

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 избавиться 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. Ниже приведено решение уравнения теплопроводности относительно плотности теплового потока для неограниченного тела при граничных условиях первого рода, где α коэффициент температуропроводности материала стержня термопары.

Результаты определения среднеинтегральных, за время облучения, значений плотностей тепловых потоков микрокалориметром и стержневой термопарой для восьми экспериментов приведены в таблице 1. Таблица 1 - Величины среднеинтегральных тепловых потоков, определённые методами микрокалориметра- и стержневой термопары- № п/п , кДж/м²с , кДж/м²с $\kappa =$ / 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 $\sim 0,01$ мс. 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 заряжения испытывались баллиститный 18/1 Тр и пироксилиновый 14/7 пороха. Расчётное максимальное давление воспламенителя (ДРП-2) - 5 МПа. При каждой плотности заряжения 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 (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 и в МБ $V_0 = 27$ и 1500 см³ приведены в таблице 2. Полученные значения и различны. Отношения /для ПП 14/7 находятся в пределах $1,4 \div 1,5$, для БП 18/1 Тр - в пределах $1,8 \div 2,1$ для МБ $V_0 = 27$ см³ и $1,1 \div 1,2$ для МБ $V_0 = 1500$ см³. Указанные различия возможно связаны с ориентацией пороховых элементов в МБ и особенностями горения порохов с узкими каналами. Это предположение подтверждает то, что с увеличением плотности заряжения и увеличением свободного объёма МБ величина отношений /уменьшается. Рис. 2 - Зависимости $-t$ 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_0 , см ³	Δ , г/см ³ • 10 ⁻¹	кДж/м ² с • 10 ⁻¹	кДж/м ² с $Q_{\text{пот}}$ • 10 ⁻¹	кДж	%	% НДТ-3
18/1 Тр	27	0,10	1692	825	147,0	16,25	15,3
14/7	27	0,15	2052	1043	139,4	10,27	9,6
18/1 Тр	1500	0,10	1403	1202	2734	5,44	4,8
14/7	1500	0,15	1574	1315	2283	3,03	2,6

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 $V_0=1500 \text{ см}^3$, показало, что различия полученных величин незначительно. В таблице 2 приведены значения: тепловых потерь, где S_b и S_t площади боковых и торцевых поверхностей МБ; отношений тепловых потерь к энергии, выделившейся при горении навески пороха; отношения, которые рассчитаны по методике, приведённой в [5] и определяют тепловые потери в МБ. На рис. 3 приведены зависимости и от плотности заряжания. Рис. 3.

- Зависимости и от плотности заряжания: • ; х ; БП 18/1 Тр., $V_0=27 \text{ см}^3$; БП 18/1 Тр., $V_0=1500 \text{ см}^3$; ПП 14/7, $V_0=27 \text{ см}^3$. Для БП 18/1 Тр 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.