

В. Н. Александров, Б. Д. Диновецкий, П. О. Сафронов,
С. А. Скупко

ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ПРИ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

Ключевые слова: манометрическая бомба, тепловые потери, стержневая термопара.

Приведена методика и результаты экспериментального определения тепловых потерь с помощью стержневых термопар. Приведены результаты определения тепловых потерь в манометрических бомбах, свободный объем которых 27 и 1500 см³. При плотностях заряжания 0,10 и 0,25 г/см³ сжигались пороха НДТ-3 18/1 Тр и ПП 14/7.

Keywords: manometric bomb, heat losses, rod thermocouple.

The method and the results of the experimental determination of heat loss through core thermocouples. The results of the determination of heat loss in a manometric bomb, free volume is 27 and 1500 cm³. Loading densities 0.10 and 0.25 g/cm³ were burnt gunpowder NDT-3 18/1 troy and PP 14/7.

Решение ряда задач внутренней баллистики ствольных систем, в частности экспериментальное определение баллистических характеристик разрабатываемых порохов, связано с необходимостью учёта тепловых потерь в стенки конструкций. Определение тепловых потерь в нестационарных условиях теплообмена необходимо при изучении [1,2,3,4]. В статье приведены методика и результаты экспериментального определения тепловых потерь при сжигании порохов в сосудах постоянного объёма, манометрических бомбах. (МБ)

Известна методика экспериментального определения силы пороха и коволюма пороховых газов по результатам сжигания пороха в условиях МБ. Тепловые потери при этом определяются по методу Мюраура [5]. Последнее время предлагаются методики определения зависимости скорости горения пороха от давления по кривым давление-время, получаемых при манометрических испытаниях, учитывающие тепловые потери расчётными методами [3, 4].

В проведённых нами исследованиях тепловые потери определялись экспериментально с помощью стержневых термопар, которые устанавливались заподлицо с внутренней поверхностью МБ. Схематический чертеж стержневой термопары приведён на рис. 1.

Никелевая проволока, расположенная в центре стержня термопары, в процессе теплообмена вносит искажение в профиль распределения температуры, что приводит к погрешности при определении величины плотности теплового потока. Эта погрешность обусловлена различием теплофизических характеристик термоэлектродов. В связи с этим были проведены сравнительные определения плотности теплового потока в одинаковых условиях стержневой термопарой и микрокалориметром [6].

Эксперименты проводились на лучевой установке [6,7], площадь равномерного облучения которой 45х62 мм, максимальная плотность теплового потока $q=1260$ кДж/м²·с. Торцевые поверхности стержневой термопары и микрокалориметра, воспринимающие тепловой поток, покрывались тонким слоем ламповой сажи, что позволило изба-

виться от эффекта прозрачности, увеличить коэффициент поглощения облучаемой поверхности до 0,98 и принять его одинаковыми значениями для указанных поверхностей. Микрокалориметр и стержневая термопара закреплялись в специальном держателе так, чтобы их торцевые поверхности, воспринимающие излучение, находились на одинаковом расстоянии от излучателя.

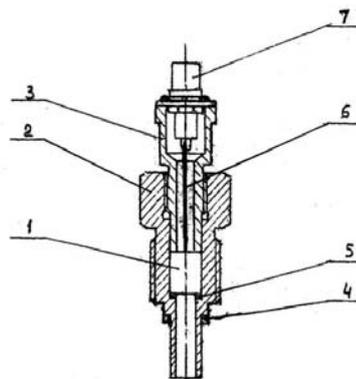


Рис. 1 - Стержневая термопара: 1-стержень; 2-корпус; 3-упор; 4, 5-прокладки; 6-проводник тока; 7-штепсельный разъем

При подводе тепла к торцу стержневой термопары исходной информацией является зависимость изменения температуры поверхности её торца во времени. В проводимых экспериментах эта зависимость с достаточной точностью описывается полиномом вида

$$T(0, t) - T_0 = b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4$$

Ниже приведено решение уравнения теплопроводности относительно плотности теплового потока для неограниченного тела при граничных условиях первого рода.

$$q = 2\lambda \sqrt{\frac{t}{\alpha\pi}} \left(b_1 + \frac{4b_2 t}{3} + \frac{8b_3 t^2}{5} + \frac{64b_4 t^3}{35} \right),$$

где α - коэффициент температуропроводности материала стержня термопары.

Результаты определения среднеинтегральных, за время облучения, значений плотностей тепловых потоков микрокалориметром \bar{q}_M и стержневой термопарой \bar{q}_T для восьми экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Величины среднеинтегральных тепловых потоков, определённые методами микрокалориметра- \bar{q}_M и стержневой термопары- \bar{q}_T

№ п/п	\bar{q}_M , кДж/м ² с	\bar{q}_T , кДж/м ² с	$\kappa = \bar{q}_M / \bar{q}_T$
1	983,1	867,1	1,13
2	983,1	877,8	1,12
3	972,6	884,9	1,10
4	988,6	882,0	1,12
5	977,9	859,0	1,14
6	972,6	855,7	1,14
7	967,3	898,2	1,08
8	958,0	912,4	1,05

Таким образом среднее значение поправочного коэффициента для стержневой термопары $\kappa=1,11 \pm 0,03$. Это значение поправочного коэффициента было использовано в дальнейших исследованиях при определении тепловых потерь в МБ с помощью стержневой термопары. Отметим, что согласно [8] расчётное значение инерционности стержневой термопары, при толщине никелевого покрытия стержня 3-5 мкм, равно $\sim 0,01$ с.

Эксперименты по определению тепловых потерь проводились в МБ, свободный объём которых $V_0=27$ и 1500 см³, внутренний диаметр 2,4 и 9 см, длина 6 и 23,6 см соответственно. Конструкция меньшей МБ позволяла размещать стержневые термопары по одной в торцевой и боковой поверхностях, конструкция большей - одну в торцевой и три равномерно по длине боковой поверхности.

При различных плотностях заряжания испытывались баллиститный 18/1 Тр и пироксилиновый 14/7 пороха. Расчётное максимальное давление воспламенителя (ДРП-2) - 5 МПа. При каждой плотности заряжания проводилось по пять параллельных испытаний, в каждом измерялись изменения во времени температуры поверхности стержневой термопары - $T(t)$ и давления в МБ - $p(t)$. Момент окончания горения пороха определялся по максимуму давления на кривой $p(t)$.

Результаты в виде кривых изменения плотности теплового потока во времени к торцевой поверхности $q_T(t)$ для баллиститного пороха 18/1 Тр, испытанного в МБ $V_0=27$ см³, приведены на рис. 2.

Среднеинтегральные значения плотностей тепловых потоков за время горения порохов к торцевой и боковой поверхностям \bar{q}_T и \bar{q}_B в МБ $V_0=27$ и 1500 см³ приведены в таблице 2.

Полученные значения \bar{q}_T и \bar{q}_B различны. Отношения \bar{q}_T / \bar{q}_B для ПП 14/7 находятся в пределах 1,4÷1,5, для БП 18/1 Тр - в пределах 1,8÷2,1 для МБ $V_0=27$ см³ и 1,1÷1,2 для МБ $V_0=1500$ см³. Ука-

занные различия возможно связаны с ориентацией пороховых элементов в МБ и особенностями горения порохов с узкими каналами. Это предположение подтверждает то, что с увеличением плотности заряжания и увеличением свободного объёма МБ величина отношений \bar{q}_T / \bar{q}_B уменьшается.

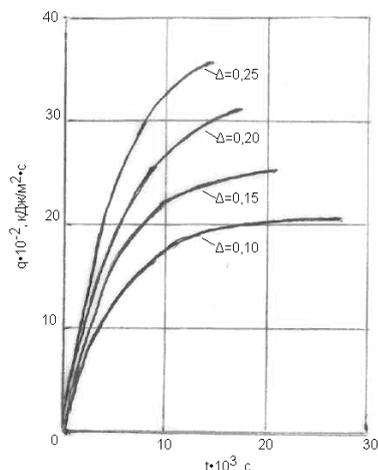


Рис. 2 - Зависимости q_T-t для баллиститного пороха 18/1 Тр в манометрической бомбе $V_0=27$ см³

Таблица 2 - Результаты испытаний по определению тепловых потерь при горении порохов в манометрических бомбах

Марка пороха	V, см ³	Δ, г/см ³	$\bar{q}_T \cdot 10^{-1}$, кДж/м ² с	$\bar{q}_B \cdot 10^{-1}$, кДж/м ² с	$Q_{пот} \cdot 10^{-1}$, кДж	$\frac{Q_{пот}}{m_1 Q_{вж}}$, %	$\frac{\Delta P_m}{P_m}$, %
НДТ-3 18/1 Тр	27	0,10	1692	825	147,0	16,25	15,3
		0,15	2052	1043	139,4	10,27	9,6
		0,20	2378	1210	130,2	7,18	6,5
		0,25	2562	1403	122,7	5,42	4,9
	1500	0,10	1403	1202	2734	5,44	4,8
		0,15	1574	1315	2283	3,03	2,6
		0,20	1620	1495	2057	2,05	1,7
ПП 14/7	27	0,15	1926	1281	210,2	14,58	7,6
		0,25	2345	1645	152,0	6,33	4,5

Определение плотности тепловых потоков в трёх сечениях, равномерно расположенных по длине МБ $V_0=1500$ см³, показало, что различия полученных величин незначительно.

В таблице 2 приведены значения: тепловых потерь $Q_{пот} = \bar{q}_B \cdot S_B + 2\bar{q}_T \cdot S_T$, где S_B и S_T площади боковых и торцевых поверхностей МБ; отношений тепловых потерь к энергии, выделившейся при горении навески пороха $Q_{п} / m_1 \cdot Q_{вж}$; отношение $\Delta P_m / P_m$, которые рассчитаны по методике, приведенной в [5] и определяют тепловые потери в МБ.

На рис. 3 приведены зависимости $Q_{\text{п}}/m_1 \cdot Q_{\text{вж}}$ и $\Delta P_{\text{м}}/P_{\text{м}}$ от плотности заряжания.

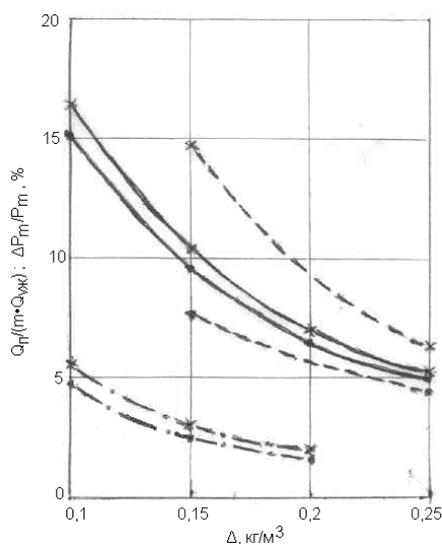


Рис. 3. - Зависимости $Q_{\text{п}}/m_1 \cdot Q_{\text{вж}}$ и $\Delta P_{\text{м}}/P_{\text{м}}$ от плотности заряжания:

• $\Delta P_{\text{м}}/P_{\text{м}}$;

х $Q_{\text{п}}/m_1 \cdot Q_{\text{вж}}$;

БП 18/1 Tr., $V_0=27 \text{ см}^3$;

БП 18/1 Tr., $V_0=1500 \text{ см}^3$;

ПП 14/7, $V_0=27 \text{ см}^3$.

Для БП 18/1 Tr характер зависимостей тепловых потерь от плотности заряжания в МБ $V_0=27$ и 1500 см^3 , определённых экспериментально и по методу Мюраура, одинаков, по величине значения первых тепловых потерь больше вторых на 6-17 %.

Для ПП 14/7 значения первых больше вторых на 29-48%, что указывает на неприменимость метода Мюраура для определения тепловых потерь в МБ при испытаниях многоканальных порохов.

Отметим что, согласно полученным в настоящем исследовании экспериментальным результатам, значения величины тепловых потерь, определённых расчётным методом [4], завышены примерно в два раза.

Литература

1. П.О. Сафронов, Б.Д. Диновецкий, Ю.М. Филиппов, В.Н. Александров, А.В. Косточко. Вестник Казанского технологического университета, Спец. выпуск, 85-90 (2009).
2. В.Н. Александров, Б.Д. Диновецкий, А.В. Косточко. Вестник Казанского технологического университета, 13,10, 104-113 (2010).
3. Ю.П. Хоменко, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов. Математическое моделирование внутрeбаллистических процессов в ствольных системах. изд. СОРАН, Новосибирск, 1999. 255 с.
4. Ю.П. Хоменко, В.М. Широков, Физика горения и взрыва, 42, 2, 29-38 (2006).
5. М.Е. Серебряков. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. Оборонгиз, Москва, 1962. 703 с.
6. Р.Ш. Еналеев, В.А. Матеосов, К.И. Синаев, Б.Д. Диновецкий, Р.Ш. Гайнутдинов. Физика горения и методы её исследования. ЧГУ, 3, (1973)
7. Р.Ш. Гайнутдинов, Р.Ш. Еналеев, В.И. Аверко-Антонович. В кн. Горение и взрыв. Наука, Москва, 1972.
8. А. А. Зенин. ЖПМТФ, 15, 15-25 (1963).

© В. Н. Александров - к.т.н, доцент кафедры химии и технологии высокомолекулярных соединений КНИТУ, labgor@kstu.ru; Б. Д. Диновецкий - д.т.н., профессор той же кафедры, labgor@kstu.ru; П. О. Сафронов – к.т.н, доцент той же кафедры, labgor@kstu.ru, С. А. Скупко – м.н.с. той же кафедры, labgor@kstu.ru.