

УДК 532.592.2

## УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ЛЕГКОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВАРИАНТА РЕЛЬСОВОГО ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

© Сергей Иванович Герасимов<sup>1,2,3</sup>, Владимир Иванович Ерофеев<sup>1</sup>,  
Александр Петрович Калмыков<sup>2</sup>, Сергей Васильевич Куликов<sup>2</sup>,  
Алексей Олегович Мальханов<sup>1</sup>, Татьяна Вячеславовна Юферова<sup>2</sup>,  
Владимир Александрович Тамаров<sup>3</sup>, Алексей Николаевич Жаров<sup>3</sup>,  
Илья Александрович Новиков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН), Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Саров Нижегородской обл., Россия

<sup>3</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.А. Алексева,  
Нижний Новгород, Россия

[s.i.gerasimov@mail.ru](mailto:s.i.gerasimov@mail.ru), [erof.vi@yandex.ru](mailto:erof.vi@yandex.ru)

**Аннотация.** Рассматривается легкогазовая установка (ЛГУ), базовая схема которой включает в себя источник электрической энергии, блок рельсовых направляющих с токоподводами, метаемое тело в электродинамическом поддоне и коммутатор, обеспечивающий разряд источника энергии в электрической цепи «токоподводы-рельсы-поддон». Расчетную модель ЛГУ при ускорении поршня предложено дополнить электродинамической ступенью разгона. Показано, что за счет электромагнитной силы поршень успевает сжать легкий газ до высоких давлений и передать через газ часть своей энергии движущемуся элементу, оставаясь в ускорителе. Бездуговой режим контактирования поддона с рельсами реализуется с помощью системы внешнего подмагничивания (индуктора).

**Ключевые слова:** легкогазовая установка, рельсовый электродинамический ускоритель, математическое моделирование.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 20-08-00372-а).

## REFINING THE MODEL OF CALCULATION OF THE LIGHT-GAS INSTALLATION FOR THE OPTION OF THE RAIL ELECTRODYNAMIC ACCELERATOR

© S.I. Gerasimov<sup>1,2,3</sup>, V.I. Erofeev<sup>1</sup>, A.P. Kalmikov<sup>2</sup>, S.V. Kulikov<sup>2</sup>, A.O. Malkhanov<sup>1</sup>,  
T.V. Yuferova<sup>2</sup>, V.A. Tamarov<sup>3</sup>, A.N. Zharov<sup>3</sup>, I.A. Novikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Science,  
Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Sarov Physical-Technical Institute—branch NRSU “MIPHY”, Sarov, Russia

<sup>3</sup>R.E. Alekseev Nizhny Novgorod Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

[s.i.gerasimov@mail.ru](mailto:s.i.gerasimov@mail.ru), [erof.vi@yandex.ru](mailto:erof.vi@yandex.ru)

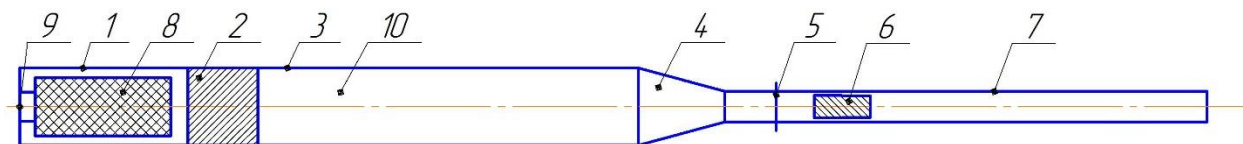
**Abstract.** A light-gas installation (LSU) is considered, the basic circuit of which includes a source of electric energy, a block of rail guides with current leads, a throwable body in an electrodynamic tray, and a switch that provides a discharge of an energy source in the electric circuit "current leads-rails-pallet". It is proposed to supplement the design model of LSU with acceleration of the piston by the electrodynamic stage of acceleration. It is shown that due to electromagnetic force, the piston manages to compress light gas to high pressures and transfer part of its energy through the gas to the moving element, remaining in the accelerator. The arcless contact mode of the pallet with the rails is implemented using the system of external magnetization (inductor).

**Keywords:** light gas installation, rail electrodynamic accelerator, mathematical modeling.

**Acknowledgements.** The work was supported by the RFBR, project no. 20-08-00372-a.

Легкогазовые двухступенчатые установки (пушки) применяются на полигонах и баллистических трассах для решения прикладных задач и проведения фундаментальных научных исследований в области гиперзвуковой аэродинамики, теплообмена при обтекании, поведения материалов и конструкций в условиях интенсивных механических нагрузок. Преимущества легкогазовых установок перед другими средствами разгона заключаются в обеспечении высокоскоростного метания объектов с заданной массой, формой и скоростью, причем эти преимущества особенно проявляются при увеличении скорости и массы метаемых объектов. Для надежной работы ЛГУ в экспериментах необходимо определять параметры заряжения, обеспечивающие достижение необходимой скорости метания при условии не превышения допустимых нагрузок на узлы установки и метаемого объекта (МО). При этом должны учитываться реальные возможности установки по обеспечению тех или иных параметров заряжения, трудоемкость подготовки испытаний, стоимость расходных материалов и т.д. В расчетах используется математическая модель, описывающая течение газопороховой смеси и легкого газа с учетом трения и теплоотдачи. При эксплуатации ЛГУ среди большого количества параметров, характеризующих условия её заряжения, имеется возможность управления величинами трех параметров: массы порохового заряда; массы поршня; начального давления рабочего газа. Рассматривается вариант дополнения математической модели ЛГУ при ускорении поршня электродинамической ступенью разгона. Базовая схема такой ЛГУ включает в себя: источник электрической энергии; блок рельсовых направляющих с токоподводами; метаемое тело в электродинамическом поддоне и коммутатор, обеспечивающий разряд источника энергии в электрической цепи "токоподводы-рельсы-поддон". Бездуговой режим контактирования поддона с рельсами реализуется с помощью системы внешнего подмагничивания (индуктора).

На рис. 1 представлена схема баллистического агрегата ЛГУ [1].



**Рис. 1.** Схема баллистического агрегата ЛГУ: 1 – зарядная камера; 2 – поршень; 3 – поршневая труба; 4 – форкамера; 5 – мембрана; 6 – метаемый объект; 7 – баллистический ствол; 8 – пороховой заряд; 9 – воспламенитель; 10 – легкий газ (H<sub>2</sub> или He).

Выстрел из ЛГУ осуществляется следующим образом. При подаче электрического импульса на воспламенитель обеспечивается зажигание порохового заряда (ПЗ). Образующиеся при его горении пороховые газы разгоняют поршень. Сжатый и разогретый за счет этого легкий газ, предварительно закачанный в поршневую трубу, по достижении давления форсирования ( $I/m$ ) раскрывает мембрану, разделяющую форкамеру (ФК) и баллистический ствол (БС), и затем, перетекая в БС, разгоняет метаемый объект.

Режим высокоскоростного метания сопровождается реализацией интенсивных ударно-волновых газодинамических процессов в легком газе (в зоне между поршнем и мембраной, а после ее раскрытия – между поршнем и МО), а также высокого давления в зарядной камере (ЗК). При этом нагрузки на узлы ЛГУ и МО могут достигать предельно допустимых (или даже превышать их). Безаварийный режим работы ЛГУ с реализацией высокоскоростного режима метания требует расчетного определения взаимно согласованных значений исходных параметров выстрела. Это тем более важно, когда требуется достижения режимов, реализующих предельно возможные скорости метания. К исходным параметрам, относятся Параметры МО, ПЗ, поршня, легкого газа, давление форсирования (раскрытия) мембраны, геометрические и прочностные характеристики баллистического агрегата определяют предельный режим выстрела.

Численное определение параметров выстрела осуществляется с применением математической модели выстрела, разработанной в НИИ прикладной математики и механики при Томском госуниверситете [2].

Принимается, что горение всего ПЗ начинается одновременно. В начальный момент газ неподвижен, давление по всему объему ЗК выравнено. Заряд состоит из одинаковых зерен пороха, и пороховые зерна движутся с той же скоростью, что и окружающий их газ. Принят геометрический закон горения пороха параллельными слоями с одинаковой линейной скоростью, направленной по нормали к поверхности горения. Газ считается совершенным. Процессы в ЗК с учетом сделанных допущений описываются следующей системой уравнений [2,3]:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial \xi} (S(x)u) &= 0 \\
 \frac{\partial u}{\partial t} + S(x) \frac{\partial P}{\partial \xi} &= 0 \\
 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + p \frac{\partial v}{\partial t} &= X(z) \frac{f}{\gamma_n - 1} \frac{\partial \psi}{\partial t} \\
 \frac{\partial x}{\partial t} &= u \\
 \frac{\partial z}{\partial t} &= \chi(z) \frac{P}{I_k} \\
 \chi(z) &= \begin{cases} 1 & \text{при } z < 1 \\ 0 & \text{при } z = 1 \end{cases} \\
 \varepsilon &= \frac{P}{\gamma_n} \left[ v - \left( \alpha_n - \frac{1}{\rho_n} \right) \psi - \frac{1}{\rho_n} \right] \\
 \psi(z) &= \chi(z + \alpha z^2 + \mu z^3) \\
 p(v - \alpha_n) &= \frac{R}{\mu_n} T
 \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь  $t$  – время  $x$ ;  $\xi$  – координаты Эйлера и Лагранжа;  $U$  – скорость газа;  $P$  – давление;  $v$  – удельный объем;  $T$  – температура;  $\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия;  $z$  – относительная толщина сгоревшего слоя пороха;  $f$  – сила пороха;  $\rho_n$  – плотность пороха;  $\chi, \lambda, \mu$  – характеристики формы порохового зерна;  $S(x)$  – площадь переменного сечения канала;  $I_k$  – полный импульс давления пороховых газов;  $\mu_n$  – молекулярный вес;  $\alpha_n$  – коволюмом;  $\gamma_n$  – отношение удельных теплоемкостей; индекс  $n$  относится к параметрам порохового газа.

Система уравнений (1) решается при начальных условиях  $U(0, \xi) = 0$ ;  $P(0, \xi) = P_n(0)$ ;  $\varepsilon(0, \xi) = \varepsilon_n(0)$ ;  $v(0, \xi) = v_n(0)$ ;  $z(0, \xi) = z_n(0)$ . Связь эйлеровой и лагранжевой координат в начальный момент

определяется зависимостью  $\xi = \int_{x(0,0)}^{x(0,\xi)} \frac{S}{v} dx$ . Рабочий легкий газ считается идеальным,

удовлетворяющим уравнению состояния с коволюмом. Движение газа по каналу является существенно нестационарным квазиодномерным. Течение рабочего газа по каналу переменного сечения описывается системой уравнений [2-4]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial \xi} (S(x)u) &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + S(x) \frac{\partial P}{\partial \xi} &= 0 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + p \frac{\partial v}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial x}{\partial t} &= u \\ \varepsilon &= \frac{P}{\gamma_2} (v - \alpha_2) \\ p(v - \alpha_2) &= \frac{R}{\mu_2} T \end{aligned} \right\} (2)$$

Система (2) решается при начальных условиях  $t = 0$ ;  $U(0, \xi) = 0$ ;  $P(0, \xi) = P_2(0)$ ;  $T(0, \xi) = T_2(0)$ ,  $x(0, \xi) = x_2(0)$ . Зоны больших градиентов рассматриваются как поверхности разрыва газодинамических величин, на которых выполняются соотношения Гюгонио. Принято, что материал поршня соответствует несжимаемой вязкопластичной жидкости. Сопротивление, возникающее при движении поршня по каналу, разделяется на контактное, связанное с трением на границе поршень-стенка канала, и сопротивление при деформации поршня при его движении в сужающемся канале. Система уравнений, описывающая движение поршня по каналу переменного сечения, записывается в виде [2, 5]:

$$(3) \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x}(US) = 0 \\ \rho_{nuu} \frac{\partial U}{\partial t} + \rho_{nuu} U \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{S} S' (\sigma_{xx} - \sigma_{nn}) + \frac{2\pi R \sigma_{nr}}{S} \\ \sigma_{xx} - \sigma_{nn} = -3KU \frac{S'}{S} \delta(x) \\ K = \eta_{nuu} + \tau_{sn} / 2h \\ h = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( U \frac{S'}{S} \right) \\ \delta(x) = \frac{1}{1 + R'^2} \\ \delta_{nr} = -\tau_n \text{sign} U \\ S' = \frac{\partial S}{\partial x} \\ R' = \frac{\partial R}{\partial x} \end{array} \right.$$

где  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{nn}$  – компоненты тензора напряжений;  $\sigma_{nr}$  – касательное напряжение на границе поршень - стенка канала;  $\rho_{nuu}$  – плотность материала поршня;  $\eta_{nuu}$  – вязкость материала поршня;  $R$  – радиус поперечного сечения канала.

Система уравнений (3) интегрируется при граничных условиях на левом и правом торцах поршня:

$$\begin{array}{l} \sigma_{xx} = -P_{nz} \quad \text{при } x = x_{nl} \\ \sigma_{xx} = -P_{lz} \quad \text{при } x = x_{nn} \end{array}$$

где  $x_{nl}$ ,  $x_{nn}$  – координаты левого и правого торцов поршня;  $P_{nz}$ ,  $P_{lz}$  – давление на левый и правый торцы поршня порохового и легкого газов.

Расчет движения МО осуществляется с учетом сил от давления легкого газа (слева) и давления газа, оставшегося в вакуумированном перед выстрелом баллистическом стволе (справа), а также силы трения на границе МО – канал БС:

$$\frac{dU_{MO}}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{при } P_{lz}(x_M) < P_{\phi M} \\ \frac{S_{\delta c}}{m_{MO}} P(x_{MO}) - \frac{S_{\delta MO}}{m_{MO}} \tau_{MO} - \frac{S_{\delta c}}{m_{MO}} P_{\delta c}(0) \left\{ \frac{2\gamma_{\delta c}}{\gamma_{\delta c+1}} \left[ \frac{\gamma_{\delta c} + 1}{4} \left( \frac{U_{MO}}{a} + \sqrt{\left( \frac{U_{MO}}{a} \right)^2 + 4 \left( \frac{2}{\gamma_{\delta c+1}} \right)^2} \right) \right]^2 - \frac{\gamma_{\delta c} - 1}{\gamma_{\delta c} + 1} \right\} & \end{cases}$$

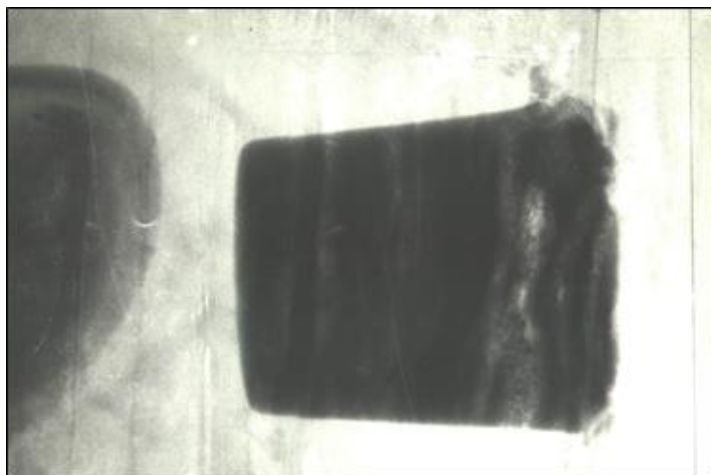
при  $P_{lz}(t) \geq P_{\phi M}$

$$\frac{dx_{MO}}{dt} = U_{MO}$$

Здесь  $x_M$ ,  $x_{MO}$  – координаты мембраны и левого торца МО;  $P_{\phi M}$  – давление форсирования

мембраны;  $t_{MO}$  – время, соответствующее моменту раскрытия мембраны и началу движения МО;  $\tau_{MO}$  – коэффициент трения по контактной границе МО – канал БС;  $S_{bc}, S_{\delta MO}$  – площадь поперечного сечения БС и боковой поверхности МО, контактирующей с БС;  $P_{bc}(0), a$  – начальные давление и скорость звука в БС;  $\gamma_{bc}$  – отношение удельных теплоемкостей.

Данная модель удовлетворительно описывает параметры выстрела и используется для оптимизации и идентификации характеристик ЛГУ. В частности, при проведении ударных испытаний в ЛГУ могут разгоняться калиберные ударники, выполненные в виде цилиндров с относительным удлинением  $\bar{l} = 1.1 - 1.4$ . В качестве материала ударников применяются полиэтилен, асботекстолит, сталь, алюминий и другие материалы. Масса ударников составляет 1–2 кг. В опытах определяется скорость полёта ударника, производится его скоростная киносъёмка и рентгеновская регистрация, в том числе в процессе взаимодействия с преградой (мишенью). Рентгеновские снимки ударников в полете и при взаимодействии с мишенью приведены на рисунках 2, 3. Максимальная скорость разгона ударников массой 1 кг в проведённых экспериментах составила 4,3 км/с, ударников массой 2 кг – 3,9 км/с.



**Рис.2.** Рентгеновский снимок ударника в полёте (материал – асботекстолит,  $m = 1,3$  кг,  $U = 4$  км/с).



**Рис.3.** Рентгеновский снимок ударника при взаимодействии с мишенью (материал – алюминий,  $m = 1,8$  кг,  $U = 3,7$  км/с).



ЛГУ с электродинамически ускоряемым поршнем схематически представлена на рис.4. Здесь пороховая камера, деформируемый поршень, камера сжатия, заполняемая легким газом (водородом, гелием), метаемый элемент, вакуумированный ствол дополняются основной (11) и управляющей (12) конденсаторными батареями, коммутационными ключами (13), (14), рельсами (15) и индуктором(16).

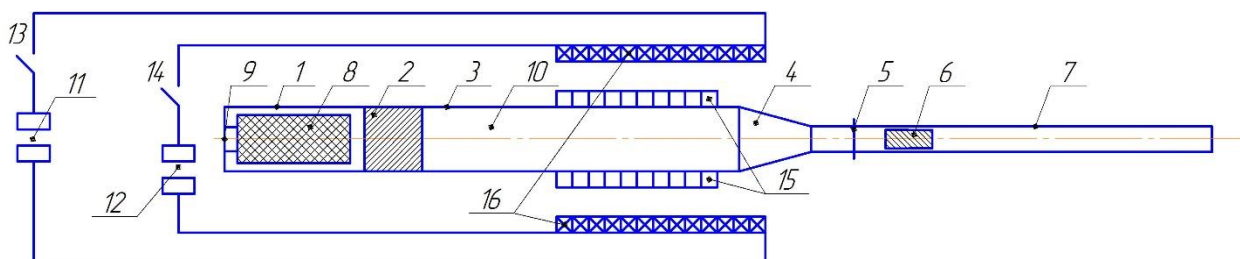


Рис. 4. Схема ЛГУ с электродинамически ускоряемым поршнем.

Процесс метания в этой схеме ЛГУ происходит следующим образом. За счет сгорания вспомогательного порохового заряда осуществляется начальный (до 100 - 300 м/с) разгон поршня. Под действием силы Лоренца начинается электромагнитный этап ускорения поршня с момента попадания его в бездуговой рельсовый ускоритель. Тогда переключается коммутационный ключ (13), в результате чего происходит электрический разряд в цепи, образованной основной батареей, индуктором, рельсами и электроконтактной частью поршня. Коммутатор (14), замыкая цепь через заданный промежуток времени, подключает управляющую конденсаторную батарею. Поршень, двигаясь вправо, сжимает легкий газ в области (10). При превышении давления на метаемом элементе давления форсирования, МО начинает движение по баллистическому стволу. В рассматриваемой схеме ЛГУ предусматривается составной поршень, его задняя часть должна быть электропроводной и изготавливаться из металла, а передняя часть – из малосжимаемого деформируемого материала, близкого по своим свойствам к полиэтилену, чтобы служить амортизатором при вхождении поршня в сужающийся конический переходник.

Для расчета режима метания установки с электродинамически ускоряемым поршнем по сравнению с моделью для классической ЛГУ требуется учет электротехнических уравнений, описывающих работу рельсового электродинамического ускорителя. Задача усложняется необходимостью оценки электротехнических коэффициентов, учитывающих индуктивность индуктора, рельсов, взаимоиндуктивности на единицу пути при омическом нагреве рельсовых направляющих.

Сила Лоренца  $F_L$ , вносящая вклад в разгон, в схеме бездугового рельсового электродинамического ускорителя, видоизменяет систему уравнений движения левой границы поршня в системе (3) как дополнительная составляющая  $\Delta P_{\text{доп}}$ :

$$\Delta P_{\text{доп}} = F_L \cdot \rho_{\text{лп}} \cdot (X_{\text{нп}} - X_{\text{лп}}) / q \quad , \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{лп}}$  – плотность на левой границе поршня,  $q$  – масса поршня,  $\Delta X$  – разница между координатами правой и левой границей поршня.

Сила Лоренца изменяется от нуля до прихода поршня к координате токоподвода к рельсам и в моменты до и после переключения коммутационных ключей (порядка 100-200 мкс), соответственно:

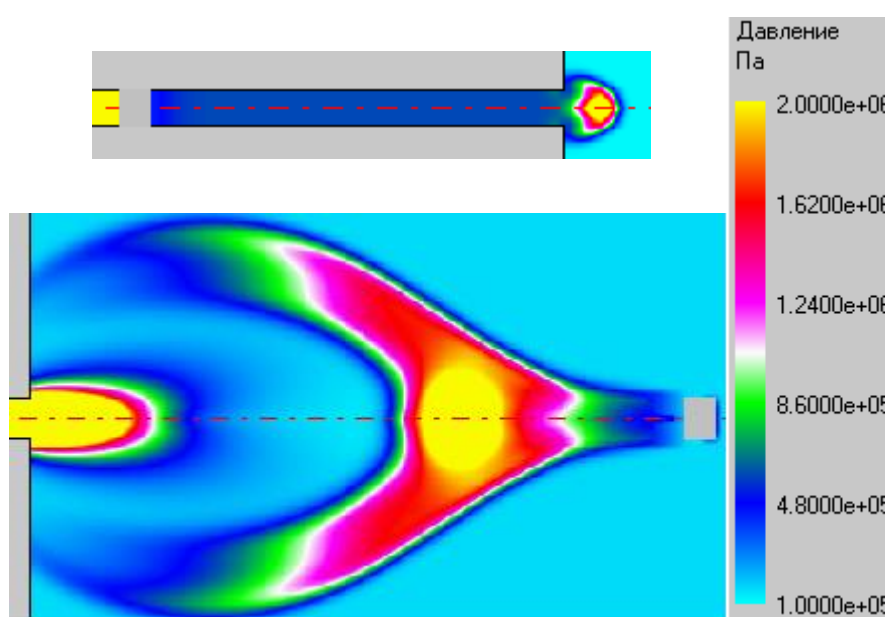
$$F_L = I_i^2 \cdot (0,5 \cdot k_1 + k_2) \text{ или } I_e^2 (0,5 \cdot k_1 + k_2 \cdot I_i / I_e),$$

где  $k_1, k_2$  – погонная индуктивность рельсов и взаимоиндукции;  $I_i, I_e$  – ток, текущий через индуктор и электродинамический поддон, соответственно.

За счет электромагнитной силы поршень успевает сжать легкий газ до высоких давлений и передать через газ часть своей энергии движущемуся элементу, оставаясь в ускорителе.

Последовательное включение индуктора в электрическую цепь ускорителя обеспечивает бездуговой уровень токовых нагрузок на скользящем контакте, частично компенсируя уменьшение ускоряющей лоренцевой силы за счет усиления магнитного поля в межрельсовом промежутке.

На рис.5 приведены расчетные давления дульного выхлопа для схемы ЛГУ с дополнительным разгоном поршня.



**Рис. 5.** Давление дульного выхлопа при выстреле из ЛГУ калибра 23 мм со скоростью 7 км/с в атмосферу воздуха ( $p_0 = 1 \cdot 10^5$  Па) на различные моменты времени.

Использование данной схемы оценивает увеличение штатного режима метания более, чем на 12%.

### Список литературы

1. Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. - М.: Наука, 1974. - 344 с.
2. Жаровцев В.В., Комаровский Л.В., Погорелов Е.И. Математическое моделирование и оптимальное проектирование баллистических установок. - Томск: Изд-во Том.ун-та, 1989. - 256 с.
3. Бетехтин С.А., Веницкий А.М., Горохов М.С., Станюкович К.П., Федотов И.Г. Газодинамические основы внутренней баллистики. - М.: Оборонгиз, 1957. - 386 с.



4. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. - М: Наука, 1971. - 856 с.
5. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. - 256 с.

*Дата поступления: 4 апреля 2020 г.*