

**ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
ПОВЕРХНОСТИ ПОРОХА**

П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. А. Селезнев, Н. К. Мамина
(Москва)

ВВЕДЕНИЕ

Горение пороха представляет собой последовательность физико-химических процессов, начинающихся в твердой и завершающихся в газовой фазе на некотором расстоянии от поверхности заряда образованием равновесной смеси продуктов сгорания [1—3]. Одной из важнейших характеристик процесса горения является температура поверхности горения твердого топлива. Величина ее определяет скорость образования газовой фазы, т. е. скорость горения пороха. Трудности экспериментального определения температуры поверхности обусловлены очень высоким температурным градиентом в этой зоне горения, а также некоторой неопределенностью положения самой поверхности. Целью данной работы является разработка нового оптического способа определения температуры поверхности горящего пороха.

Существует несколько экспериментальных работ по определению температуры реакционного слоя горящего пороха.

Первым более ранним и распространенным, является термопарный метод измерения температуры. Им пользовались советские и зарубежные исследователи, видоизменяя форму, материал, способ крепления термопар.

В работе Похила [1, 2] описывается измерение температуры горячей поверхности прямолинейной медь-константановой термопарой (толщина спая 50 μ). В образце пороха на расстоянии 2 мм просверливались два сквозных и параллельных между собой отверстия, через которые продевалась термопара. К свободным концам ее прикреплялся небольшой грузик, чтобы спай термопары плотно прилегал к поверхности образца. По мере сгорания образца термопара под действием грузика опускалась и, таким образом, всегда оказывалась плотно прижатой к поверхности. Экспериментальные результаты оценки среднего значения температуры реакционного слоя пороха H в зависимости от давления изменяются от 300°С при давлении 5 атм до 350°С при давлении 100 атм.

Американские ученые Клейн, Ментсер и Эльбе [4] для получения профиля температуры при горении впервые применили способ заклейки термопар в порох. Платино-платинородиевые термопары \varnothing 12,5 μ , сваренные «углом», заклеивались с помощью ацетона в нитроглицериновый порох. При горении пороха такая термопара со скоростью горения проходит через температурную волну. Регистрация термоэдс термопары позволяет получить распределение температуры в порохе при горении.

Полученные ими $T_n = 250^\circ\text{C}$ при давлениях от 20 до 50 *атм*, т. е. T_n с давлением не изменяется.

Аналогичным методом пользовались Хеллер и Гордон [5]. Они провели измерения более тонкими термопарами $\varnothing 7,5 \mu$ и $\varnothing 2,5 \mu$, и оценили T_n , которая по их измерениям достигает $700\text{--}1000^\circ\text{C}$, с большим разбросом показаний.

Сэбеделл, Виноград, Саммерфильд [6] пользовались платино-платинородиевыми термопарами $\varnothing 7,5 \mu$, введенными в образцы ТРТ. Полученные данные в виде зависимости выходного сигнала термопары от времени давали возможность найти температуру поверхности горения ТРТ. Температура поверхности определялась по отклонению кривой распределения температуры от характерного профиля в твердом теле при действии механизма чистой теплопроводности. Для смесевых топлив на основе перхлората аммония были получены $T_n = 550\text{--}650^\circ\text{C}$ при давлении от 1 до 50 *атм*, для баллистических — 300°C . Увеличение T_n с ростом давления они не наблюдали.

В работах Зенина [7] рассмотрен вопрос теплообмена термопары со средой в процессе горения. Он доказал, что принятый в американских работах способ заклейки термопар в образцы пороха «углом» не учитывает больших теплотерь в концы, что приводит к сильному искажению действительного температурного профиля. Для температурных измерений Зенин применил П-образные термопары $W + Re\text{--}W + Re$ (5 и 20% *Re*), которые специальным образом впрессовывались в образец, и их показания записывались на шлейфовом осциллографе. Температура поверхности определялась по максимуму интенсивности тепловыделения в конденсированной фазе при обработке осциллограмм. Полученная T_n изменялась от 300°C при 10 *атм* до 450°C при 150 *атм* для пороха Н.

Для смесевого пороха на основе перхлората аммония были получены $T_n \sim 380^\circ\text{C}$ при 5 *атм* и 560°C при 150 *атм*. Для чистого перхлората аммония с помощью этого метода были получены T_n от 400°C при 50 *атм* до 300°C при 200 *атм* [8], т. е. температура поверхности горения перхлората падает с ростом давления и в области неустойчивого горения приближается к температуре фазового перехода $\sim 270^\circ\text{C}$. Были высказаны предположения об изменении механизма горения перхлората аммония с ростом давления и о каталитическом влиянии продуктов, диффундирующих из зоны реакции в газовой фазе к поверхности, на реакцию газификации конденсированной фазы.

Термопарный метод измерения температур при всех своих достоинствах в ряде случаев становится неприемлемым. Указывая на недостатки этого метода, надо прежде всего отметить соизмеримость размеров термопар и размеров зон при горении порохов, особенно при повышенных давлениях, когда размеры всех зон горения сужаются. При измерении температуры поверхности этим методом термопары непосредственно вторгаются в зоны горения и могут оказывать влияние на сам процесс горения. Необходим учет теплотерь в концы из-за большого различия коэффициентов теплопроводности материалов термопар и пороха. При измерении температуры поверхности смесевого топлива показания термопары могут зависеть от компонента топлива, с которым она находится в контакте, поэтому следует ожидать определенный разброс при измерениях температур. Возможны также искажения температурного профиля из-за тепловой инерционности термопар. Поэтому наряду с термопарным методом сейчас развивается спектрально-оптический метод измерения температур при горении порохов. Измерение осуществляется путем концентрации с помощью оптической системы

всей энергии излучения в пределах определенной длины волны или интервала длин волн.

В работах [9—11] описан радиационный метод измерения температуры реакционного слоя. Измеряя интенсивность излучения от поверхности горящего пороха через факел пламени и интенсивность излучения от эталонного черного тела с известной температурой, авторы по известным законам излучения определили температуру поверхности горящего пороха. Для измерений выбирались определенные длины волн, в которых излучение газовой фазы пламени мало. Кроме того, толщина пламени излучающих газов, через которое наблюдалась поверхность, была уменьшена с помощью специально разработанной горелки, что дало возможность провести соответствующую оценку излучения газа.

Средняя температура поверхности горения для баллистических топлив изменяется в пределах от 300 до 400°С при атмосферном давлении. Для смесевых топлив на основе перхлората аммония температура поверхности горения была определена в широком диапазоне давлений и изменялась от 350°С при 25 мм рт. ст. до 700°С при 21 атм. Недостатком этого метода является отсос в процессе измерения газовых продуктов от реакционного слоя для уменьшения влияния газовой смеси. Кроме того, при повышенных давлениях в связи с сильным экранирующим действием факела пламени этот метод становится неосуществимым экспериментально.

Несколько похожий способ измерения температуры поверхности горения описан в работе [12]. На всех фотографиях, особенно при цветной съемке, можно наблюдать, что частицы горящего перхлората аммония излучают свет с различной интенсивностью, т. е. они обладают различной температурой. Путем сравнения интенсивности излучения с интенсивностью температур излучателей можно определить температуру кристалла перхлората. Насколько прост этот метод на словах, настолько трудна его реализация и настолько многочисленны возможные источники ошибок. Разработанный метод состоял в следующем: в топливе размещались металлические проволоки, точки плавления которых лежат между 900 и 1800°С. Во время горения фотографируется поверхность топлива вместе с оплавленными бусинками проволок. В соответствии с яркостью каждой точки объекта эмульсия, покрывающая пленку, чернеет различно. Степень почернения измеряется фотометром и пропорционально ей устанавливается первоначальная температура. Благодаря применению нескольких металлов можно начертить градуировочную кривую, характерную для снимка. Говоря о недостатках этого способа определения температуры поверхности, надо отметить следующие обстоятельства: излучательная способность металлов известна неточно; точка достигаемой температуры плавления неточно локализована; неизбежно влияние металла на горение топлива; вследствие незначительной чувствительности материала пленки никогда не удастся измерить интенсивность общего излучения, а только интенсивность части излучения; за неимением данных об излучательной способности перхлората аммония при условиях горения ее приняли равной излучательной способности металлической проволоки. Учитывая все эти обстоятельства, можно сказать, что результаты, полученные этим методом ($T_n \sim 1270—1800^\circ\text{C}$), являются завышенными, и точность этих измерений невелика.

В этой статье предлагается новый оптический способ определения температуры поверхности горящего пороха, разработанный в ИХФ АН СССР П. Ф. Похилом, В. М. Мальцевым и др. [13]. Этот метод основан на оценке излучения от реакционного слоя и дымогазовой зоны

пламени с помощью светопровода, помещаемого в толщу образца на определенную глубину. Исследуемое излучение по светопроводу попадает на приемник с последующей регистрацией. Принципиально этот способ отличается от ранее известных тем, что светопровод получает информацию о реакционном слое на таких расстояниях от поверхности горения, на которых полностью исключается взаимодействие светопровода с прогретым и реакционным слоями пороха.

ТЕОРИЯ МЕТОДА

Светопровод, используемый в работе, выполнен из сапфира (монокристаллическая окись алюминия — Al_2O_3) и представляет собой цилиндрический стержень длиной 200 мм и диаметром 3 мм с полированными боковой поверхностью и торцами. По свойствам сапфировый стержень является механически прочным и химически стойким материалом, имеющим хорошее оптическое пропускание. Высокая точка плавления сапфира (2300°K) дает возможность измерить с его помощью достаточно высокие температуры.

Когда фронт горения находится на расстоянии x от приемного торца сапфирового стержня, приемник у другого торца стержня регистрирует энергию

$$E_{1x} = E_{p.c} l^{-kx} + E_d (1 - a_{p.c}) l^{-kx},$$

где $E_{p.c}$ — энергия, излучаемая единицей поверхности реакционного слоя; E_d — суммарная энергия, падающая на единицу поверхности из дымогазовой зоны; $a_{p.c}$ — поглощательная способность реакционного слоя; k — показатель поглощения не реагирующей массы пороха.

Если через дымогазовую зону, реакционный слой и непрореагировавшую массу пороха просвечивает постоянный по величине световой сигнал, приемник регистрирует энергию

$$E_{2x} = E_{1x} + E (1 - a_d) (1 - a_{p.c}) l^{-kx},$$

где a_d — суммарная поглощательная способность дымогазовой зоны; E — световой сигнал, падающий на единицу поверхности от источника с известным излучением.

В момент выхода сапфирового стержня из реакционного слоя приемник излучения зафиксирует суммарную энергию E_d :

$$E_{1x=0} = E_d.$$

В случае просвета через дымогазовый слой постоянного светового сигнала приемник зафиксирует энергию

$$E_{2x=0} = E_d + (1 - a_d) E.$$

Преобразуя эти формулы, получим окончательные формулы для определения поглощательной способности реакционного слоя и энергии, излучаемой единицей поверхности реакционного слоя

$$a_{p.c} = 1 - \frac{E_{2x} - E_{1x}}{E_{2x=0} - E_{1x=0}} \cdot l^{kx}.$$

$$E_{p.c} = \left(E_{1x} - E_{1x=0} \cdot \frac{E_{2x} - E_{1x}}{E_{2x=0} - E_{1x=0}} \right) l^{kx}.$$

Зная эти величины, по известным законам излучения можно получить температуру поверхности горящего пороха.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОХА

Поскольку излучение от реакционного слоя, пройдя сквозь толщу прогретого пороха, попадает на приемный торец сапфира, необходимо исследовать спектры поглощения изучаемых веществ. В качестве образцов исследования были взяты баллиститный порох Н и смесевой порох на основе перхлората аммония и эпоксидной смолы.

На инфракрасном спектрометре были получены спектры поглощения исследуемых веществ в интервале длин волн 0,75—5 μ в области прозрачности сапфира и в интервале температур от комнатной до температуры разложения пороха. Спектры поглощения при различных температурах снимались с целью изучения влияния прогретого слоя пороха на его оптическое пропускание. Было установлено, что изучаемые образцы пороха имеют окна спектральной прозрачности в области от 0,4 до

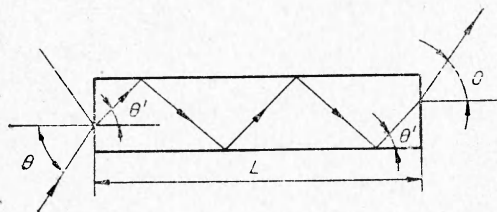


Рис. 1.

2,5 μ (далее следуют линии поглощения) во всем рассматриваемом диапазоне температур. При исследовании не наблюдалось заметного изменения показателя поглощения пороха во всем интервале нагрева образца. На основании этого был выбран радиационный метод измерения температур.

На рис. 1 показан путь распространения лучистой энергии через цилиндрический сапфировый стержень длиной L . Плоскость торца стержня перпендикулярна к его длине. Если лучистая энергия от излучателя падает на левый торец стержня под углом θ к нормали поверхности торца, то часть энергии отражается, а остальная часть входит в стержень под углом преломления θ' , который определяется формулой $\sin \theta' = \frac{\sin \theta}{n}$, где n — значение коэффициента преломления для сапфира. Величина n изменяется от 1,79 до 1,60 в спектральной области, от 0,4 до 5,0 μ — в области прозрачности сапфира.

Используя минимальное значение n , равное 1,60, и полагая $\theta = 90^\circ$ (скользящий угол падения), получаем $\sin \theta' = 0,625$, откуда $\theta' = 38,68^\circ$. Соответствующий минимальный угол падения на стенку равен $90^\circ - 38,68^\circ = 51,32^\circ$. Синус угла «выхода» через боковую поверхность стержня θ'' в рассматриваемом случае равен 1,249, что невозможно. Это означает, что на цилиндрических поверхностях стержня будет происходить полное внутреннее отражение энергии при любом возможном угле входа излучения в торец стержня.

Если на левый торец стержня падает излучение от излучателя из всей полусферы, то с правого торца стержня выходит соответствующая лучистая энергия в полусферу, к которой этот торец стержня обращен. Из этого излучения приемник, находящийся за правым торцом стержня, зафиксирует лишь часть энергии, зависящую от телесного угла. Величи-

на этого телесного угла зависит от расстояния h между приемником и торцом светопровода и определяется углом θ между образующими и нормалью к поверхности приемника. Угол θ можно определить из решения задачи о лучистом обмене между двумя поверхностями, одной из которых является торец светопровода диаметром D , другой — приемная площадка, болометра диаметром d , считая при этом, что чувствительный элемент болометра полностью поглощает всю падающую на него лучистую энергию. Тогда для угла θ получим выражение:

$$\theta = \arcsin \frac{4 + D_1^2 + D_2^2 - \sqrt{(4 + D_1^2 + D_2^2)^2 - 4D_1^2 D_2^2}}{2D_2^2},$$

где $D_1 = \frac{d}{h}$; $D_2 = \frac{D}{h}$.

Таким образом, изменяя расстояние между торцом светопровода и приемником, мы имеем возможность изменять апертуру системы сапфировый стержень — приемник, тем самым изменяя величину излучаемой площади, видимой приемником через сапфировый светопровод.

На рис. 2 представлена блок-схема установки для измерения температуры поверхности горения (реакционного слоя) в вакууме и в условиях повышенного давления. Образец исследуемого пороха 4 с введенным в его толщу сапфировым светопроводом 8 помещается под стеклянный колокол 1 в случае вакуума или в бомбу постоянного давления в случае опытов при повышенных давлениях через металлический ввод. Этот ввод представляет собой металлический корпус, имеющий на одном конце наружную, на другом внутреннюю резьбу. Внутрь корпуса вставлена металлическая оправка со светопроводом, заполимеризованная эпоксидной смолой. Уплотнение оправки в корпусе производится прокладкой из красной меди путем вкручивания штуцера во внутрь корпуса ввода. Корпус наружной резьбой вкручивается в дно бомбы или в металлическую подставку, к которой плотно притирается стеклян-

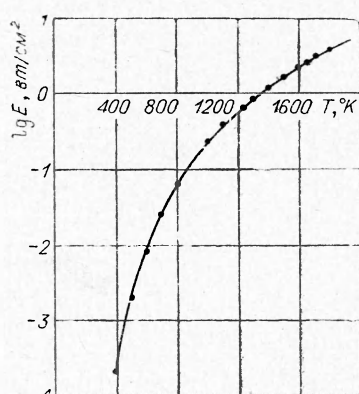
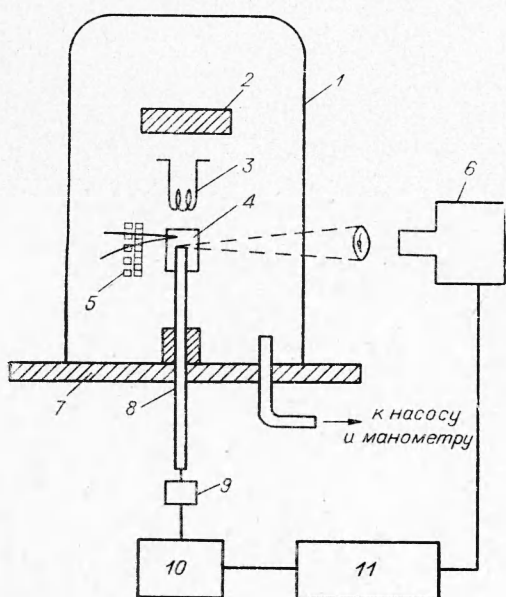


Рис. 3.

Рис. 2.

ный колокол. В нижней части светопровода находится приемник излучения 9 в специальном корпусе, который позволяет точно фиксировать расстояние от торца сапфирового светопровода до приемника излучения. В качестве приемника в работе использовался болометр с постоянной времени 2 мсек.

Для предварительного подогрева образца в условиях вакуума до температуры 100°С, когда количество тепла, выделившегося за счет суммарно-экзотермического процесса разложения конденсированной фазы будет достаточным для устойчивого самораспространения горения пороха в вакууме, под стеклянный колокол вводилась малоинерционная электрическая печь 5. Температура предварительного нагрева образца контролировалась медь-константановой термопарой, вклеенной в порох. Поджог образца производился от накаливаемой спирали 3, которая сразу же после поджога отводилась электромагнитом из зоны горения. Излучение от реакционного слоя через сапфировый светопровод попадало на приемник излучения. Световой сигнал со стержня преобразовывался болометром в электрический сигнал, который далее усиливался усилителем У4-1 10 и записывался на шлейфовом осциллографе Н-107 11. Для фиксации момента выхода сапфирового стержня из реакционного слоя при горении использовалась киносъёмочная камера 6 с трехкратным увеличением.

Для калибровки системы излучатель — сапфировый стержень — приемник по энергии использовалась графитовая пластинка, нагреваемая электрическим током до определенной температуры T , фиксируемой термопарой. Сигнал болометра на излучение от графитовой пластинки, имеющей температуру T , записывался на осциллограмме. Размеры графитовой пластинки выбирались такие, чтобы исключить влияние краевых эффектов.

С единицы поверхности графитовой пластинки, имеющей температуру T , излучается в полусферу энергия, определяемая формулой

$$E = a_r \sigma T^4 \frac{15}{\pi^4} \left\{ \int_{c_2/\lambda_2}^{\infty} \frac{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)^3 d\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)}{l^{c_2/\lambda} T - 1} - \int_{c_2/\lambda_1}^{\infty} \frac{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)^3 d\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)}{l^{c_2/\lambda} T - 1} \right\}$$

(для интервала длин волн 0,4—2,5 μ — области прозрачности сапфира и толщи пороха, через которую проходит излучение); a_r — поглощательная способность графита.

Если θ есть апертура системы сапфировый стержень — приемник, то энергия, попадающая на приемник от графитовой пластинки через сапфировый светопровод, будет равна:

$$E = a_r (1 - r) \sigma T^4 \frac{15}{\pi^4} \sin^2 \theta \left\{ \int_{c_2/\lambda_2}^{\infty} \frac{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)^3 d\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)}{l^{c_2/\lambda} T - 1} - \int_{c_2/\lambda_1}^{\infty} \frac{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)^3 d\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)}{l^{c_2/\lambda} T - 1} \right\},$$

где r — коэффициент отражения торца сапфира.

Эта формула не учитывает поглощение световой энергии внутри сапфирового стержня.

На рис. 3 приведен график зависимости энергии излучения едини-

цей поверхности графитовой пластинки в зависимости от ее температуры. Таким образом, задавая определенную температуру на графитовой пластинке, по градуировочному графику $E=f(T)$ можно определить энергию излучения, входящую в сапфир. Измеряя отклонение луча осциллографа, соответствующее этому сигналу, можно построить градуировочный график отклонения луча осциллографа в зависимости от величины энергии падающего излучения.

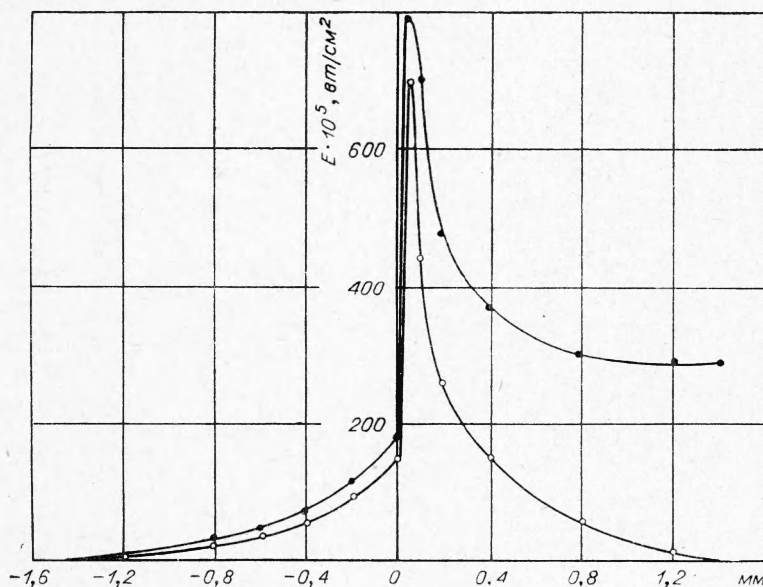


Рис. 4.

При сжигании образца на ленте осциллографа получалась запись сигнала с болометра во временной развертке. Зная скорость горения пороха и используя градуировочные графики, можно построить распределение энергии излучения от реакционного слоя и от дымогазовой зоны в координатах: энергия — расстояние от реакционного слоя.

На рис. 4, 5 показано распределение энергии излучения по образцам пороха Н и смешанного пороха соответственно, включая их реакционный слой и дымогазовую зону, полученные при сжигании пороха в вакууме ($p_0 \sim 10^{-2}$ мм рт. ст., $p_k \sim 3$ мм рт. ст.). Верхние кривые на этих графиках соответствуют опытам, проводимым с просветом дымогазовой зоны и реакционного слоя постоянным световым сигналом, т. е. эти опыты проводились с включенной системой калибровки. На этих графиках выходу сапфирового стержня в дымогазовую зону соответствует резкое увеличение сигнала. Полученные распределения энергии излучения позволяют по изложенной выше методике рассчитать поглощательную способность реакционного слоя и энергию, излучаемую единицей поверхности реакционного слоя. Зная энергию, излучаемую единицей поверхности реакционного слоя, по графику зависимости $E=f(T)$ можно найти радиационную температуру реакционного слоя, которая связана с истинной температурой и поглощательной способностью реакционного слоя по формуле:

$$T_n = \frac{T_R}{\sqrt[4]{a_{p.c}}}$$

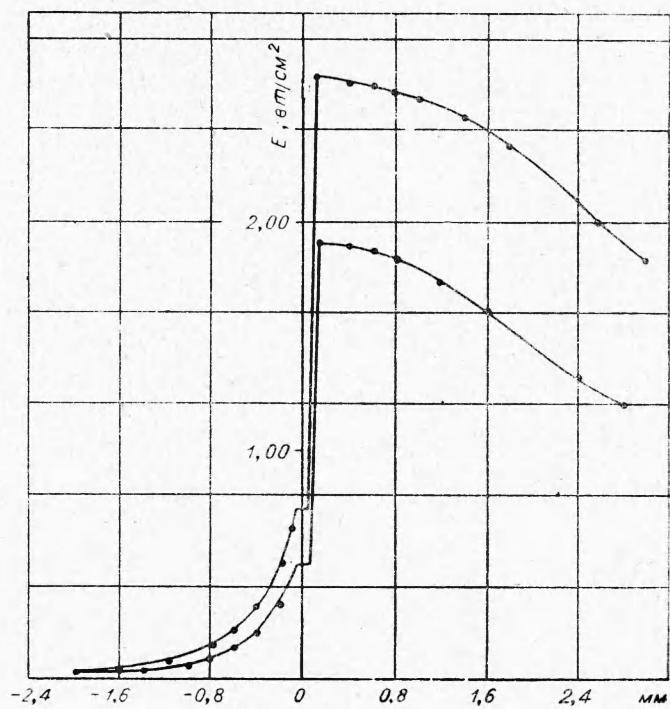


Рис. 5.

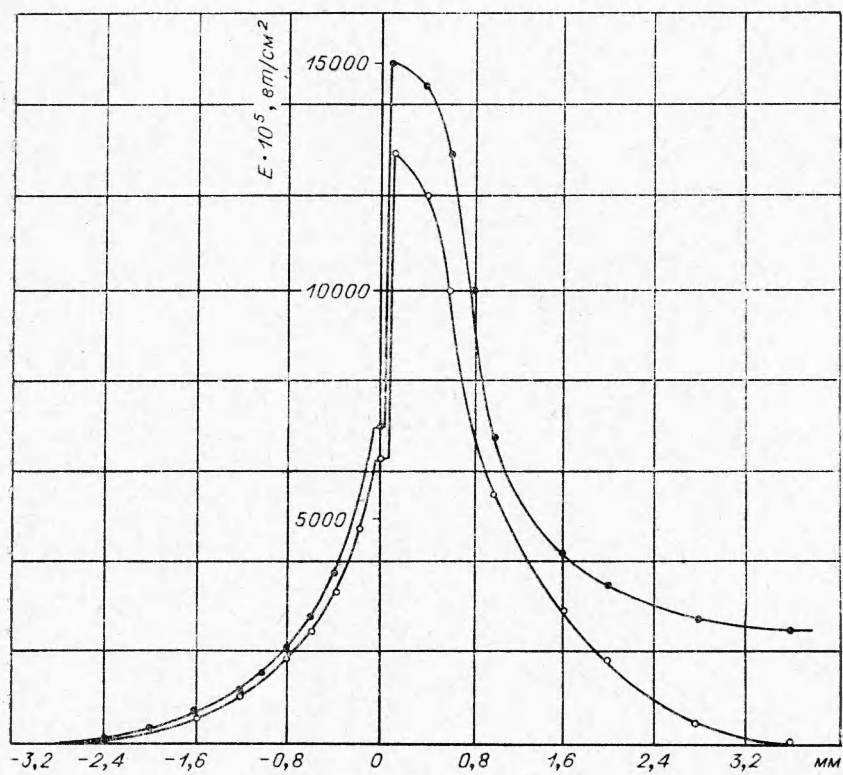


Рис. 6.

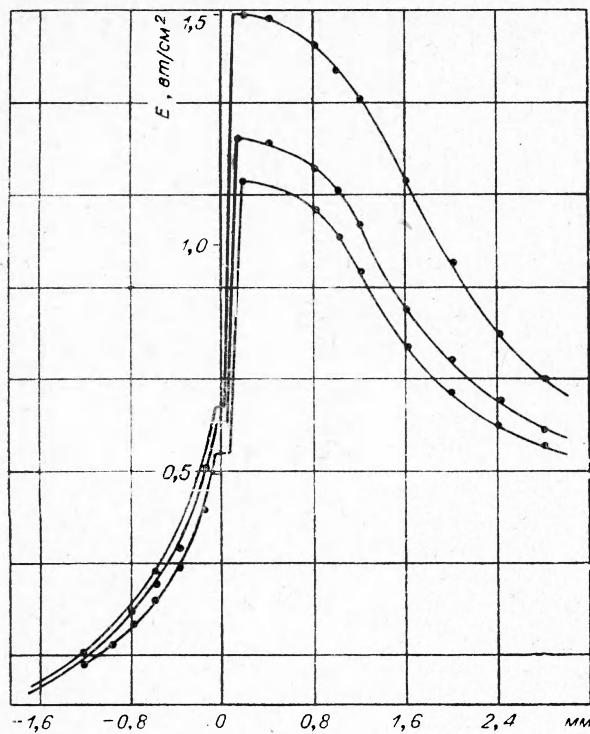


Рис. 7.

Для пороха Н в условиях вакуума получена температура поверхности $T_n \sim 310 \pm 20^\circ \text{C}$, $a_{p.c} = 0,74$, для смешанного пороха на основе перхлората аммония и эпоксидной смолы $T_n \sim 510 \pm 20^\circ \text{C}$, $a_{p.c} = 0,66$.

На рис. 6, 7 представлено распределение энергии излучения по образцу и факелу пламени для пороха Н и смешанного пороха при различных давлениях. Полученные температуры при различных давлениях сведены в единый график зависимости температуры поверхности горения от давления (рис. 8). Верхняя кривая показывает изменение T_n в зависимости от давления для модельной смеси перхлората аммония + горючее. Для этого состава T_n изменяется от 510°C в вакууме до 720°C при 20 атм . Нижняя кривая дает зависимость T от p для баллистического пороха Н. Температура реакционного слоя для этого пороха изменяется от 310°C в вакууме до 380°C при 50 атм .

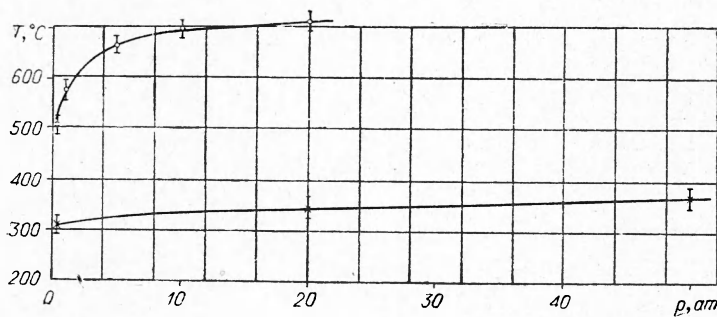


Рис. 8.

Знание суммарной энергии излучения дымогазовой зоны факела пламени E_d позволяет сделать оценку доли энергии, подводимой к поверхности пороха излучением. Прогрев реакционного слоя пороха за счет энергии излучения E_d можно рассчитать по формуле

$$\Delta T = \frac{E_d}{\rho v_r c_p},$$

где ρ — плотность пороха; v_r — скорость горения пороха; c_p — удельная теплоемкость пороха.

Для изучаемых составов $\Delta T \sim 2-3^\circ \text{C}$, т. е. подвод энергии из дымогазовой зоны факела пламени посредством излучения незначителен по сравнению с теплом, поступающим за счет теплопроводности.

ВЫВОДЫ

1. Создана установка для измерения температуры поверхности горящего пороха с помощью сапфирового светопровода.
2. Разработан оптический метод измерения температуры поверхности горения (реакционного слоя) пороха с помощью вывода излучения сапфировым светопроводом.
3. Определены спектрально-оптические характеристики порохов в широком интервале температур и длин волн. Обнаружены спектральные «окна», которые позволили применить радиационный метод определения температуры поверхности реакционного слоя.
4. Измерены температуры поверхности горения (реакционного слоя) в вакууме и при повышенных давлениях для составов: порох Н и модельная смесь перхлорат аммония — горючее.
5. Оценена доля энергии, поступающей из дымогазовой зоны факела пламени к реакционному слою посредством излучения.

Поступила в редакцию
14/II 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил. Докт. дисс. М., 1951.
2. П. Ф. Похил.— Сб. «Физика взрыва», № 2, 1953.
3. П. Ф. Похил, Л. Д. Ромоданова, М. Н. Белов.— Сб. «Физика взрыва», № 3, 1955.
4. Klein, Mentser, Elbe. J. Phys. Chem., 1950, 54, 877.
5. Heller, Gordon. J. Phys. Chem., 1955, 59, 773.
6. Сэбеделл, Виноград, Саммерфилд. Ракетная техника и космонавтика, 1965, 9, 16.
7. А. А. Зенин. Канд. дисс. М., 1962.
8. В. К. Боболев, А. П. Глазкова и др. ПМТФ, 1964, 3, 153.
9. Powling, Smith. J. Comb. Flame, 1962, 6, 173.
10. Powling, Smith. J. Comb. Flame, 1962, 6, 21.
11. Powling, Smith. J. Comb. Flame, 1963, 7, 269.
12. H. Selzer. Raketentechnik und Raumfahrtforschung, 1963, 2, 41.
13. П. Ф. Похил, А. Е. Волнянский и др. ЖФХ, XXXIX, 5.