

# ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 621.45.053.3:531.58

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТИВНОГО ТВЕРДОТӨПЛИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

**В.В. Кореньков, С.И. Лежнин, Н.В. Светогоров,  
В.В. Селиванов, С.В. Сергиенко**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: sm4-2009@mail.ru

*Описана схема ступенчатого тормозного устройства в регуляторе расхода для импульсных двигателей, обеспечивающего плавное регулирование критического сечения двигателя в зависимости от температурных условий применения. Проведено трехмерное численное моделирование процесса проникания элементов регулятора расхода в демпфирующую преграду. Показана возможность обеспечения стабилизации давления в двигателе с регулятором расхода за счет управляемой диссипации кинетической энергии его открытия под воздействием пороховых газов на заданном расстоянии.*

**Ключевые слова:** импульсный реактивный двигатель, авторегулирование критического сечения, диссипация кинетической энергии, ступенчатый демпфер, проникание ударника в преграду.

## SIMULATION OF THE KINETIC ENERGY DISSIPATION IN THE FLOW CONTROL VALVE OF A PULSED SOLID PROPELLANT JET

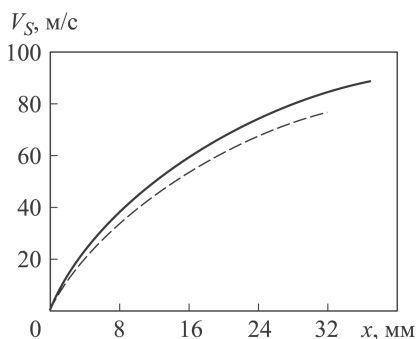
**V.V. Korenkov, S.I. Lezhnin, N.V. Svetogorov,  
V.V. Selivanov, S.V. Sergienko**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: sm4-2009@mail.ru

*The article describes the structure of a step brake device in the flow control for pulsed thrusters. The device provides a smooth control of the thruster throat section as a function of the operational temperature conditions. The authors performed a three-dimensional numerical simulation of penetration of the flow control valve elements into a damping barrier. The article shows that the pressure of the thruster with a flow control valve can be stabilized by means of the controlled dissipation of the opening kinetic energy driven by the propellant gases at a given distance.*

**Keywords:** detonation jet, automatic control of restricted section, kinetic energy dissipation, multistage damper, penetration of a striker into a barrier.

Эффективное применение гранатометных выстрелов как в обычном исполнении [1–4], так и нелетального действия [5–7] в антитеррористических и миротворческих операциях, а также иных операциях по правопринуждению в городах и густонаселенных районах требует безусловного обеспечения заданной точности попадания, которая во



**Рис. 1.** Скорость открытия ЦТ массой ~ 220 г при температурах  $-40^{\circ}\text{C}$  (штриховая кривая) и  $+50^{\circ}\text{C}$  (сплошная кривая)

тела (ЦТ), частично или полностью перекрывающего сопло камеры двигателя. При смещении ЦТ на заданное расстояние обеспечивается требуемое открытие сопла. Принцип авторегулирования подобной системы заключается в том, что степень открытия критического сечения зависит от интенсивности воздействия на поверхность ЦТ истекающих пороховых газов, которая, в свою очередь, зависит от давления в камере, чувствительного к начальной температуре метательного заряда.

Решение задачи определения нагрузок на поверхность ЦТ аппроксимацией численных расчетов проведено в работе [8]. Расчеты по методике [9], дополненной уравнениями движения ЦТ, позволили определить скорость открытия ЦТ  $V_S$  в зависимости от его смещения  $x$  (пример приведен на рис. 1).

Очевидно, что торможение ЦТ массой 200–300 г (в зависимости от конструктивного исполнения), разогнавшегося до скорости 65–100 м/с (см. рис. 1), в заданной точке относительно сопла камеры двигателя, т.е. при фиксированном перемещении из начального положения, не является тривиальной задачей. Обеспечить жесткое, дискретное торможение ЦТ даже для крайних режимов работы двигателя технически невозможно из-за возникающих ударных нагрузок, значительно превышающих прочностные свойства применяемых в двигателе материалов.

Альтернативой жесткому торможению является обеспечение диссипации кинетической энергии ЦТ в процессе проникания специальных деталей внутри ЦТ в подложку из мягкого пластичного материала. В этом случае кинетическая энергия ЦТ плавно диссипируется при деформировании “жертвенной” подложки, опертой на фланец прочной стальной детали. Чем меньше путь торможения, тем больше сила, действующая на преграду и неподвижные детали упора. Параметры преграды подбираются таким образом, чтобы процесс деформирования

многим определяется стабильностью баллистических характеристик гранатометного выстрела.

В работе [8] показано, что стабильность баллистических характеристик неуправляемых гранат для средств ближнего боя (СББ) можно обеспечить введением в конструкцию импульсных реактивных двигателей на твердом топливе (РДТТ) автоматически регулирующего критического сечение устройства. В [8] предложено также несколько вариантов формы регулятора расхода в виде центрального

заканчивался строго в расчетной точке, соответствующей требуемому критическому сечению.

Анализ технических решений и обоснование конструкции тормозного устройства, обеспечивающего полное торможение ЦТ в нужном положении, проводились на основе вычислительных экспериментов в программном комплексе Ansys Autodyn. Задачи серии вычислительных экспериментов заключались:

— в подборе рационального пути торможения ЦТ, обеспечивающего допустимый уровень нагрузок на неподвижные детали упора при минимальных габаритно-массовых характеристиках всего узла;

— в управлении открытием критического сечения двигателя, реализуемым через разницу в смещениях ЦТ за счет конструкции как проникающих элементов, так и преграды на их пути, чувствительных к незначительному (6–13 %) изменению кинетической энергии выдвигающегося ЦТ при разных температурах функционирования (при этом увеличение разницы между крайними смещениями (при  $-40^{\circ}\text{C}$  и  $+50^{\circ}\text{C}$ ) повышает точность регулирования величины критического сечения).

Исходными данными для решения задачи являются графики набора скорости ЦТ при крайних температурных режимах применения (типичный вид зависимости приведен на рис. 1).

Численное моделирование процесса внедрения кинематически связанных с ЦТ проникающих элементов в подбираемую преграду проводилось в среде Ansys Autodyn. Вычислительные эксперименты выполнялись в трехмерной постановке для одной четвертой части моделируемого объема, что определяется наличием двух плоскостей симметрии. Предел текучести материала ударника задавался на уровне 1500 МПа, что соответствует широко распространенным в практике отечественным сталям 30ХГСА и 40Х, закаленным до твердости  $\sim 47$  HRC. В качестве материала преграды проверялись алюминиевые сплавы АД1 и АМг6 (зарубежные аналоги (США) — AL 1100-О и AL 6061-Т6). Их прочностные свойства задавались двумя известными моделями сопротивления разрушению — моделью Johnson–Cook и моделью Steinberg–Guinan. Наибольшее соответствие физическим особенностям моделируемого процесса и экспериментальным данным выявлено для вязкопластической модели Steinberg–Guinan, хорошо подходящей для описания неупругого взаимодействия тел.

В случае сложной геометрии ЦТ масса его перемещающихся деталей моделировалась присоединенной массой к проникающему элементу для сокращения числа ячеек расчетной сетки и экономии вычислительных ресурсов. В случае относительно простой геометрии расчетная сетка (смешанная гексагональная-тетраэдрическая с максимальным линейным размером ячейки 0,5 мм) использовалась непосредственно для трехмерной модели конструкции. После деформации

расчетной ячейки в 2,5 раза она автоматически удалялась из области расчета (механизм так называемой “численной эрозии”).

Геометрическая модель задачи — осесимметричная, ударник совершает движение против оси  $z$  (поэтому скорость и пройденный путь на рис. 3, 6, 7 — отрицательны). Граничное условие обусловлено консольным закреплением штока, по которому совершается выдвигание ЦТ, в месте его соединения с двигателем: в узлах, принадлежащих поверхности торца штока, запрещены перемещения во всех направлениях. В начальный момент времени проникающий элемент расположен вплотную к деформируемой преграде. Расчет повторяется для двух начальных условий — скорости ЦТ перед началом внедрения в преграду при  $-40^\circ\text{C}$  и при  $+50^\circ\text{C}$ , которую ему сообщил поток истекающих пороховых газов на заранее выбранной базе свободного разгона. Для графиков, приведенных на рис. 1, на базе свободного разгона, например 24 мм, начальным условием для деталей ЦТ при  $-40^\circ\text{C}$  является скорость 67 м/с, при  $+50^\circ\text{C}$  — скорость 73 м/с. В соответствии с внутриваллистическими расчетами кинетическая энергия ЦТ для данного момента упреждения и требуемого открытия критического сечения должна быть диссипирована на глубине внедрения 8 мм при  $-40^\circ\text{C}$  и 13 мм при  $+50^\circ\text{C}$ . Обычно база свободного хода ЦТ выбиралась в диапазоне 15...25 мм, сопоставимом с ходом проникающего элемента в преграде. Большой путь свободного разгона позволял ЦТ набрать значительную скорость прежде, чем начать торможение на относительно малом пути, что приводило к резкому увеличению нагрузок на неподвижные детали (опасность разрыва штока) и соединения (срезы резьбы). Малый путь свободного разгона приводит к увеличению хода проникающего элемента в преграде, что, кроме повышения требований к повторяемости свойств материала преграды, ведет к относительно медленному открытию критического сечения (аналогично сильному форсированию), опасному с точки зрения возникновения нерасчетно-высокого давления в камере, увеличения силы, действующей на поверхность ЦТ, и, в конечном счете, увеличения нагрузок на неподвижные детали.

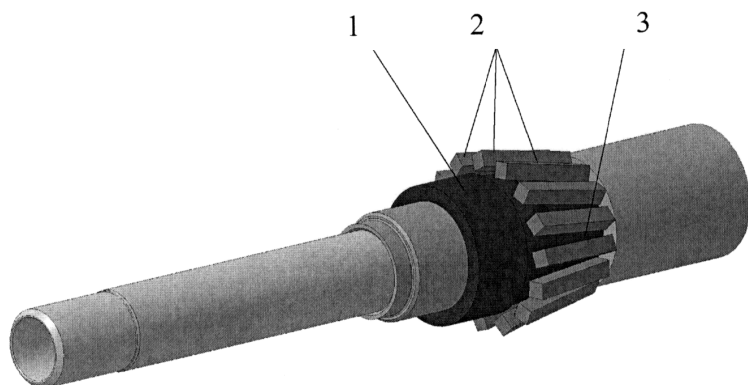
В результате трехмерных расчетов для каждой конкретной конструкции преграды оцениваются нагрузки, которые испытал проникающий элемент ЦТ, а также абсолютное значение смещений при крайних температурах функционирования. В серии вычислительных экспериментов преграда подбирается таким образом, чтобы затормозить разогнавшееся ЦТ в диапазоне конечных положений, соответствующих площади критического сечения при всех температурных условиях применения для обеспечения постоянного давления в камере сгорания. Подбор преграды заканчивается в том случае, если гарантирована прочность неподвижных соединений в конструкции двигателя,

а конечные положения ЦТ соответствуют расчетному критическому сечению в зависимости от температуры.

Особенностью данного процесса регулирования является необходимость обеспечить поглощение относительно небольшой разницы в кинетических энергиях ЦТ при крайних температурных режимах работы (не более 13 %) на относительно большом (не менее 25 %) пути смещения ЦТ. Возможным решением задачи является деформирование разнотолщинной преграды в процессе торможения ЦТ. В результате “натекания” срезаемой цилиндрической подложки на ударник, т.е. совершения работы, затрачиваемой на изменение внутреннего диаметра подложки, диссипируется кинетическая энергия ЦТ, причем интенсивность диссипации определяется толщиной подложки.

Предполагается, что кинетическая энергия проникающего элемента при  $-40^{\circ}\text{C}$  будет затрачена на срез массивного переднего участка (конического или цилиндрического), а добавку кинетической энергии (6–13 %) при функционировании двигателя при  $+50^{\circ}\text{C}$  поглотит работа, затрачиваемая на срез тонкой цилиндрической части. Разность между необходимыми смещениями при  $+50^{\circ}\text{C}$  и  $-40^{\circ}\text{C}$ , достигающая  $\sim 10$  мм для случая ровной конической формы внешней поверхности ЦТ [8], привела к необходимости диссипации незначительной разности в кинетических энергиях ЦТ на значительном участке пути.

Нетривиальность задачи и искомой конструкции демпфера заключается в том, что заключительный участок подложки должен оказывать меньшее удельное сопротивление прониканию ударника, чем начальный участок диссипации энергии. Для предохранения тонкой цилиндрической части подложки от потери устойчивости поверх нее были установлены стальные ребра жесткости (рис. 2), обеспечивающие передачу силы торможения на первом участке непосредственно в силовой упор вплоть до начала деформирования ударником тонкой части подложки.



**Рис. 2. Ребра, предохраняющие от потери устойчивости тонкую цилиндрическую часть:**

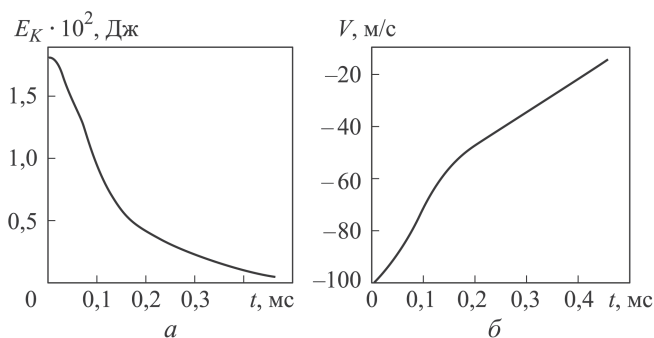
1 — демфирующая преграда; 2 — ребра; 3 — тонкая цилиндрическая часть преграды

При работе двигателя при  $-40^{\circ}\text{C}$  (скорость ударника к моменту начала проникания —  $92,6\text{ м/с}$ ) ударник проникает в массивную цилиндрическую часть и останавливается, при этом ребра не позволяют тонкому цилиндру потерять устойчивость. В случае работы двигателя при  $+50^{\circ}\text{C}$  (скорость ударника к моменту начала проникания составляет  $100\text{ м/с}$ ) ударник дополнительно срезает тонкую цилиндрическую часть, а ребра, лишь технологически связанные друг с другом полимерным связующим, практически без совершения работы разлетаются во внутреннем объеме полого ЦТ.

Необходимая толщина ребер для сохранения устойчивости тонкого цилиндрического участка составляет  $2\text{ мм}$  (общее число ребер 24). В серии численных экспериментов выявлено, что при толщине ребер в  $1\text{ мм}$  при сохранении плотной укладки и прежней скорости проникания ударника дополнительно совершается работа на поперечный изгиб ребер. Выявлено, что форма демпфирующей преграды, показанная на рис. 2, позволяет ей оказывать постоянную силу сопротивления открытию ЦТ в зависимости от температурного режима. Прониканию при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  соответствует постоянная сила сопротивления переднего участка преграды, прониканию ударника при температуре  $+50^{\circ}\text{C}$  дополнительную слабую (но постоянную) силу сопротивления оказывает тыльный участок преграды. На рис. 3 на графиках кинетической энергии и скорости ударника приведены характерные линейные участки для двух стадий проникания ударника при температуре  $+50^{\circ}\text{C}$ .

При температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  ударник внедряется в преграду на глубину  $\sim 18\text{ мм}$  за  $0,5\text{ мс}$ , при температуре  $+50^{\circ}\text{C}$  — на глубину  $\sim 23\text{ мм}$  за  $0,46\text{ мс}$ . Достигнутая абсолютная разность смещений составила  $\sim 5\text{ мм}$ . Следовательно, решена задача по торможению ЦТ при его открытии под действием давления пороховых газов в камере и обеспечения требуемого плавного регулирования критического сечения РДГТ.

Найденное решение принципиально позволяет регулировать перемещение ЦТ (и, следовательно, критическое сечение РДГТ) в большом

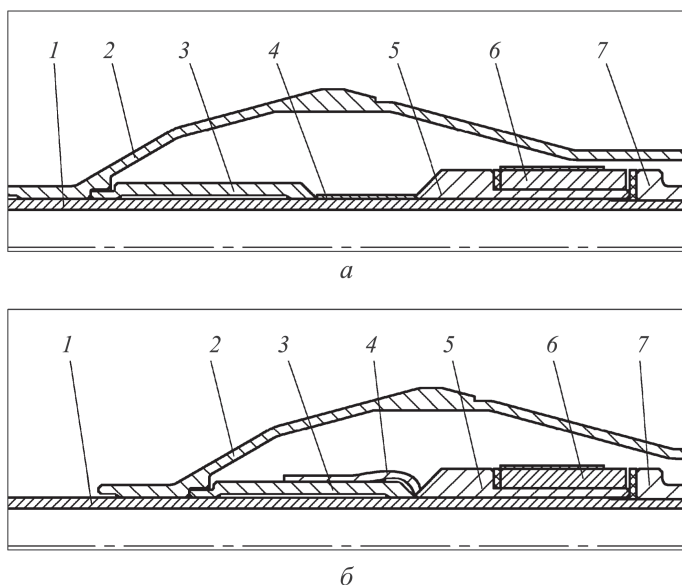


**Рис. 3.** Зависимости кинетической энергии (а) и скорости (б) от времени проникания ударника

диапазоне, делая его чувствительным к незначительным изменениям начальной температуры заряда (и, следовательно, давления в камере, которому пропорциональна сила, действующая на поверхность ЦТ). Более того, решение в Ansys Autodyn задачи по деформированию ступенчатой разнотолщинной преграды (с учетом выявленного линейного характера сопротивления деформированию) позволяет определить долю кинетической энергии ЦТ, диссипируемую единицей длины участка преграды каждой толщины. Для ударника с неизменной формой конической (заостренной) части поглощаемая преградой энергия в большей степени зависит от ее толщины и в меньшей — от скорости внедрения ударника в преграду (или скорости деформаций). В перспективе при известных из внутрибаллистического расчета смещениях ЦТ, требуемых для обеспечения постоянства внутреннего давления в камере, и диапазоне скоростей свободного разгона открывающегося ЦТ (а значит, разности кинетических энергий к моменту внедрения в преграду) возможно по зависимости, аппроксимирующей численные расчеты и связывающей поглощаемую единицей преграды кинетическую энергию с толщиной преграды, определять внешние диаметры каждого из участков даже при малой разности кинетической энергии при температурах функционирования  $+50^{\circ}\text{C}$  и  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Управление скоростью открытия критического сечения эквивалентно управлению уровнем форсирования двигателя. В вычислительных и натурных экспериментах выявлено, что постоянная сила сопротивления на начальном участке выдвижения ЦТ, “зажимающая” критическое сечение, сокращает время выхода двигателя на режим. Реализовать данное свойство в конструкции возможно установкой тонкой распорной втулки между острым краем ударника и демпфирующей преградой (рис. 4). Такая деталь позволяет заменить часть инерционного сопротивления ЦТ силовым сопротивлением открытию критического сечения двигателя. Кроме того, введение распорной втулки в конструкцию повышает удобство и технологичность сборки узла (линейный размер втулки жестко задает расстояние между краем ударника и преградой, а все детали упираются друг в друга). Подбор рациональной толщины тонкостенного цилиндрического элемента осуществлялся в серии численных экспериментов в Ansys Autodyn. Поскольку сила сопротивления движению ЦТ в большей степени зависит от толщины втулки, чем от скорости выдвигающейся конструкции, рассчитывался упрощенный случай проникания ЦТ (массой 226 г и начальной скоростью 67 м/с) без учета постоянно нарастающей скорости ЦТ от времени.

Для того чтобы избежать выбросов давления в камере РДТТ (вследствие избыточного форсирования), вполне подходит распорная втулка



**Рис. 4. Схема процесса “срезания” распорной втулки:**

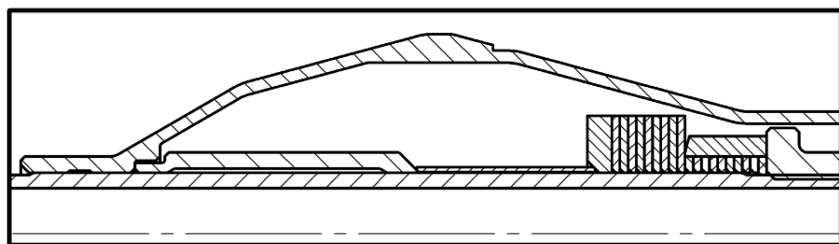
*a* — начальное положение втулки; *б* — конечное положение после “срезания” втулки; 1 — шток; 2 — корпус ЦТ; 3 — ударник; 4 — распорная втулка; 5 — демпфирующая преграда; 6 — ребра; 7 — упоры

из мягкого алюминиевого сплава толщиной 0,5–0,6 мм. Такой форсирующий элемент оказывает постоянную силу сопротивления открытию ЦТ 1,2 кН до момента его внедрения в демпфирующую преграду. Дальнейший расчет проникания ударника показал, что интенсивность динамического удара по преграде за счет введения распорной втулки снижается, обеспечивая прочность тела центрального штока на разрыв, а резьб штока — на срез, и позволяет оптимизировать массу неподвижных деталей.

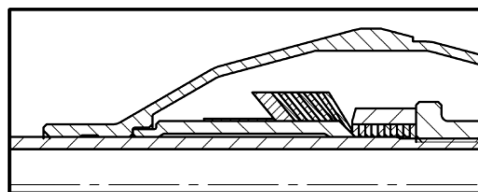
В развитие идеи порционного поглощения участками преграды расчетной доли кинетической энергии открытия ЦТ можно заменить монолитную двухступенчатую преграду набором отдельных колец двух диаметров и нескольких значений толщины, деформирующихся заданным образом. Материал колец — сплавы типа АМг. Представление преграды кольцами и подбор их определяющих параметров (диаметр, толщина, материал, размер и угол фаски) позволяют учесть нелинейный характер зависимости давления в камере от амплитуды перемещения ЦТ (т.е. конечной площади открытого критического сечения) в середине температурного диапазона работы двигателя. ЦТ с корректно подобранными демпфирующими кольцами представляет собой регулятор расхода, настроенный на постоянство давления во всем диапазоне температур функционирования РДГТ.

Далее приведен численный расчет такого демпфера, позволяющего ЦТ открываться на необходимую для постоянства давления в камере

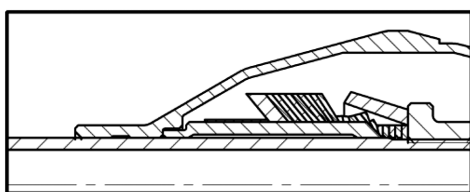




*a*



*б*



*в*

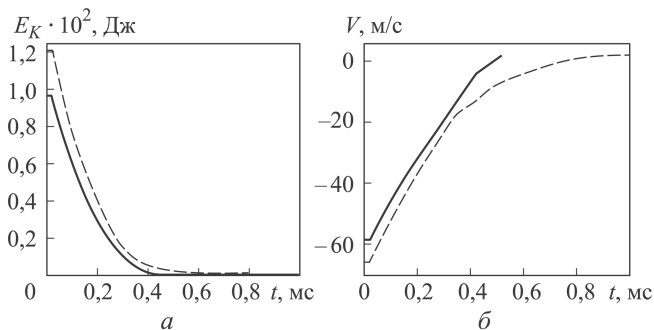
**Рис. 5.** Схема проникания в подложку из колец двух разных диаметров (*a*) при  $-40^{\circ}\text{C}$  (*б*) и  $+50^{\circ}\text{C}$  (*в*)

величину во всем диапазоне температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Кольца зоны малой высоты от потери устойчивости вместо ребер (см. рис. 2) предохраняют четыре опорных сектора (рис. 5). Результаты численного моделирования (масса ЦТ примерно 220 г; скорость в начале внедрения при температуре  $+50^{\circ}\text{C}$  — 65 м/с, при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  — примерно 60 м/с) показывают, что при крайней отрицательной температуре ударник “срезает” все кольца зоны большой высоты и останавливается на первом из малых (рис. 5, *б*), при крайней положительной температуре ударник внедряется до середины зоны малой высоты, распирая опорные сектора (рис. 5, *в*). При этом упругая отдача после завершения проникания на расчетную глубину в действительности не наблюдается за счет действующего давления потока пороховых газов на наружную поверхность ЦТ (в отличие от численных расчетов, не учитывающих этот фактор).

Расчетные зависимости кинетической энергии и скорости ударника от времени его проникания представлены на рис. 6.

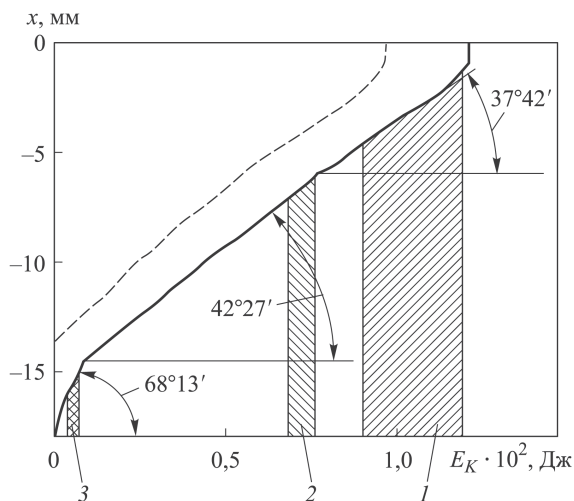
Для определения кинетической энергии, диссипируемой при срезе одного кольца, удобно представить результаты численных расчетов в виде зависимости пройденного ударником пути от его кинетической энергии (рис. 7).

В процессе численного эксперимента выявлено, что скорость деформаций в большей степени зависит от внешнего диаметра кольца, нежели его толщины. При одинаковом диаметре (29 мм), но разной толщине колец (3 мм и 1 мм) кинетическая энергия, диссипируемая единицей толщины кольца, практически постоянна (угол наклона кривой диссипации кинетической энергии на рис. 7 практически постоя-



**Рис. 6. Зависимость кинетической энергии (а) и скорости (б) от времени проникания ударника:**

сплошная кривая соответствует процессу при  $-40^\circ\text{C}$ ; штриховая кривая — при  $+50^\circ\text{C}$



**Рис. 7. Зависимости пройденного ударником пути от кинетической энергии для температуры  $+50^\circ\text{C}$  (сплошная кривая) и  $-40^\circ\text{C}$  (штриховая кривая):**

1 и 2 — энергия, диссипируемая одним толстым и одним тонким высокими кольцами; 3 — энергия, диссипируемая одним тонким низким кольцом

нен для проникания ударника в кольца толщиной 3 мм и 1 мм). Одно кольцо толщиной 1 мм диссипирует  $\sim 32$  Дж кинетической энергии ЦТ, а 1 мм толщины трехмиллиметрового кольца того же диаметра диссипирует  $\sim 38$  Дж кинетической энергии. Кольца малой высоты ( $\varnothing 19$  мм) сопротивляются внедрению ударника значительно слабее: кольцо толщиной 1 мм диссипирует  $\sim 12$  Дж.

Экспериментальные исследования разработанной конструкции подтвердили выбранные параметры демпфера, в результате чего в камере модельного РДТТ экспериментально было зафиксировано снижение температурного разброса давления в 12 раз (до 29 атм.) по сравнению с РДТТ без ЦТ с демпфером.

Таким образом, в результате проведенного вычислительного эксперимента с использованием программного комплекса Ansys Autodyn

найден схемное решение и обоснована конструкция ступенчатого демпфера, позволяющего плавно регулировать давление в камере за счет управляемой диссипации нужной части кинетической энергии открытия ЦТ на заданном расстоянии: демпфер обеспечивает полное торможение ЦТ в положениях, которые соответствуют требуемой площади критического сечения для постоянства давления в камере при работе двигателя в диапазоне температур эксплуатации.

Выбранная конструкция позволяет плавно поглощать основную часть (более 90 % кинетической энергии ЦТ (режим открытия при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$ ) при минимально возможной длине смещения, а температурную прибавку кинетической энергии ЦТ при  $T_0 > -40^{\circ}\text{C}$  диссипировать на относительно большой длине смещения, в результате чего демпфер чувствителен даже к небольшим изменениям скорости открытия ЦТ, пропорциональной начальной температуре метательного заряда.

Показано, что, изменяя конфигурацию поглотителя кинетической энергии ЦТ возможно управлять скоростью открытия ЦТ, т.е. регулировать время выхода РДТТ на режим, максимальное давление в камере и суммарный импульс давления по времени — “наполненность” диаграммы  $P(t)$ .

Предложенная схема поглотителя кинетической энергии при задании специальной нелинейной характеристики сопротивления деформированию способна обеспечить большее давление в камере РДТТ при отрицательных температурах, чем при положительных. Это позволит проводить настройку РДТТ на требуемую температуру в пределах всего интервала эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Средства поражения и боеприпасы / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др. / под. общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 982 с.
2. Никулин Е.Н., Руссков В.Ф., Семенов И.А. Средства ближнего боя. Ручные гранатометы. СПб.: Изд-во БГТУ, 2007. 139 с.
3. Ильин Ю.Д., Клименко А.Ф., Селиванов В.В. О необходимости совершенствования системы технического обеспечения войск и развития промышленности боеприпасов и спецхимии // Военная мысль. 2013. № 8.
4. Селиванов В.В., Ильин Ю.Д., Мачнева И.П. Долгосрочное прогнозирование направлений развития высокоточных боеприпасов // Военная мысль. 2014. № 4.
5. Левин Д.П., Селиванов В.В. Роль и место оружия нелетального действия в современных конфликтах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. 2013. № 2.
6. Левин Д.П., Ильин Ю.Д., Селиванов В.В. Методические основы программно-целевого управления развитием оружия нелетального действия // Вопросы оборонной техники. 2014. Вып. 3–4. С. 16.
7. Селиванов В.В., Левин Д.П., Ильин Ю.Д. Методологические вопросы развития оружия нелетального действия // Военная мысль. 2015. № 2.

8. *Моделирование* воздействия истекающих пороховых газов на регулятор расхода импульсного реактивного твердотопливного двигателя / В.В. Кореньков, С.И. Лежнин, Н.В. Светогоров, В.В. Селиванов, С.В. Сергиенко // Вопросы оборонной техники. 2015. Сер. 16.
9. *ОСТ В3-4712–88 Минометы*. Метод расчета внутренней баллистики.

## REFERENCES

- [1] Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F. Sredstva porazheniya i boepripasy [Ordnance and Ammunition]. Moscow, MGТУ im. N.E. Baumana Publ., 2008. 982 p.
- [2] Nikulin E.N., Russkov V.F., Semenov I.A. Sredstva blizhnego boya. Ruchnye granatomy [Close Combat Weapons. Hand-Held Grenade Launchers]. St.Petersburg, BGTU Publ., 2007. 139 p.
- [3] Il'in Yu.D., Klimenko A.F., Selivanov V.V. About the Necessity for Improving the System of Technical Support for the Troops and the Development of Industry of Munitions and Special Chemicals. *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2013, no. 8 (in Russ.).
- [4] Selivanov V.V., Il'in Yu.D., Machneva I.P. Long-Term Forecasting of the Directions of Precision-Guided Munition Development. *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2014, no. 4 (in Russ.).
- [5] Levin D.P., Selivanov V.V. The Role and Place of Non-Lethal Weapons in Contemporary Conflicts. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost. Spetsvyv* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng. Spec. Iss.], 2013, no. 2 (in Russ.).
- [6] Levin D.P., Il'in Yu.D., Selivanov V.V. Methodological Basics of Management by Objectives of Non-Lethal Weapons Development. *Voprosy oboronnoy tekhniki* [Defense Engineering Problems], 2014, iss. 3–4, p. 16 (in Russ.).
- [7] Selivanov V.V., Levin D.P., Il'in Yu.D. Methodological Issues of Non-Lethal Weapon Development. *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2015, no. 2 (in Russ.).
- [8] Koren'kov V.V., Lezhnin S.I., Svetogorov N.V., Selivanov V.V., Sergienko S.V. Simulating Impact of Powder Gas Exhaust on the Flow Governor of Detonation Solid Propellant Jet. *Voprosy oboronnoy tekhniki* [Defense Engineering Problems], 2015, ser. 16 (in Russ.).
- [9] Standard V3-4712–88. Minometry. Metod rascheta vnutrenney ballistiki [The Method of Internal Ballistics Calculation].

Статья поступила в редакцию 28.04.2015

Кореньков Владимир Владимирович — канд. техн. наук, директор НПЦ “Специальная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана, лауреат премии Ленинского комсомола, премии Правительства РФ, премии С.И. Мосина, автор более 120 научных работ и 25 изобретений в области физики взрыва, разработки и испытаний вооружения и военной техники.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Korenkov V.V. — Ph.D. (Eng.), Director of the Specialized Machinery Research and Production Center, Bauman Moscow State Technical University, laureate of the Lenin Komsomol Prize, the Russian Federation Government Prize, S.I. Mosin Prize, author of over 120 research publications and 25 inventions in the fields of physics of explosive combustion, development and testing of weapons and military equipment.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Лежнин Сергей Иванович — аспирант кафедры “Высокоточные летательные аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Lezhnin S.I. — Ph.D. student, Department of High Precision Airborne Vehicles, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Светогоров Николай Владимирович — зам. начальника отдела НПЦ “Специальная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух научных работ и двух изобретений в области разработки и испытаний вооружения и военной техники.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Svetogorov N.V. — Deputy Director of the Department of Specialized Machinery Research and Production Center, Bauman Moscow State Technical University, author of two research publications in the field of development and testing of weapons and military equipment.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Селиванов Виктор Валентинович — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Высокоточные летательные аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Ленинского комсомола и премии Правительства РФ, действительный член Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Автор более 200 научных работ в области физики, техники и технологии взрыва и удара.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Selivanov V.V. — D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of High Precision Airborne Vehicles, Bauman Moscow State Technical University, Honored Scientist of the Russian Federation, laureate of the Lenin Komsomol Prize and the Russian Federation Government Prize, author of over 200 research publications in the fields of physics, methods and technology of explosive combustion and impact.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Сергиенко Сергей Владимирович — канд. техн. наук, начальник отделения НПЦ “Специальная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 14 научных работ и трех изобретений в области разработки и испытаний вооружения и военной техники.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Sergienko S.V. — Ph.D. (Eng.), Head of the Division in the Specialized Machinery Research and Production Center, Bauman Moscow State Technical University, author of 14 research publications and three inventions in the field of development and testing of weapons and military equipment.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Кореньков В.В., Лежнин С.И., Светогоров Н.В., Селиванов В.В., Сергиенко С.В. Моделирование процесса диссипации кинетической энергии регулятора расхода импульсного реактивного твердотопливного двигателя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 4. С. 63–75.

**Please cite this article in English as:**

Korenkov V.V., Lezhnin S.I., Svetogorov N.V., Selivanov V.V., Sergienko S.V. Simulation of the kinetic energy dissipation in the flow control valve of a pulsed solid propellant jet. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 4, pp. 63–75.