

Второе возможное объяснение заключалось в том, что при высоких давлениях плексиглас стенки горит с перхлоратом и это горение в зоне контакта идет быстрее, чем вдали от нее, и ведет процесс. Проверить это можно было, сопоставив скорости горения смесей нулевого кислородного баланса в плексигласовых трубках и без оболочки. Парафиновые смеси дают в плексигласовых и перхлорвиниловых оболочках одинаковую скорость — $17 \text{ г / см}^2 \text{ сек}$. Эту же скорость дает и горение голой шашки перхлората с парафином. Это говорит о том, что такие побочные факторы, как охлаждение, теплоотвод в оболочку, омывание плотным азотом, не играют существенной роли, а различие в скоростях для перхлората обусловлено действительно взаимодействием вещества со стенкой. Это взаимодействие нельзя считать полностью исключенным и при горении в перхлорвиниловой оболочке. Заметим, что опыты с голой шашкой дали значительно меньшую скорость — $7\text{--}8 \text{ г / см}^2 \text{ сек}$, которую можно считать скоростью горения самого перхлората.

Опыты с шашечками, покрытыми фторированной смазкой, дали скорость еще меньшую. Можно предположить, что эта последняя оболочка, ожигаясь и частично испаряясь по мере хода горения и смешиваясь с продуктами горения, несколько уменьшает его скорость по сравнению со скоростью горения перхлората без оболочки.

Таким образом, зависимость скорости горения от давления для перхлората аммония, изученная в широком диапазоне давлений, существенно отличается от таковой для других изученных веществ [2]. Наиболее интересным из экспериментальных фактов является падение скорости горения с давлением в определенном его диапазоне, а также пульсирующий, неустойчивый характер горения в этих условиях. Падение скорости горения с давлением К. К. Андреевым связывается с наличием фазового перехода, имеющего место при термическом разложении перхлората при 240°C , однако это предположение требует экспериментальной проверки.

Автор благодарит К. К. Андреева за ценные советы по работе.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступила 7 II 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Friedman R., Nugeut R. G., Rumbel K. E. and Scurlock. Deflagration of Ammonium Perchlorate, VI Symposium (International) on Combustion, 1957, 612.
2. Глазкова А. П. и Терешкин И. А. О зависимости скорости горения взрывчатых веществ от давления. Ж. физ. хим., 1961, 35, № 7, 1622

О ТЕПЛОБМЕНЕ МИКРОТЕРМОПАР В УСЛОВИЯХ ГОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ

А. А. Зенин

(Москва)

Для получения распределения температуры при стабильном горении конденсированных веществ можно применять тонкие термопары. Заделанные в шашки горящего конденсированного вещества, термопары со скоростью его горения проходят через зону переменной температуры, показывая (при идеальном теплообмене термопары со средой) распределение температуры. Подобной методикой широко пользуются для изучения горения порохов (см. [1, 2]), причем заделка термопар в шашки производится «углом». Применение термопар такой формы можно объяснить только недостаточным вниманием к вопросу теплообмена термопары с газовой и конденсированной средой в процессе горения. Естественно ожидать значительного понижения температуры термоспая у термопар такой формы за счет тепловых потерь в концы, из-за того, что коэффициент теплопроводности металлической термопары (λ_2) на 2—3 порядка превышает коэффициент теплопроводности пороха (λ_3) и продуктов его разложения (λ_1). Возможно также искажение профиля температуры из-за тепловой инерционности термопар.

В настоящей работе рассматриваются требования, которым должны удовлетворять параметры термопар (форма, толщина и др.), чтобы обеспечить минимум искажения получаемого температурного профиля. Для этого предварительно изучен теплообмен термопары с конденсированной и газовой средой в условиях, близких к условиям измерений температуры в волне горения, затем оцениваются ошибки термопарных

измерений. В работе, в частности, будет показано, что заклепка термопар «углом» действительно может приводить к большим ошибкам в температуре и серьезному искажению формы профиля температуры.

Обозначения

λ_1 — коэффициент теплопроводности газовой фазы,	a_3 — коэффициент температуропроводности пороха,
λ_2 — коэффициент теплопроводности термопары.	T — температура горения,
λ_3 — коэффициент теплопроводности конденсированной фазы,	T_2^* — температура термосная,
α — коэффициент теплоотдачи,	T_0 — начальная температура пороха и термопары,
c_2 — удельная теплоемкость термопары,	T_s — температура поверхности горящего пороха,
c_3 — удельная теплоемкость пороха,	u_1 — скорость оттока газа от пороха,
h — толщина ленточной термопары,	u_2 — скорость движения термопары (скорость горения пороха),
l — величина плеча термопары,	H — прогиб средней части плеча термопары,
ρ_1 — плотность газовой фазы,	E — модуль Юнга термопарной ленты,
ρ_2 — плотность термопары,	I — момент инерции термопарной ленты,
ρ_3 — плотность пороха,	p — аэродинамическое давление,
τ_0 — постоянная времени термопары в газовой фазе горящего конденсированного вещества,	b — ширина термопарной ленты,
τ_m — постоянная времени термопары при идеальном теплообмене (очень большое α),	μ_1 — вязкость газа,
a_1 — коэффициент температуропроводности газовой фазы,	x — расстояние от температуры горения до измеряемой температуры,
a_2 — коэффициент температуропроводности термопары,	y — расстояние по толщине термопары от середины ленты,
	B — критерий Био,
	N — критерий Нуссельта,
	R — критерий Рейнольдса.

Для получения профиля температуры предлагается (см. также [3]) термопара П-образной формы. Наличие участка, параллельного изотермам, названного «плечом», будет уменьшать понижение температуры термосная из-за теплопотерь в концы. Ниже будет показано, что можно так выбрать величину плеча l , что ошибка за счет теплоотвода в концы станет небольшой, а термопара останется еще жесткой (прогиб средней части плеча будет мал). Исследование теплообмена термопар П-образной формы имеет достаточно общий характер: при $l = 0$ получим термопару «углом», при $l = \infty$ — плоскую термопару (параллельную изотермам). Численные расчеты и количественные результаты экспериментов приведены для ленточных термопар из сплавов вольфрама с рением (95% W + 5% Re ÷ 80% W + 20% Re) толщиной $h = 7 \mu$ и $h = 3.5 \mu$ и шириной $b = 20 h$.

Сначала рассмотрим теплообмен П-образных ленточных термопар в газовой фазе и рассчитаем температурные ошибки за счет тепловой инерционности термопар и теплопотерь в их концы, а также покажем, что тепловая инерционность термопар, покрытых слоем расплавленной буры, не выше, чем у не покрытых бурой (той же общей толщины). Затем рассмотрим теплообмен термопары с конденсированной средой и определим занижение температуры за счет тепловой инерционности термопары и теплопотерь в ее концы.

Задача о распределении температуры по длине тонкой П-образной термопары при ее прохождении с постоянной скоростью через фронт пламени с экспоненциальным ростом температуры рассматривалась ранее [3]. В цитированной работе, как и в данной, экспоненциальный рост температуры выбран из соображений простоты, а также потому, что действительная зона переменной температуры шире из-за существования нескольких областей тепловыделения и определяемые нами ошибки, связанные с занижением температуры термосная, будут максимальными. Чтобы воспользоваться полученным решением, экспериментально определим коэффициенты теплоотдачи α ленточных термопар. Перемещая с известной скоростью нагретую термопару, по скорости остывания найдем ее постоянную времени τ_0 и затем вычислим α по соотношению, которое можно получить из уравнения теплопроводности для тонкой пластины, внезапно помещенной в среду с другой температурой (если критерий Био $B = ah / 2\lambda_2 \ll 1$; для наших термопар $B = 10^{-4} \div 10^{-5}$)

$$\alpha = \frac{c_2 \rho_2 h}{2\tau_0}$$

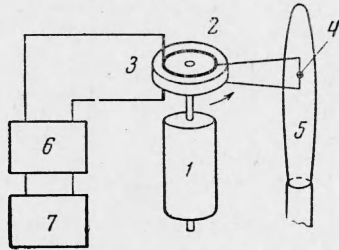
Здесь $c_2 \rho_2$ — объемная теплоемкость термопары (для проволоки радиуса r в этой формуле h заменяется на значение r).

Схема опыта приведена на фиг. 1. Термопара 4 крепилась на двух прутках, приваренных к кольцам, расположенным на разных сторонах вращающегося диска 2, с которых термо э.д.с. снимается щетками 3 и подается через предусилитель 6 на шлейфовый осциллограф 7. Термопара нагревается, проходя через тонкую (диаметром 1 ÷ 2 см) струю горячего воздуха (температура 500° С) и охлаждается в воздухе комнатной температуры. Длина пути охлаждения 1 м. Скорости обдува большие (5 ÷ 15 м / сек), поэтому переход от горячего газа к холодному происходит практически мгновенно.

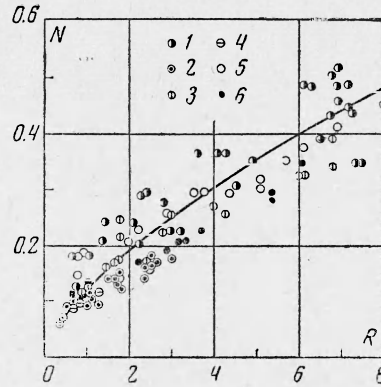
Результаты экспериментов для плоских ленточных термопар приведены в виде зависимости критерия Нуссельта $N = ah / \lambda_1$; от критерия Рейнольдса $R = u_1 r_1 h / \mu_1$ на фиг. 2. Значения параметров, входящих в критерии, взяты для воздуха комнатной температуры ($T_0 = 25^\circ \text{C}$)

$$\rho_1 = 1.293 \cdot 10^{-3} \text{ г / см}^3, \quad \mu_1 = 1.84 \cdot 10^{-4} \text{ г / см} \cdot \text{сек}, \quad \lambda_1 = 0.6 \cdot 10^{-4} \text{ кал / см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$$

Для получения температурного профиля наиболее целесообразно применение П-образных и М-образных термопар, поэтому следующая серия экспериментов была проведена с ними, результаты нанесены на ту же фигуру. Очевидно, в пределах разброса экспериментальных данных форма термопары не влияет на величину α .



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Схема опыта по определению коэффициентов теплоотдачи: 1 — электромотор, 2 — вращающийся диск, 3 — щетки, 4 — термопара, 5 — струя горячего воздуха, 6 — предусилитель, 7 — шлейфовый осциллограф

Фиг. 2. Критериальная зависимость $N = f(R)$ для различных ленточных термопар: 1 — плоская термопара $h = 7\mu$; 2 — плоская термопара $h = 3.5\mu$; 3 — плоская термопара $h = 7\mu$, покрытая слоем буры $\sim 7\mu$ (при обработке данных считалось, что $h_{ef} = 10\mu$); 4 — плоская термопара $h = 3.5\mu$, покрытая слоем буры $\sim 3\mu$ (при обработке данных считалось, что $h_{ef} = 5\mu$); 5 — П-образная термопара $h = 7\mu$; 6 — М-образная термопара $h = 7\mu$

Полученная критериальная связь $N = f(R)$ была использована для расчета коэффициентов теплоотдачи упомянутых термопар в условиях горения нитроглицеринового пороха Н в зависимости от его скорости горения. Расчеты проводились для средней температуры 1000° С и значений параметров

$$\mu_1 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ г / см} \cdot \text{сек}, \quad \lambda_1 = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ кал / см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$$

В качестве примера укажем, что для термопары $h = 3.5 \mu$ при давлении 20 ата (скорость горения пороха $u_2 = 0.34 \text{ см / сек}$) $\tau_0 = 0.6 \text{ мсек}$ (миллисекунды), $\alpha = 0.114 \text{ кал / см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$ при давлении 150 ата ($u_2 = 1.2 \text{ см / сек}$) $\tau_0 = 0.22 \text{ мсек}$, $\alpha = 0.307 \text{ кал / см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$.

Таблица 1

$u_2 \text{ см / сек}$	0.2		0.5		1.0		1.5	
	α	β	α	β	α	β	α	β
$h = 7\mu, \quad l = 1.2 \text{ мм}$	4.5%	10%	19%	6.5%	43%	4.2%	58%	3%
$h = 3.5\mu, \quad l = 0.4 \text{ мм}$	0.7%	6,8%	3.5%	3%	11.5%	1%	18%	0.4%

Вычисленные значения α использованы для расчета относительного занижения температуры П-образными термопарами в газовой фазе по формуле работы [3].

Результаты расчета приведены в табл. 1, где a — из-за тепловой инерционности термопар, b — из-за теплопотерь в концы.

Увеличение ошибки из-за тепловой инерционности термопар с увеличением скорости горения очевидно. Уменьшение ошибки из-за теплопотерь в концы связано с уменьшением времени пребывания термопары в зоне переменной температуры.

Если положить $l = 0$ (термопара углом), то по формуле работы [3] и вычисленным значениям α нетрудно получить, что измеряемые термопарой температуры и градиенты температуры для взятых термопар и диапазона скоростей будут примерно в 10 раз меньше действительных из-за теплопотерь в концы термопар. Таким образом, термопарная методика, использованная в работах [1, 2], не может считаться приемлемой, а результаты измерений требуют проверки.

При использовании термопар в зонах химических реакций в газовой фазе возможен каталитический эффект на поверхности металлической термопары. Для его устранения термопара покрывается слоем расплавленной буры. Исследование теплоинерционных свойств таких термопар представляет интерес. Ленточные термопары $h = 7 \mu$ и $h = 3.5 \mu$ покрывались слоем расплавленной буры: первая слоем максимальной толщины в центре ленты $\sim 7 \mu$, вторая $\sim 3 \mu$ (общие толщины 20μ и 10μ соответственно). Результаты по теплоотдаче, полученные описанным способом в критериальном виде, представлены также на фиг. 2, причем, чтобы совместить их с полученной ранее зависимостью $N = f(R)$ для голых термопар, принималось, что первая термопара имеет толщину 10μ , вторая 5μ . Таким образом, тепловая инерционность термопар, покрытых бурой, оказывается даже меньше тепловой инерционности непокрытой термопары той же общей толщины. Этот результат не представляется странным, несмотря на то, что теплопроводность буры на три порядка меньше теплопроводности термопар. Действительно, минимальная постоянная времени (при идеальном теплообмене, внутренняя задача теплопроводности) наших термопар равна

$$\tau_m = \frac{h^2}{a_2 \pi^2} = 10^{-7} \div 10^{-8} \text{ сек}$$

т. е. на четыре порядка меньше τ_0 . Эта оценка показывает, насколько сильно определяет тепловую инерционность тонких металлических термопар в рассматриваемых условиях тепловой пограничный слой на термопаре. Его определяющая роль сохранится и для плохих проводников тепла (стекла, буры), имеющих размеры взятых термопар, так как задача теплопроводности останется внешней ($B \sim 10^{-2}$). Тепловая инерционность таких тел будет определяться их объемной теплоемкостью $c_2 \rho_2$, а не теплопроводностью. Но $c_2 \rho_2$ буры примерно в 1.5 раза меньше, чем у металла термопары, что и объясняет экспериментально полученное уменьшение инерционности термопар, покрытых бурой, по сравнению с инерционностью голых термопар той же общей толщины. Другой причиной является уменьшение толщины покрытия к краю ленты.

Заметим также, что расчет по точному решению задачи теплопроводности о распределении температуры по толщине тонкой плоской термопары, проходящей фронт экстенционально растущей температуры, имеющее вид ¹

$$\frac{T_2 - T_0}{(T_* - T_0) e^{-u_1 x/a_1}} = \frac{\text{ch}(zy)}{\text{ch}(l/2zh) + (\lambda_2/\alpha) \text{sh}(l/2zh)} \quad \left(z = \sqrt{\frac{u_1 u_2}{a_1 a_2}} \right)$$

показывает практическую независимость изменения температуры со временем от коэффициента теплопроводности термопары в широком диапазоне изменения λ_2 ($\lambda_2 = 1 \div 10^{-3} \text{ кал/см.сек}^\circ\text{C}$) в условиях горения пороха Н.

Оценка тепловых потерь посредством теплопроводности в концы термопар и тепловой инерционности термопар в конденсированной фазе будет проведена нами раздельно из-за большей сложности задачи.

Сначала определим тепловую инерционность плоских термопар, у которых нет потерь тепла в концы, а затем найдем понижение температуры термоспая за счет теплопотерь в концы в условиях, когда влияние тепловой инерционности термопар исключено. Оценки занижения температуры термоспая, полученные для каждого вида теплопотерь, можно суммировать, если эти ошибки невелики, а именно эта область ошибок и условия, приводящие к небольшим ошибкам, и будут представлять интерес.

В конденсированной фазе теплообмен с термопарой осуществляется теплопроводностью. Рассмотрим тепловую инерционность тонких плоских термопар. Разница

¹ А. А. Зен и н. Изучение распределения температуры при горении конденсированных веществ. Диссертация, Москва, 1962.

в температуре термопары и прилегающего конденсированного вещества, находящихся в зоне прогрева, может быть вызвана только большей объемной теплоемкостью термопары. Задача прогрева термопары в конденсированной фазе при некоторых упрощающих предположениях рассмотрена ранее ¹. Решение для максимальной относительной ошибки имеет вид

$$\frac{T_2 - T_0}{T_s - T_0} = 1 - \frac{2}{1 - q} \frac{u_2 h q}{\sqrt{\pi a_2 a_3}} \left(i - \frac{c_3 \rho_3}{c_2 \rho_2} \right)$$

где

$$q = \frac{1 - \delta}{1 + \delta}, \quad \delta = \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \sqrt{\frac{a_2}{a_3}}$$

В табл. 2 приведены величины максимальной относительной ошибки в температуре за счет тепловой инерционности термопар, подсчитанные по этому уравнению в зависимости от скорости горения пороха Н.

Таблица 2

Относительные ошибки в температуре растут пропорционально толщине термопары и скорости горения. По абсолютной величине относительные ошибки за счет тепловой инерционности в конденсированной фазе значительно меньше, чем в газовой.

h	u ₂ , см/сек			
	0.2	0.5	1.0	1.5
7μ	0.8%	2%	4%	6%
3.5μ	0.3%	0.8%	1.6%	2.4%

При оценке потерь тепла в концы термопар воспользуемся тепловым моделированием. Общее число параметров, определяющих теплообмен термопары и конденсированной фазы, равно шести: температуропроводность вещества ($a_3 \text{ см}^2 / \text{сек}$) и термопары ($a_2 \text{ см}^2 / \text{сек}$), их объемные теплоемкости ($c_3 \rho_3 \text{ кал} / \text{см}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $c_2 \rho_2 \text{ кал} / \text{см}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$), толщина термопары $h \text{ см}$ и величина плеча $l \text{ см}$. Из этих величин три независимые: $c_3 \rho_3$ (или $c_2 \rho_2$), a_3 (или a_2) и l (или h).

По II-теореме теории подобия искомая функция (в нашем случае безразмерная температура термоспая) должна зависеть от трех безразмерных критериев

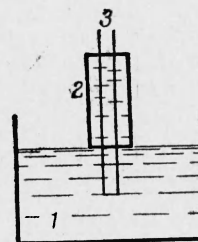
$$\frac{c_3 \rho_3}{c_2 \rho_2}, \quad \frac{a_3}{a_2}, \quad \frac{l}{h}$$

Так как в модельных опытах употреблялись вещества с теми же термическими коэффициентами, то целью было отыскание вида функции F

$$\frac{T_2}{T_s} = F \left(\frac{l}{h} \right)$$

где T_2 — температура спая, T_s — температура среды (поверхности).

Фиг. 3. Схема опытов по определению тепловых потерь в концы термопар в конденсированной фазе: 1 — нагретый глицерин, 2 — стакан, 3 — термопара



Точно воспроизвести условия прогрева термопар в конденсированном веществе при горении очень трудно, поэтому для упрощения считалось, что в нагретой зоне находится лишь плечо термопары. В реальных условиях часть концов, непосредственно прилегающих к плечу, находится в нагретой зоне, поэтому модельные опыты дадут верхнюю оценку по теплотерям. Это упрощение приводит к независимости результатов от режима горения (например, скорости) и по существу учитывалось нами, когда скорость в числе определяющих параметров не рассматривалась. Таким образом, рассматривается стационарная часть сложной задачи теплообмена (тепловая инерционность учтена раньше), поэтому принятая схема экспериментов (постоянная температура нагретой среды) допустима.

Для опытов использовались ленточные модельные термопары медь-константан следующих размеров: $h = 0.05 \text{ мм}$, 0.5 мм , 0.7 мм , 2.0 мм , и марганец-константан $h = 0.2 \text{ мм}$, 0.6 мм , 1.2 мм . В качестве среды был взят глицерин, близкий по своим термическим свойствам ко многим конденсированным веществам (в том числе и пороку Н). Модельная термопара заделывалась в плексигласовый стакан, в котором находился глицерин при температуре -50°C , после чего часть термопары, выступающая из дна стакана, погружалась в глицерин, нагретый до 250°C . Термопары могли выдвигаться из дна стакана. Процесс прогрева термопары записывался на потенцио-

метре ЭПП-09 (фиг.3). Целью измерений было определение установившихся температур термоспая. Температурный перепад всюду был 300°C . Результаты опытов представлены на фиг. 4 и 5, из которых видно, что имеет место значительное занижение температуры среды при малых величинах плеча, особенно резко проявляющееся у более теплопроводной термопары медь-константан.

Результаты можно описать формулами]

$$\frac{T_2}{T_s - T_0} = 0.008 \left(\frac{l}{h}\right)^2 \text{ для фиг. 4}$$

$$\frac{T_2}{T_s - T_0} = 0.320 \left(\frac{l}{h}\right)^{2.1} \text{ для фиг. 5}$$

Опыты с термопарами указанных двух типов отличаются теплопроводностью термопар, поэтому результаты можно объединить, если учесть коэффициент теплопроводности (правда, необходимо иметь в виду, что λ_2 изменялось только у одного электрода, поэтому формула ориентировочна)

$$\frac{T_2 - T_0}{T_s - T_0} = \frac{1}{1 + 135 \lambda_2^{4/3} (h/l)^2}$$

Если задаться относительной ошибкой в 2% , то получим следующую формулу для величины плеча термопары

$$l = 200h \sqrt[3]{\lambda_2^2} \quad (l \text{ см, } h \text{ см, } \lambda_2 \text{ кал / см}\cdot\text{сек}\cdot\text{град})$$

В качестве примера укажем, что при $h = 5 \mu$ для меди $1/2l = 80 \mu$, для вольфрама и рения $1/2l = 200 \mu$.

Итак, вследствие больших потерь тепла в концы, необходимость П-образной формы термопары очевидна. Однако у термопары такой формы есть возможность прогиба средней части плеча под действием газового потока, особенно в первый момент выхода в газовую фазу. Покажем, что можно так выбрать величину плеча, что при полученных ранее его размерах (из соображений малости теплопотерь в концы) прогиб плеча мал.

Верхняя оценка динамического прогиба в центре плеча, т. е. в месте термоспая в предположении шарнирного соединения концов плеча с концами термопары (очевидно, жесткое соединение препятствует прогибу плеча) возможна по формуле (см. [4])

$$H = \frac{5}{192} \frac{pbl^4}{EI} \quad \left(p = \frac{64}{\pi R} \frac{\rho_1 u_1^2}{2}, R = \frac{\rho_1 u_1 l}{\mu_1} \right)$$

где H — величина прогиба, E — модуль Юнга, I — момент инерции и p — аэродинамическое давление [5], R — число Рейнольдса для плеча. Взяв соотношение $b = 20l$, можно найти связь h и l при смещении центральной части термопары, равному толщине термопары ($H = h$).

Получим уравнение

$$h^5 = 0.05 (u_1 / E) \mu_1 l^4,$$

где μ_1 — вязкость газа, или для условий горения пороха H (давление $5 \div 150 \text{ ат}$),

$$l^4 = 10^{13} \div 10^{14} h^5.$$

Нетрудно убедиться, что противоположные требования небольших теплопотерь в концы термопары и достаточной ее жесткости совместимы как для газовой, так и для конденсированной фаз, что и допускает применение П-образных термопар.

Заметим, что величины l в табл. 1 выбраны так, чтобы удовлетворить требованиям жесткости и малости теплопотерь в концы.

Сравнивая требования, предъявляемые к термопарам для безошибочной записи распределения температуры в газовой и конденсированной фазах, приходим к выводу,



Фиг. 4. Занижение температуры термопарой медь-константан из-за теплопотерь в концы в зависимости от безразмерной глубины погружения: 1 — $h = 0.05 \text{ мм}$, 2 — $h = 0.5 \text{ мм}$, 3 — $h = 0.7 \text{ мм}$, 4 — $h = 2.0 \text{ мм}$



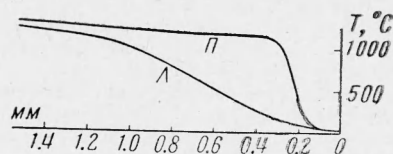
Фиг. 5. Занижение температуры термопарой манганин-константан из-за теплопотерь в концы в зависимости от безразмерной глубины погружения: 1 — $h = 0.2 \text{ мм}$, 2 — $h = 0.6 \text{ мм}$, 3 — $h = 1.2 \text{ мм}$

что требования в газовой фазе более жесткие и, если они выполнены, распределения температуры в конденсированной фазе будут также безошибочными.

Отсутствие влияния тепловых потерь в концы термопар на их показания в конденсированной и газовой фазах для выбранных величин плеча проверялось экспериментально с помощью М-образных термопар, у которых теплопотери в концы изменяют знак. Поэтому, если теплопотери влияют, то температурные профили, полученные этими термопарами и обычными П-образными, должны различаться. Опыты показали, что в пределах обычного разброса различия не наблюдается.

Экспериментально наблюдалось также влияние отсутствия плеча у термопары посредством сравнения профилей температур, полученных обычными П-образными термопарами и термопарами углом. На фиг. 6 приведены типичные записи этими двумя

Фиг. 6. Профили температуры Н-пороха при давлении 20 ат, полученные термопарами Φ 30 μ различной формы (П-образной и «углом»)



видами термопар (порох Н, давление 20 ат, термопары Φ 30 μ), хорошо иллюстрирующие сильное искажение распределения температуры из-за теплопотерь в концы у термопар углом.

Примерно такое же занижение градиента температуры можно получить расчетным путем, изложенным в настоящей работе.

Необходимо иметь в виду, что искажение профиля температуры, полученного термопарами, заклеенными углом, будет связано также с нарушением одномерности процесса горения пороха (в частности, со вспучиванием поверхности пороха при выходе термопары в газовую фазу, поскольку слой конденсированного вещества, прилегающий к термоспаю, начнет разлагаться только тогда, когда температура термоспая будет близка к температуре поверхности).

В заключение укажем на получение температурных профилей при помощи термопар, покрытых тонким слоем буры. Для нитроглицеринового пороха Н профили температуры, полученные этими термопарами ($h = 3,5 \mu$, слой буры $\sim 3 \mu$), до $\sim 1400^\circ \text{C}$ (температура кипения буры) находятся в пределах обычного разброса экспериментальных данных, что указывает на отсутствие заметного каталитического эффекта у наших термопар.

Автор благодарит А. А. Ковальского за постановку работы и ценные замечания при обсуждении результатов.

Поступила 15 IV 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Klein R., Mentser M., Elbe G., Lewis B. Determination of the Thermal Structure of a Combustion Wave by Fine Thermocouples. J. Phys. Chem., 1950, vol. 54, No 4, p. 877.
2. Heller C. A., Gordon A. S. Structure of the Gas Phase Combustion Region of a Solid Double Bas Propellant. J. Phys. Chem., 1955, vol. 59, No 3, p. 773.
3. Зенин А. А. Об ошибках термопар, проходящих через пламя. Инж. физ. ж., 1962, № 5.
4. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. Физматгиз, 1962.
5. Александров В. Л. Техническая гидродинамика. Гостехиздат, М.—Л., 1946.