

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

№ 2

1965

УДК 536.46

Э. В. Конев
(Новосибирск)

О ВЛИЯНИИ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ПОРОХА Н

В работе [1] были опубликованы предварительные результаты по зависимости скорости горения пороха Н от плотности светового потока. Сравнение их с зависимостью скорости горения нитроглицеринового пороха от начальной температуры, взятой из работы [2], привело к предположению, что влияние светового излучения на процесс горения пороха Н не является чисто тепловым. В дальнейшем зависимости скорости горения от плотности светового потока и начальной температуры были получены на одной партии пороха, а также были сделаны оценки потерь света на отражение от поверхности пороха и поглощение в продуктах сгорания. Эти материалы, описываемые ниже, показали, что предположение о существенно нетепловом влиянии света на процесс горения пороха Н, сделанные в работе [1], не подтвердилось.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для получения светового потока был использован графитовый излучатель [1]. Плотность светового потока измерялась калориметром, который с помощью несложного механизма устанавливался вместо сгоревшего образца таким образом, чтобы фиксировался средний по длине образца световой поток. Поджигание образцов производилось с помощью нихромовой спирали при малых световых потоках и самим потоком — при больших.

Начальные температуры выше комнатной задавались с помощью термостата с точностью не менее $\pm 0,5^\circ \text{C}$. Температуры ниже комнатной получались с помощью тающего и сухого льда. После выдержки в течение необходимого для прогрева (охлаждения) времени образец вынимался из термостата и поджигался нихромовой спиралью. Существенного изменения его температуры за время от момента извлечения до момента сгорания не было замечено.

Измерение скорости горения пороха производилось с помощью термопар медь — константан диаметром 50 м, вклеенных в образец на расстоянии 5—10 мм друг от друга. Сигналы термопар фиксировались на

шлейфовом осциллографе Н-700. Скорость горения получалась делением базы образца на время между сигналами термомпар.

С целью получения плоского фронта пламени образцы бронировались линолеумом или оргстеклом при изучении зависимости скорости горения от начальной температуры и пластилином — при изучении зависимости скорости горения от плотности светового потока. Пластилин, исчезая вместе с фронтом пламени, не мешал доступу света к поверхности горения. В некоторых опытах для бронировки пороха использовался слабый продольный поток азота. Горение пороха при этом становилось беспламенным.

Были также получены зависимости скорости горения пороха от плотности светового потока и начальной температуры при давлении 21,4 атм в бомбе постоянного объема. Световой поток подавался через кварцевое окошко диаметром 60 мм. Начальная температура изменялась в пределах 20—45°С путем электрообогрева бомбы.

Для измерения скорости горения при атмосферном давлении использовались образцы пороха диаметром 20 мм, при горении в бомбе — диаметром 7 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Данные по зависимости скорости горения пороха от начальной температуры при атмосферном давлении представлены на рис. 1. Кривая 1 получена на воздухе (табл. 1). Для этого случая на рисунке показана также точность измерения, соответствующая надежности 0,95. Кривая 2 представляет собой зависимость скорости горения пороха от начальной температуры при бронировании его слабой продольной струей азота. Для сравнения на графике приведена также зависимость, взятая из работы

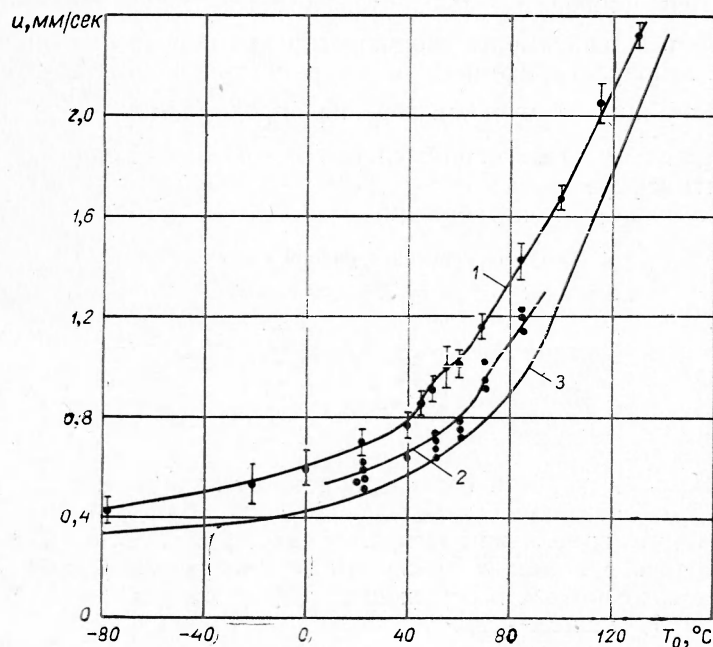


Рис. 1. Зависимость скорости горения пороха Н от начальной температуры.

Таблица 1

Скорость горения на воздухе, мм/сек

$T_0, ^\circ\text{C}$	Номер опыта										u	Δu
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
-78	0,38	0,38	0,42	0,46	0,45	0,47	—	—	—	—	0,43	0,04
-21	0,52	0,58	0,52	—	—	—	—	—	—	—	0,54	0,06
0	0,595	0,575	0,56	0,66	—	—	—	—	—	—	0,60	0,06
20	0,71	0,71	0,68	0,67	0,70	0,70	0,72	0,73	0,70	—	0,70	0,01
22	0,72	0,66	0,66	0,66	0,68	0,70	0,74	—	—	—	0,69	0,03
23	0,69	0,72	—	—	—	—	—	—	—	—	0,70	0,06
40	0,70	0,75	0,79	0,80	0,75	0,78	0,76	—	—	—	0,76	0,08
45	0,86	0,86	0,84	0,84	—	—	—	—	—	—	0,85	0,02
50	0,90	0,89	0,95	0,90	—	—	—	—	—	—	0,91	0,04
55	1,00	0,96	0,97	1,08	—	—	—	—	—	—	1,00	0,08
60	1,04	1,01	0,96	1,03	—	—	—	—	—	—	1,01	0,05
70	1,13	1,10	1,06	1,16	1,13	1,15	1,26	1,15	1,18	1,18	1,15	0,04
85	1,42	1,51	1,42	1,38	—	—	—	—	—	—	1,43	0,08
100	1,71	1,71	1,60	1,62	1,68	1,62	1,69	1,72	—	—	1,67	0,04
115	1,96	2,20	2,04	2,12	1,99	2,02	2,03	—	—	—	2,05	0,07
130	2,29	2,32	2,36	2,36	2,36	2,37	2,22	2,31	—	—	2,32	0,04

А. И. Короткова и О. И. Лейпунского [2] (кривая 3). Точность измерения скорости горения рассчитывалась с помощью соотношения

$$\Delta u = \frac{\bar{u} \cdot \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где σ — среднеквадратическая погрешность; n — число измерений; — множитель Фишера — Стьюдента, соответствующий надежности 0,95.

Обработка зависимости скорости горения пороха от начальной температуры в полулогарифмических координатах показала, что температурный коэффициент скорости горения пороха H , т. е. $\frac{d \ln u}{dT_0}$ по терминологии [2], изменяется в наших опытах от $\sim 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1/\text{град}$ при $T_0 < 40^\circ \text{C}$ (60°C в атмосфере азота) до $\sim 12 \cdot 10^{-3} \cdot 1/\text{град}$ при $T_0 > 40^\circ \text{C}$. Это значительно меньше, чем в работе [2].

Скорость горения в слабой струе азота

$T_0, ^\circ\text{C}$	$u, \text{мм/сек}$
22	0,57
39	0,64
50	0,71
60,5	0,76
70	0,97
85	1,19

Зависимость скорости горения пороха от начальной температуры в слабой струе азота изменилась по сравнению с зависимостью на воздухе. Полагая, что изменение обусловлено исчезновением факела пламени, можно оценить с помощью приводимого ниже соотношения (4) плотность светового потока, поступающего из пламени в порох. Она оказалась равной $1,0 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$.

Для оценки влияния возможных изменений в порохе при его термостатировании были поставлены опыты по изучению зависимости скорости горения пороха от времени выдержки образца при 130°C . Оказалось,

что скорость горения пороха практически не зависит от времени термостатирования, несмотря на растрескивание образцов и изменение окраски. Следует отметить, что разброс экспериментальных точек после термостатирования значительно уменьшается.

Зависимость скорости горения пороха от плотности светового потока при горении на воздухе представлена на рис. 2 и в табл. 2. Эти данные получены на той же партии пороха, на которой изучалась зависимость скорости горения от начальной температуры. Для уменьшения возможных ошибок измерения в обоих случаях производились на специально отобранных шашках с одинаковой средней скоростью горения.

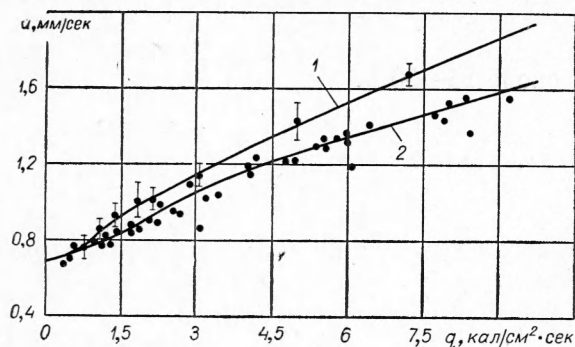


Рис. 2. Зависимость скорости горения пороха u от плотности светового потока.
1 — ожидаемая, 2 — экспериментальная.

Следует отметить, что в табл. 3 приведены световые потоки, подаваемые графитовым излучателем на образец, а не световые потоки, поглощенные порохом. Последние из-за поглощения части света продуктами сгорания и отражения его от поверхности горящего пороха должны быть значительно меньше. Авторами была предпринята попытка оценить величину световых потерь.

Таблица 2

Скорость горения при различных световых потоках

$q, \text{кал/см}^2 \text{сек}$	$u, \text{мм/сек}$	$q, \text{кал/см}^2 \text{сек}$	$u, \text{мм/сек}$	$q, \text{кал/см}^2 \text{сек}$	$u, \text{мм/сек}$	$q, \text{кал/см}^2 \text{сек}$	$u, \text{мм/сек}$	$q, \text{кал/см}^2 \text{сек}$	$u, \text{мм/сек}$	$q, \text{кал/см}^2 \text{сек}$	$u, \text{мм/сек}$
0,37	0,67	2,84	1,10	5,55	1,30	1,69	0,88	4,06	1,18	7,70	1,48
1,08	0,83	3,04	1,06	5,77	1,33	1,44	0,85	4,06	1,19	7,89	1,43
1,18	0,78	3,21	1,12	5,98	1,33	1,41	0,95	3,48	1,04	8,32	1,55
1,13	0,78	2,63	0,94	6,42	1,40	1,69	0,86	4,77	1,22	8,02	1,52
1,10	0,79	2,55	0,96	5,48	1,31	2,18	0,90	4,91	1,22	8,41	1,36
0,57	0,76	2,32	0,99	6,95	1,46	1,81	0,86	5,40	1,29	9,22	1,55
0,54	0,71	2,08	0,91	6,35	1,35	6,07	1,19	4,18	1,24		

При этом вместо коэффициента отражения света от поверхности горящего пороха был измерен коэффициент отражения света от поверхности потушенного пороха. Предполагалось, что их величины достаточно близки. Образец пороха облучался на световой установке определенным количеством энергии, а затем сбрасывался в микрокалориметр, в котором по подъему температуры определялось полученное порохом количество тепла. Зная посланное на образец и полученное им количество тепла, нетрудно было определить эффективный коэффициент отражения

от поверхности пороха. Коэффициент отражения от полированной поверхности пороха оказался равным $11,0 \pm 3,0\%$, от поверхности потушенного пороха $23 \pm 3,0\%$.

Процент поглощения света в продуктах сгорания пороха оценивался с помощью вакуумного фотоэлемента СЦВ-51. Световой луч от осветительной лампы проходил через отверстие в горящем пороховом образце и попадал через светофильтр и диафрагму на фотоэлемент. Поскольку э.д.с. фотоэлемента пропорциональна плотности светового потока, то, сравнивая ее значения до поджигания образца и во время его горения, можно было оценить процент поглощения света в продуктах сгорания пороха. Измерения показали, что в продуктах сгорания пороха поглощается несколько процентов света от первоначального светового потока.

Суммарные потери света в описываемых опытах должны составлять, таким образом, около 25—30%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Введение тепла в порох путем повышения начальной температуры и с помощью светового излучения позволяет получить информацию о том, является ли действие света тепловым или оно сопровождается еще значительными фотохимическими реакциями.

Известно, что при повышении начальной температуры на величину ΔT_0 каждый грамм пороха получает дополнительно запас тепла ΔQ , равный дополнительно

$$\Delta Q = c \cdot \Delta T_0, \quad (2)$$

где c — теплоемкость пороха.

При поглощении же светового излучения каждый грамм пороха получает

$$\Delta Q = \frac{q}{\rho u}, \quad (3)$$

где q — плотность поглощенного светового потока; ρ — плотность к-фазы; u — скорость горения при наличии светового потока.

Оба способа введения тепла будут оказывать одинаковое влияние на скорость горения пороха, если: а) влияние света будет чисто тепловым, б) они будут одинаково изменять температурное распределение в ведущей зоне. Можно показать, что второе условие соблюдается, если облучаемый порох является достаточно прозрачным, т. е. эффективная ширина поглощения света в нем много больше ширины зоны химических реакций. Последнее действительно имеет место в рассматриваемом случае, так как по оценкам П. Ф. Похила и М. М. Белова [3] коэффициент ослабления луча в порохе H равен максимум ~ 60 1/см (толщина зоны поглощения света ~ 200 м), а ширина зоны химических реакций равна 15—30 м. Поэтому обе полученные нами зависимости в координатах $u - \Delta Q$ должны совпадать, если влияние света является чисто тепловым. Более удобно, однако, сравнивать обе кривые в координатах скорости горения — световой поток, пересчитать в которые зависимость скорости горения пороха от начальной температуры можно с помощью соотношения

$$q = c\rho u\Delta T_0. \quad (4)$$

Оно вытекает из сравнения формул (2) и (3). Результаты такого пересчета для опытов при атмосферном давлении, а также при давлении 21,4 атм представлены в табл. 3 и на рис. 2, 3.

Как видно из рис. 2 и 3, экспериментальные зависимости скорости горения пороха от плотности светового потока лежат ниже пересчитанных из зависимости от начальной температуры. Полагая, что это различие вызвано отражением света от поверхности горящего пороха и поглощением его в продуктах сгорания, можно оценить величину потерь света в наших опытах. Обработка по методу наименьших квадратов показала, что светопотери у пороха при атмосферном давлении составляют ~29% от первоначального светового потока, а при давлении 21,4 атм ~23%. Цифры приведены с поправкой на систематическую погрешность калориметров (из-за теплотерь) и потерь света из-за закапчивания кварцевого окошка продуктами сгорания.

Таблица 3

Результаты пересчета $c_p = 0,55 \text{ кал/см}^3 \cdot \text{град}$								
$P = 1 \text{ атм}$						$P = 21,5 \text{ атм}$		
$T_0, ^\circ\text{C}$	$u, \text{мм/сек}$	$q, \text{кал/см}^2 \cdot \text{сек}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$u, \text{мм/сек}$	$q, \text{кал/см}^2 \cdot \text{сек}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$u, \text{мм/сек}$	$q, \text{кал/см}^2 \cdot \text{сек}$
22	0,69	0	60	1,01	2,12	25,0	3,54	0
40	0,76	0,76	70	1,15	3,05	41,5	3,83	2,54
45	0,85	1,08	85	1,43	4,98			
50	0,91	1,41	100	1,67	7,21			
55	1,00	1,82	115	2,05	10,56			

Совпадение светопотерь, полученных из сравнения экспериментальных кривых, с оцененными выше другими методами говорит в пользу теплового механизма влияния света на процесс горения пороха. В пользу теплового механизма говорит также отсутствие тенденции к уменьшению светопотерь с увеличением плотности светового потока, вытекающее из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 2.

Если при атмосферном давлении роль фотохимических реакций настолько мала, что ее не удалось заметить, то при повышенных давлениях, когда скорости собственно химических реакций возрастают во много раз (а световые потоки от пламени пороха по порядку величины такие же, как и в наших опытах при 1 атм), роль фотохимических реакций должна стать еще менее значительной. Слабее становится и сама зависимость от плотности светового потока. Как видно из рис. 3, влияние светового потока плотностью $\sim 4 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$ не выходит при 21,4 атм за пределы погрешности измерений.

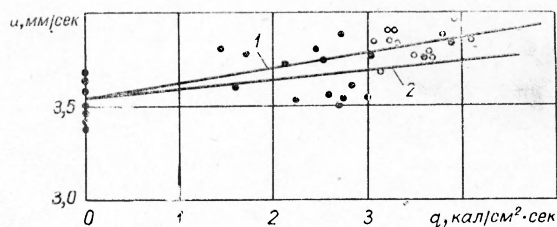


Рис. 3. Зависимость скорости горения пороха u от плотности светового потока при 21,4 атм. 1 — ожидаемая, 2 — полученная экспериментально.

Автор признателен

А. А. Ковальскому за постановку задачи и полезные советы, а также С. С. Хлевному и всем сотрудникам лаборатории горения конденсированных систем ИХКиГ СО АН СССР за обсуждение работы и полезные замечания.

ВЫВОДЫ

1. Получены зависимости скорости горения пороха Н от плотности светового потока в диапазоне $0,5-10 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$ и от начальной температуры в диапазоне $-78,5-130^\circ \text{С}$.

2. Из сравнения этих зависимостей вытекает, что влияние светового излучения от тела с температурой $1700,5-2000^\circ \text{К}$ на процесс горения пороха Н носит в основном тепловой характер.

3. Потери света на поглощение в продуктах сгорания пороха Н и на отражение от поверхности его сгорания составляют около 29% от первоначального светового потока.

*Поступила в редакцию
26/II 1965*

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. В. Конев, С. С. Хлевной. ПМТФ, 1963, 2.
 2. А. И. Коротков, О. И. Лейпунский. Сб. «Физика взрыва», Изд-во АН СССР, 1955, № 3.
 3. П. Ф. Похил, М. М. Белов. Сб. «Физика взрыва», Изд-во АН СССР, 1956, № 5.
-