

новых порохов и ряда вторичных взрывчатых веществ при давлениях до 2 кг/см².

Если исходить из предпосылок, положенных Зельдовичем и Беляевым в основу вывода формулы скорости горения, то установленный факт означает, что реакция, определяющая скорость горения, является бимолекулярной. В таком случае сопоставление характеристик распада при горении с характеристиками медленного мономолекулярного термического распада⁽⁴⁾ вряд ли имеет реальный смысл. Это также подчеркивает условное и ограниченное значение простых, по существу эмпирических, формул типа $u = A + Bp$ с постоянным ν , приближенно приложимых лишь к тем, относительно узким, интервалам давления, для которых экспериментально установлены коэффициенты A , B и ν .

При приложении полученных результатов к горению заряда в огнестрельном оружии следует иметь в виду, что в этих условиях найденные зависимости, даже в пределах того интервала давления, для которого они установлены, могут сильно искажаться различными факторами. Так например, при трубчатом порохе с большой длиной и малым диаметром канала несомненное, хоть и не установленное пока прямым экспериментом влияние оказывает скорость течения газов в канале, равно как и повышение давления в нем.

Далее, на некотором участке, определяемом глубиной прогретого слоя, горение пороха в начале и в конце может быть не стационарным. Точно так же скорость горения трубки пороха по наружной поверхности, т. е. с уменьшающейся площадью фронта, может отличаться от скорости горения по торцу цилиндра, т. е. при постоянной площади фронта. При трубчатом порохе, правда, влияние изменения площади фронта горения должно быть взаимно более или менее компенсировано, особенно при повышенных давлениях, когда это влияние вообще менее значительно.

Московский химико-технологический
институт им. Д. И. Менделеева

Поступило
5 XI 1944

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ М. Е. Серебряков, К. К. Гретен, Г. В. Оплоков, Внутренняя баллистика, 1939, стр. 109. ² М. Руа, О полезном действии и условиях применения ракетных аппаратов, 1936, стр. 28. ³ М. Патри, Горение и детонация взрывчатых веществ, 1938, стр. 161. ⁴ А. Ф. Беляев, ЖФХ, 14, 1009 (1940). ⁵ К. К. Андреев и сотр., Сборн. статей по теории взрывчатых веществ, 1940, стр. 39.