

УДК 533.6

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Ю. Ф. Христенко

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики при Томском государственном университете, 634050 Томск

Предложены методы повышения живучести легкогазовых установок, включающие новые конструктивные решения и нетрадиционные режимы выстрела. Теоретически и экспериментально установлено, что уменьшение угла раствора конического переходника до $2,5\text{--}3^\circ$ позволяет увеличить живучесть камеры высокого давления в несколько раз. Предложена конструкция составного поршня с жидким или гелеобразным наполнителем. Обоснован и экспериментально отработан режим выстрела из легкогазовой установки со сверхлегкими поршнями и без использования диафрагмы. Для предотвращения абляции канала легкогазовой установки предложена конструкция конического и измерительного переходников с лейнерами из термоизносостойких сплавов.

Двухступенчатые легкогазовые установки (ЛГУ) широко используются в аэробаллистических исследованиях и при изучении процессов высокоскоростного взаимодействия в диапазоне скоростей $2,5 \div 10,0$ км/с [1, 2]. В последнее время ЛГУ применяются в качестве предускорителей в комбинированных схемах метания, предназначенных для получения скоростей до 16 км/с [3]. Анализ экспериментов при скоростях метания более 8 км/с показал, что одной из основных проблем является живучесть ЛГУ [4–6]. В решении проблем высокоскоростного метания необходим компромисс при обеспечении наиболее высоких скоростей максимально тяжелого метаемого элемента (МЭ) и приемлемой живучести установки. При изучении живучести основных узлов и деталей ЛГУ с деформируемым поршнем установлено, что часто выходят из строя конический переходник и баллистический ствол. Причиной выхода из строя конического переходника является механическое разрушение (раздутие), даже если он выполнен скрепленным двухслойным или трехслойным [4], баллистического ствола — термическая эрозия его канала [6]. В данной работе предлагаются пути повышения живучести ЛГУ на предельных режимах работы. При этом используются новые конструктивные решения и нетрадиционные режимы работы ЛГУ.

Анализ результатов [4–6] по исследованию прочностных характеристик и живучести основных узлов ЛГУ показал, что определяющим фактором, влияющим на живучесть камеры высокого давления, являются напряжения, возникающие в пластическом поршне при его торможении в коническом участке камеры. С использованием методов оптимального проектирования ЛГУ [7] и экспериментальных исследований ЛГУ [4] показано, что с ростом массы поршня дульная скорость МЭ возрастает. Для увеличения массы поршня использовались свинцовые вкладыши, а также составные поршни с металлической и полиэтиленовой частью [7]. В экспериментах [5] металлическая часть заменялась фторопластовой.

В результате теоретического и экспериментального исследования процесса деформации пластического (полиэтиленового) поршня во время выстрела из ЛГУ получено, что

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-01-03010).

Таблица 1

Параметр выстрела	Вариант расчета								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Порох	6/7	6/7	6/7	6/7	6/7	ВТ	ВТ	ВТ	ВТ
q , г	0,8	0,5	0,5	0,8	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3
ω , г	200	200	205	205	202	170	170	170	175
p_0 , МПа	1,2	1,2	1,1	1,25	1,1	0,8	0,7	0,6	0,5
$M_{\text{п}}$, г	225	225	135	205	175	30	30	25	25
$p_{\text{к,мак}}$, МПа	192	192	131	183	155	152	151	145	156
$p_{\text{п,мак}}$, МПа	3013	3124	2508	2893	2706	1080	1172	1054	1217
$p_{\text{г,мак}}$, МПа	1716	1708	1403	1541	1426	992	1068	940	1128
$T_{\text{г,мак}}$, К	2415	2396	2349	2346	2368	2693	2875	2902	3253
$p_{\text{МЭ,мак}}$, МПа	486	334	328	479	335	395	449	339	309
$U_{\text{МЭ}}$, км/с	7,99	7,64	8,08	8,05	8,16	8,25	8,61	8,66	9,71
$p_{\text{ф}}$, МПа	30	30	70	30	30	1	1	1	1
l , мм	185	185	185	370	370	370	370	370	370

максимальные напряжения в поршне и на внутренней поверхности конической части канала ЛГУ существенно зависят от длины конического участка (угла конусности). При этом с уменьшением угла конусности уменьшаются максимальные нагрузки в канале камеры высокого давления. Кроме того, внутриваллистические расчеты ЛГУ [7] показали, что с уменьшением угла конусности можно получить ту же дульную скорость при меньших максимальных давлениях на дно поддона МЭ.

В табл. 1 представлены расчетные данные основных параметров выстрела для различных условий заряжания для ЛГУ-2 [4] (q — масса метаемой сборки, ω — масса порохового заряда, p_0 — начальное давление легкого газа (водорода), $M_{\text{п}}$ — масса поршня, $p_{\text{к,мак}}$ — максимальное давление в пороховой камере, $p_{\text{п,мак}}$ — максимальное напряжение в поршне, $p_{\text{г,мак}}$ — максимальное давление легкого газа, $T_{\text{г,мак}}$ — максимальная температура легкого газа, $p_{\text{МЭ,мак}}$ — максимальное давление на дно поддона метаемого элемента, $U_{\text{МЭ}}$ — дульная скорость метаемого элемента, $p_{\text{ф}}$ — давление форсирования, l — длина конуса).

Варианты расчета 1–3 соответствуют экспериментальным данным, полученным на ЛГУ с длиной конического участка 185 мм, варианты 4–9 — с гипотетической камерой высокого давления, в которой длина конического участка увеличена вдвое и составляет 370 мм. Из сравнения результатов расчетов для вариантов 1, 2, 4, 5 следует, что при использовании более длинного переходника можно получать те же скорости при существенно меньших (до 30 %) максимальных давлениях легкого газа, напряжениях в поршне и максимальных давлениях на дно поддона МЭ. Это характерно для “легких” метаемых элементов с относительной массой $C_q \leq 1$ г/см³ ($C_q = q/d^3$, d — калибр ствола). Указанные обстоятельства учтены при разработке унифицированного комплекса экспериментальных баллистических установок ПХ (Т-110) [8]. Так, входящая в этот комплекс ЛГУ ППХ23/8 имеет поршневой ствол калибра $D = 23$ мм, баллистический ствол калибра 8 мм, длина конического участка камеры высокого давления составляет 300 мм, угол конусности равен 2,85°. В ЛГУ, описанных в работах [4–6], угол конусности составляет 8° и более. Изготовление камеры высокого давления с более длинным коническим участком для ЛГУ малого калибра связано со значительными технологическими трудностями, поэтому при разработке входящей в комплекс Т-110 ЛГУ ППХ34/23/8 с баллистическим стволом калибра 8 мм и поршневым стволом калибра 34 мм использована камера высокого давления,

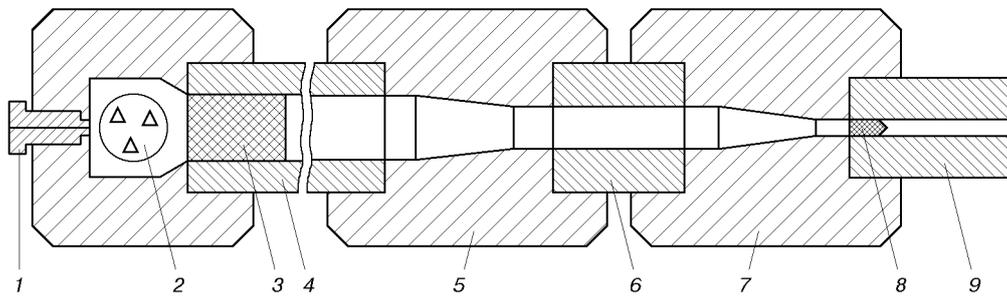


Рис. 1. Схема легкогазовой установки с составным коническим переходником:
 1 — запальная пробка, 2 — пороховая камера, 3 — поршень, 4 — камера сжатия, 5 — первая секция конического переходника, 6 — цилиндрическая вставка, 7 — вторая секция конического переходника, 8 — метаемый элемент, 9 — ствол

состоящая из двух конических переходников и цилиндрической вставки калибра 23 мм (рис. 1).

Другой возможностью уменьшения напряжений в поршне при движении его в коническом переходнике является изменение конструкции и материала поршня. Действительно, потери на деформацию и трение поршня, помимо уменьшения живучести, приводят к уменьшению скорости метания в ЛГУ. Известно, что при скоростях деформации, характерных для ЛГУ с легким поршнем, динамический предел текучести полиэтилена существенно возрастает. Это приводит к тому, что поршень сохраняет свою первоначальную форму при давлениях, во много раз превышающих предел текучести полиэтилена ($15 \div 20$ МПа) [9, 10].

На рис. 2 приведена предложенная автором данной работы конструкция поршня, состоящего из двух обтюраторов, выполненных из полиэтилена, и жидкого или гелеобразного наполнителя, заполняющего пространство между ними. В качестве наполнителя может быть использована испаряющаяся жидкость (эфир, спирт) или термостойкий смазочный материал, например пушечное сало. Потери на деформацию и трение такого поршня намного ниже, чем у монолитного поршня из полиэтилена, что увеличивает живучесть ЛГУ и скорость метания.

Результаты исследований были учтены при конструировании ЛГУ ППХ23/8, что позволило обеспечить живучесть камеры высокого давления свыше 100 выстрелов при режимах эксплуатации, реализующих скорость метания более 8 км/с. При таких режимах живучесть ствола составляет в среднем 20 выстрелов, после чего канал ствола восстанавливают повторным хонингованием, при этом калибр ствола увеличивается на 0,1–0,2 мм.

Из анализа данных, полученных в результате отработки ЛГУ-2 [4] и ЛГУ ППХ23/8, следует, что при использовании относительно тяжелого поршня дульная скорость МЭ

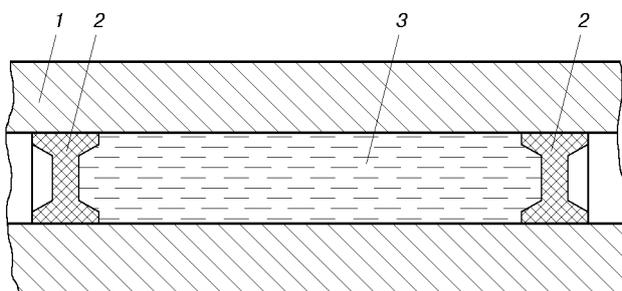


Рис. 2. Схема составного поршня:
 1 — камера сжатия, 2 — обтюраторы,
 3 — жидкий наполнитель

увеличивается незначительно при уменьшении его массы, а в некоторых случаях даже уменьшается. Это объясняется тем, что “легкий” МЭ “убегает” от поршня и влияние гидроэффекта [1] на дульную скорость МЭ становится слабым или отсутствует. Использование относительно тяжелых поршней предполагает обязательное применение диафрагмы с давлением прорыва порядка $60 \div 70$ МПа. В ЛГУ ППХ23/8 используется диафрагма из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 2 мм, которая прорывается при давлении порядка 200 МПа. В момент прорыва на МЭ действуют пиковые нагрузки, которые иногда приводят к разрушению поддона. Кроме того, при увеличении максимальной температуры легкого газа и появлении следов абляции на поверхности баллистического ствола максимальный унос металла происходит именно с поверхности диафрагмы. Таким образом, увеличение массы поршня приводит к уменьшению живучести камеры высокого давления.

В данной работе предпринята попытка поиска режимов метания для “легких” МЭ ($C_q \leq 1$ г/см³). Анализ результатов большой серии расчетов показал, что в этом случае наиболее приемлемыми являются режимы выстрела с легкими поршнями без использования диафрагмы. По сравнению с традиционными режимами метания [1, 4–6] основные особенности предлагаемых режимов состоят в следующем:

- на 10–20 % увеличивается навеска порохового заряда, используется более мелкий быстрогорящий порох (для ЛГУ-2 вместо пороха 6/7 используется порох 4/7 или ВТ);
- в 2–3 раза уменьшается масса поршня, его относительная масса $C_{qp} = M_{п}/D^3 \approx 1,5 \div 2,5$ г/см³, в то время как в экспериментах на ЛГУ ППХ23/8 использовались поршни с $C_{qp} \approx 4,5 \div 5,5$ г/см³ (в ЛГУ-2 применялись поршни с относительной массой $C_{qp} \approx 5 \div 8$ г/см³);
- в 1,5–2,5 раза уменьшается начальное давление легкого газа (с $1,2 \div 1,8$ до $0,3 \div 0,8$ МПа).

Экспериментальная проверка показала, что при использовании поддона из достаточно жесткого материала (фенилона, графиллона, поликарбоната) можно обеспечить давление форсирования МЭ, превышающее начальное давление легкого газа в камере сжатия, обеспечивая при этом герметизацию камеры сжатия во время заполнения ее легким газом. Это упрощает конструкцию узла форсирования (см. рис. 1).

Результаты расчета ЛГУ-2 в режиме выстрела с легким поршнем и без диафрагмы приведены в табл. 1 (варианты 6–9). Отсутствие диафрагмы моделировалось заданием давления форсирования $p_{ф} = 1$ МПа. Расчеты показали, что при изменении величины силы трения покоя в широком диапазоне параметры выстрела практически не меняются. Так, изменение $p_{ф}$ от 1 до 10 МПа существенно изменило только максимальное давление на дно поддона МЭ (на 5 %). Из результатов расчетов следует, что в этом случае дульная скорость порядка 8 км/с для МЭ массой 0,5 г может быть получена при максимальных давлениях легкого газа, не превышающих 1000 МПа, в то время как при использовании тяжелых поршней и диафрагмы максимальные давления составляли $1700 \div 2000$ МПа. Соответственно уменьшаются и максимальные напряжения в поршне при торможении его в конусе. Для МЭ массой 0,3 и 0,4 г дульная скорость может быть увеличена до 9 км/с и более.

В табл. 2 приведены результаты расчетов ЛГУ ППХ23/8 в режиме выстрела с легким поршнем без использования диафрагмы. Расчеты проводились для пороха ВТ при массе МЭ $q = 0,3$ г и начальном давлении легкого газа $p_0 = 0,7$ МПа. Результаты расчетов показывают, что при таких режимах стрельбы на данной ЛГУ также могут быть достигнуты скорости порядка 9 км/с для МЭ массой $0,3 \div 0,5$ г при обеспечении приемлемой живучести основных узлов ЛГУ. На начальном этапе исследований использовалась программа расчета [11], а затем — программа расчета [7], в которой применялись модернизированный согласно [9] закон горения пороха и закон движения поршня [10].

Таблица 2

ω , г	$M_{п}$, г	$p_{к,маx}$, МПа	$p_{п,маx}$, МПа	$T_{г,маx}$, К	$p_{МЭ,маx}$, МПа	$U_{МЭ}$, км/с
55	25	151	727	3633	275	8,29
60	23	186	864	4040	331	8,84
60	25	191	940	4218	355	9,05
60	28	199	1041	4442	389	9,32
65	23	236	1081	4617	419	9,58

Предложенный выше режим выстрела без диафрагмы экспериментально отработывался на ЛГУ ППХ23/8. Результаты отладочной серии экспериментов приведены в табл. 3 ($l_{ст}$ — длина баллистического ствола) и подтверждают работоспособность ЛГУ при таком варианте выстрела и возможность получения скоростей порядка 7 км/с в безопасном для установки режиме. Падение скорости в опыте 80 объясняется прорывом легкого газа через стыковочный узел. В связи с этим стыковочный узел был изменен, плоское уплотнительное кольцо из нержавеющей стали 12Х18Н10Т заменено на упругое уплотнительное кольцо из бериллиевой бронзы (рис. 3). Обтюрирующее кольцо изготавливается таким образом, чтобы его высота на 0,3 мм превышала высоту уступа на стволе, в который упирается кольцо. В этом случае кольцо после соединения ствола с коническим переходником находится в сжатом состоянии и при перемещении ствола во время выстрела относительно конического переходника отслеживает эти перемещения, обеспечивая обтюрацию узла форсирования. Кроме того, на внутренней поверхности кольца имеется коническая проточка, попадая в которую, прорвавшийся легкий газ распирает кольцо и обеспечивает дополнительную самообтюрацию по принципу “чечевичного” уплотнения. Последующие опыты подтвердили надежность обтюрации такого стыковочного узла, причем одно кольцо можно использовать несколько раз.

В отладочной серии опытов не были достигнуты расчетные скорости метания (8–9 км/с), что потребовало дальнейших исследований основных закономерностей процесса выстрела и проверки адекватности физико-математических моделей, используемых при расчетах [9, 10].

Одной из причин уменьшения скорости метания в описанных выше экспериментах может являться абляция внутренней поверхности канала конического переходника и ствола, приводящая к засорению легкого газа частицами металла. Расчеты [6, 12] показывают,

Таблица 3

Номер опыта	q , г	ω , г	$M_{п}$, г	p_0 , МПа	$l_{ст}$, м	$U_{МЭ}$, км/с
78	0,40	50	20	0,9	2,11	6,32
79	0,39	53	20	0,9	2,11	6,50
80	0,41	58	20	0,9	2,11	5,68
81	0,35	58	20	0,9	2,11	6,88
82	0,35	63	20	0,11	2,11	6,75
83	0,29	63	20	0,11	2,11	6,93
84	0,29	63	19	0,11	2,11	6,98
85	0,32	66	23	0,12	2,11	6,91
86	0,29	66	18,5	0,11	2,47	7,18

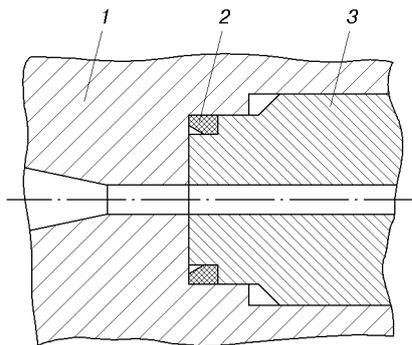


Рис. 3. Схема стыковочного узла:

1 — конический переходник, 2 — упругое обтюрирующее кольцо, 3 — ствол

что температура поверхности канала конического переходника ЛГУ может превышать температуру плавления стали.

Известны различные способы нанесения термоизносостойких покрытий на термонапряженные участки канала ЛГУ. В частности, технологии газофазного осаждения вольфрама [13] и хромирования. Однако в настоящее время полностью отработанной технологии нанесения защитных покрытий на термонапряженные участки канала ЛГУ не существует, особенно для ЛГУ малого калибра. В то же время расчеты [6, 12] показывают, что интенсивному нагреву и оплавлению подвергается только внутренняя поверхность лейнера конического переходника и начало ствола (участок длиной $20 \div 30$ калибров). Поэтому лейнеры конических переходников ЛГУ малого калибра предлагается изготавливать из сплавов с такими свойствами, которые обеспечивали бы необходимую прочность конического переходника и не допускали оплавления внутренней поверхности канала лейнера.

В модельной установке [9] для определения давления и времени раскрытия диафрагмы использован измерительный переходник, который устанавливался между коническим переходником и измерительной пробкой. В дальнейшем такие переходники использовались и в процессе выстрела. Экспериментально установлено, что при этом уменьшение скорости метания составляет порядка 1%. Если в такой переходник вставить лейнер из термостойкого сплава, это предотвратит абляцию ствола или в значительной степени ее уменьшит. Одним из термостойких сплавов является сплав W-Ni-Fe. По прочностным свойствам некоторые из них не уступают лучшим оружейным сталям. При этом коэффициент теплопроводности у сплава W-Ni-Fe в несколько раз больше, чем у стали, что способствует быстрому распространению тепла в тело лейнера и уменьшению температуры поверхностного слоя канала лейнера. Конструкция узла форсирования такой ЛГУ приведена на рис. 4.

Следует отметить, что абляция канала конического переходника и ствола не всегда приводит к уменьшению скорости МЭ, так как она начинается после того, как МЭ приобретает значительную скорость. Для исследования влияния засорения потока на скорость МЭ при расчете использовалась следующая процедура. В момент достижения температуры плавления стали из соответствующей точки расчетной области легкого газа вниз по потоку выпускается характеристика. Если характеристика догоняет МЭ во время его движения в стволе, то засорение потока влияет на дульную скорость МЭ. В противном случае абляция ствола не влияет на дульную скорость МЭ. Расчеты показали, что для “легких” МЭ в основном реализуется второй случай.

Можно предположить существование другого механизма эрозии канала ствола. Так, в работе [14] показано, что эрозия ствола может быть вызвана значительным уменьшением прочности стали при температурах существенно более низких, чем температура плавления. В этом случае эрозия ствола начинается намного раньше и засорение легкого газа приводит к уменьшению дульной скорости МЭ.

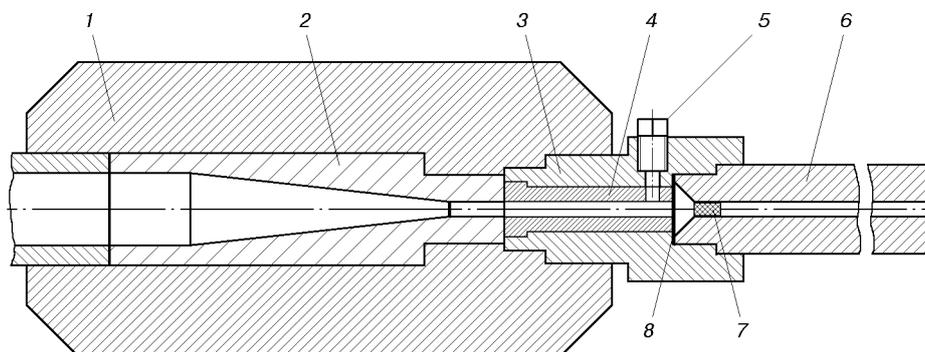


Рис. 4. Схема узла форсирования:

1 — конический переходник, 2 — лейнер конического переходника (W-Ni-Fe), 3 — измерительный переходник, 4 — лейнер измерительного переходника (W-Ni-Fe), 5 — датчик давления Т10000, 6 — ствол, 7 — метаемый элемент, 8 — диафрагма

Автор выражает благодарность М. С. Барышеву и Ю. П. Хоменко за полезные обсуждения и помощь в проведении экспериментов, а также В. В. Жаровцеву за предоставленную программу расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Златин Н. А., Красильщиков А. П., Мишин Г. И., Попов Н. Н.** Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Наука, 1974.
2. **Теоретические и экспериментальные исследования гиперзвуковых течений при обтекании тел и в следах:** Сб. ст. / Под ред. Г. Г. Черного, С. Ю. Чернявского. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979.
3. **Chhabildas L. C.** Hypervelocity impact phenomena // Metallurgical and materials applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena. Amsterdam etc.: Elsevier Sci. Publ., 1995. P. 245–256.
4. **Чернявский С. Ю., Попов Н. Н., Сибилев В. Ю. и др.** Легкогазовая баллистическая установка // Тр. Ин-та механики МГУ. 1975. № 39. С. 28–37.
5. **Longscope D. B.** Modeling of second stage of 1.125 inch two-stage light-gas gun STAR: Rep. / Albuquerque, USA, Sandia Nat. Lab.; May, 1993; SAND93-1320.
6. **Bogdanoff D. W.** CFD modeling of bore erosion in two-stage gas guns: Rep. / Moffett Field, USA, NASA Ames Res. Center; Aug., 1998; TM-112236.
7. **Жаровцев В. В., Комаровский Л. В., Погорелов Е. И.** Математическое моделирование и оптимальное проектирование баллистических установок. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989.
8. **Христенко Ю. Ф.** Проблема получения высоких скоростей ударников и моделей в лабораторных условиях // Докл. Всерос. конф. “Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики”, Томск, 2–4 июня 1998 г. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. С. 211, 212.
9. **Христенко Ю. Ф.** Экспериментальные исследования основных внутрибаллистических процессов легкогазовых установок // Избр. докл. Междунар. конф. “Всесибирские чтения по математике и механике”, Томск, 17 июня 1997 г. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1997. Т. 2. С. 114–122.
10. **Христенко Ю. Ф.** Экспериментальные методы исследования внутрибаллистических процессов // Материалы III Междунар. конф. “Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и в ствольных системах” (ICOC-99), Ижевск, 6 июля 1999 г. Ижевск: Изд-во УрО РАН, 2000. Ч. 1. С. 266–273.

11. **Хоменко Ю. П., Ищенко А. Н., Касимов В. З.** Математическое моделирование внутривальностических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
12. **Бубенчиков А. М.** Трение и теплообмен при неустановившемся турбулентном течении газа в канале // Числ. методы механики сплошной среды. 1986. Т. 17, № 5. С. 10–24.
13. **Ляхоткин Ю. В., Красовский А. И.** Вольфраморениевые покрытия. М.: Наука, 1989.
14. **Кузнецов Г. В., Рудзинский В. П.** Теплоэрозионная модель износа каналов ствольных систем // Материалы III Междунар. конф. “Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и в ствольных системах” (ICOS-99), Ижевск, 6 июля 1999 г. Ижевск: Изд-во УрО РАН, 2000. Ч. 1. С. 434–442.

Поступила в редакцию 4/IV 2000 г.
