

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ
НИТРОГЛИЦЕРИНОВОГО ПОРОХА
ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

В. Ф. Жданов, В. П. Маслов, С. С. Хлевной
(Новосибирск)

Процессы, приводящие к воспламенению и горению порохов, обычно происходят при температурах, диапазон изменения которых сравнительно велик. Тем не менее, используемые при количественном описании этих процессов теплофизические коэффициенты (теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность) в большинстве случаев предполагаются постоянными. В литературе приводится сравнительно мало экспериментальных данных о теплофизических свойствах порохов; почти все они получены из измерений, проведенных при комнатной температуре. Поэтому перенос таких данных на другие температуры не может быть серьезно обоснован без экспериментальной проверки.

Ниже излагаются результаты измерений теплофизических коэффициентов нитроглицеринового пороха в интервале температур $-160 \div -\frac{1}{2} + 30^\circ \text{C}$. В основу метода измерений был положен нагрев пластинки пороха световым излучением в широко известном регулярном режиме второго рода. По соображениям техники безопасности образец пороха брался весом не более одного грамма.

ТЕОРИЯ МЕТОДА

Круглая пластинка пороха для уменьшения теплотерь заключена в вакуумной камере, ее толщина l выбрана намного меньше диаметра, а время опыта мало; поэтому такую пластинку можно рассматривать как элемент плоскопараллельной неограниченной пластины. Начальная температура пластинки T_0 .

Известно [1], что при нагревании такой пластинки тепловым потоком постоянной плотности q_0 (например, через поверхность $x=0$) по истечении времени τ_1 , соответствующего критерию Фурье $Fo_1 = \frac{a \tau_1}{l^2} = 0,5$, в любой точке пластины температура T — линейная функция времени τ , а распределение ее по толщине описывается параболическим законом (наступает квазистационарный режим для поля градиента температур):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = b = \text{const}, \quad (1)$$

при граничных условиях

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -q_0 \quad \text{при } x = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = l \quad (3)$$

для $Fo > 0,5$.

Здесь λ — теплопроводность, a — температуропроводность пластины.

Так как в этом режиме скорость нагрева пластины $b = \text{const}$ в любой ее точке, то очевидно, что

$$c\rho lb = q_0,$$

где $c\rho$ — объемная теплоемкость, ρ — плотность.

Отсюда следует, что удельная теплоемкость вещества пластины

$$c = \frac{q_0}{\rho lb}. \quad (4)$$

С другой стороны, из (1) следует, что разность между температурами в двух фиксированных точках пластины постоянна; простые вычисления показывают, что для облучаемой ($x=0$) и необлучаемой ($x=l$) поверхностей эта разность равна

$$\theta = \frac{b l^2}{2a},$$

откуда температуропроводность пластины

$$a = \frac{b l^2}{2\theta}. \quad (5)$$

Таким образом, измерив в опыте плотность теплового потока q_0 , скорость роста температуры b и разность температур θ на поверхностях пластины, а также зная ее толщину l и плотность ρ , можно по формулам (4) и (5) определить удельную теплоемкость c и температуропроводность a пороха. Его теплопроводность λ вычисляется из соотношения

$$\lambda = ac\rho. \quad (6)$$

Применение данных выше соотношений предполагает, что разогрев пороха в эксперименте мал настолько, что теплофизические коэффициенты можно считать постоянными.

ОПИСАНИЕ ОПЫТОВ

Установка для измерения теплофизических коэффициентов пороха при низких температурах состоит из криостата, источника светового излучения, блока контрольно-измерительных приборов и вакуумных насосов.

Криостат (рис. 1) представляет собой систему из двух цилиндрических камер А и Б. В камере А, выполненной из нержавеющей стали, термостатируются образец пороха 1 и калориметр 2. Начальная температура в камере зависит от скорости расхода жидкого азота, испаряющегося при откачке его из сосуда Дьюара через теплообменник 3. Последний представляет собой змеевик из медной трубки внутренним

диаметром 2,5 мм, бифилярно навитой на полый латунный цилиндр, плотно насаженный на камеру.

Различный, но постоянный во времени, расход хладагента задается изменением проходного сечения трубопровода с помощью игольчатого вентиля, а также мощностью нагревателя 4 (нихромовая проволока диаметром 0,3 мм, бифилярно навитая непосредственно на электроизолированный участок боковой поверхности камеры). Максимальная мощность нагревателя 200 вт.

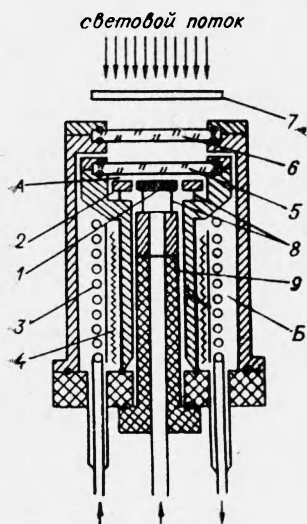


Рис. 1. Криостат.

Для снижения хладопотерь из камеры А, а также для того, чтобы устранить образование инея на кварцевом окне 5 камеры, последняя помещена в камеру Б, в которой постоянно поддерживается вакуум $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Камера Б также снабжена кварцевым окном б.

Источником светового излучения служит сушильная лампа мощностью 500 вт с внутренним зеркальным отражателем, которая размещается над кварцевыми окнами криостата так, чтобы на калориметр 2 и образец пороха 1 падал равномерный световой поток.

Между лампой и криостатом расположен металлический затвор 7.

Калориметр 2, который служит для измерения теплового потока, изготовлен из меди марки МО и имеет форму кольца толщиной 2,5 мм и внешним и внутренним диаметром 28 и 18 мм соответственно. Он стационарно укреплен на трех тонких вертикальных эбонитовых стойках 8, вклеенных в тело камеры А.

Толщина образца пороха 1 выбирается такой, чтобы регулярный режим наступал не позже, чем через $15 \div 20$ сек при времени нагрева $60 \div 70$ сек. Образец, приготовленный в виде таблетки диаметром 16 мм и толщиной 2—2,5 мм, размещается в отверстии калориметра на таких же стойках, вклеенных в тело вкладыша 9.

Для того чтобы коэффициенты поглощения калориметра и образца

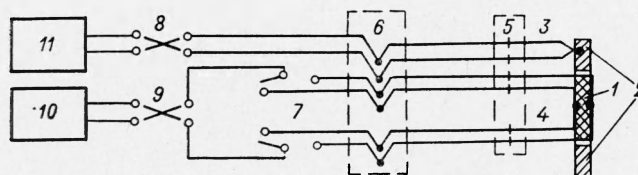


Рис. 2. Схема измерительной установки.

были одинаковы, на их воспринимающие поверхности наносится тонкий слой сажи. Боковые поверхности калориметра и образца обклеиваются алюминиевой фольгой для того, чтобы предотвратить нагрев их светом.

Разогрев калориметра ΔT_k в процессе опыта фиксируется термопарой «манганин — константан» 3 (диаметр проволоки 0,1 мм), впаянной в тело калориметра (рис. 2). Плотность теплового потока q_0 , поглощенного калориметром (и образцом), определяется по формуле

$$q_0 = \frac{m \cdot c_k \cdot \Delta T_k}{S \cdot \tau_0}, \quad (7)$$

где m — масса калориметра; c_k — удельная теплоемкость меди при температуре T_0 (взята из [2]); S — площадь воспринимающей поверхности калориметра; τ_0 — время воздействия светового излучения.

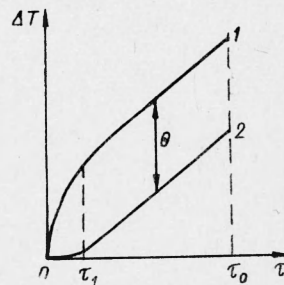
Для измерения температур облучаемой и задней поверхностей образца пороха служат манганин-константановые термопары 4 (диаметр проволоки 0,1 мм), прокатанные до толщины 20 мк в местах контакта с образцом; термопары заделываются в образец на длине 14—16 мм с помощью ацетона, после чего образец высушивается в сушильном шкафу или на воздухе в течение трех и более суток.

Для уменьшения сопротивления внешней цепи и удобства монтажа термопары 3 и 4 подсоединены внутри криостата к более толстым проводникам из тех же материалов. Место их подсоединения 5 термостатировано. Холодные концы 6 термопар термостатируются в сосуде Дьюара при температурах тающего льда, возгонки углекислоты или кипения жидкого азота в зависимости от того, в каком диапазоне начальных температур проводятся измерения.

Запись термо-э. д. с. осуществляется на электронных потенциометрах 10 и 11 (ЭПП — 09), предел измерений которых 2 мв. Приборы соединены с холодными спаями термопар медными проводниками. Все внешние цепи от криостата до приборов экранированы. Изменение полярности осуществляется переключателями 8 и 9, попеременное переключение термопар 4 — переключателем 7. Применяемые термопары отградуированы по температурам тающего льда, затвердевания ртути, возгонки углекислоты и кипения жидкого азота.

Эксперименты велись в следующем порядке. После установки образца пороха толщины l в камере А, заполненной обезвоженным азотом, в течение 20—40 мин создавалась нужная начальная температура. В камере Б при этом поддерживалось разрежение $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Затем из камеры А удалялся азот до разрежения 10^{-1} мм рт. ст., после чего в течение 60—70 сек производилось облучение калориметра и образца с одновременной записью показаний термопар приборами. Плотность светового потока выбиралась такой, чтобы максимальный разогрев передней стенки образца не превышал 10—15° С.

Рис. 3. Зависимость «разогрев — время» для пластины пороха. 1 — разогрев на облучаемой поверхности; 2 — разогрев на задней поверхности.



Из полученных для образца осциллограмм, обработанных в координатах «разогрев — время», на квазистационарных участках кривых определялись разность температур θ и скорость роста температуры $b = \frac{\partial T}{\partial \tau}$ (рис. 3).

Плотность теплового потока q_0 вычислялась по разогреву калориметра ΔT_k за время облучения τ_0 из формулы (6).

Удельная теплоемкость c и температуропроводность a пороха вычислялись по формулам (4) и (5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В работе были проведены измерения теплофизических коэффициентов нитроглицеринового пороха марки Н и Н+1% сажи ($\rho=1,6 \text{ г/см}^3$). При заданной начальной температуре исследовались 2—3 образца пороха той и другой марки; для каждого образца проводилось шесть измерений.

На рис. 4 и 5 приведены средние значения температуропроводности и удельной теплоемкости этих порохов в диапазоне $-160 \div -30^\circ\text{C}$. Каждая точка отнесена к начальной температуре с поправкой на разогрев образца (величина поправки не превышает $8 \div 10^\circ\text{C}$).

Среднеквадратичная ошибка измерений коэффициентов a и c порохов не превышает 5,5 и 6,5% соответственно.

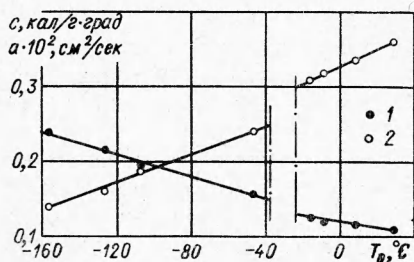


Рис. 4. Зависимость теплофизических коэффициентов пороха Н от температуры.

1 — температуропроводность, $a \cdot 10^2 \text{ см}^2/\text{сек}$;
2 — удельная теплоемкость c , $\text{кал}/\text{г} \cdot \text{град}$.

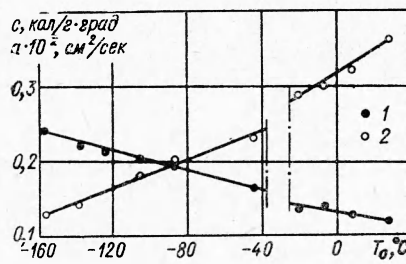


Рис. 5. Зависимость теплофизических коэффициентов пороха Н + сажа от температуры.

1 — температуропроводность; 2 — удельная теплоемкость.

Как показали измерения, теплоемкость порохов с увеличением температуры растет, температуропроводность — падает. Особенно значительно изменение теплоемкости, которая при возрастании температуры на 180°C увеличивается приблизительно в 2,6 раза. Температуропроводность в этом интервале температур уменьшается в 2,2 раза. Несомненно, что такая сильная зависимость теплофизических коэффициентов от температуры должна быть принята во внимание при изучении механизма горения порохов. Теплопроводность слабо растет с увеличением температуры (примерно, на 30%).

В ходе экспериментов обнаружена область температур ($-38 \div -20^\circ\text{C}$), где, по-видимому, происходит кристаллизация нитроглицерина [3], который является одной из основных компонент исследованного пороха. Она сопровождается чрезвычайно сильной зависимостью теплоемкости от температуры; по этой причине в области кристаллизации не удалось по изложенной методике получить надежных значений c и a порохов.

Во всей исследованной области температур теплофизические свойства порохов Н и Н + сажа практически не различаются.

Поступила в редакцию
10/VIII 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., ГИТТЛ, 1955.
2. Douglas L. Martin. Canadian Journal of Physics, 1960, 98, 1, 17.
3. Ф. Наум. Нитроглицерин и нитроглицериновые ВВ. Пер. с нем. М.—Л., ОНТИ, 1934, стр. 98—103.