УДК 621.5.09

# СПАСАТЕЛЬНЫЕ ЛИНЕМЕТЫ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### © 2016 В.В. Елисеев, В.А. Пискунов

## Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Статья поступила в редакцию 02.03.2016

Рассматривается математическая модель спасательного линемёта при выстреле. Снаряд с линем считается телом переменной массы. Составлены и численно решены уравнения Лагранжа. Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графиков с датчиков лабораторного испытательного стенда.

Ключевые слова: пневматический линемёт, уравнения Лагранжа, компьютерная математика, выстрел, испытательный стенд

В перечне средств спасения на море, сертифицированных Российским морским регистром судоходства, особое место занимают специальные приборы линемёты. Именно они в первую очередь используются на терпящем бедствие судне. Согласно Международной конвенции SOLAS, к судну нельзя подходить ближе 230 м; но переброска спасательных канатов в этом случае невозможна. Линемёт позволяет забросить контейнер с линём далее 250 м, а положительная плавучесть не позволяет утонуть ни линю, ни контейнеру [2]. Выстрел из прибора осуществляется после того, как один конец линя закрепляется в казенной части ствола, а летящий снаряд перебрасывается через спасательное судно. Затем посредством перетягивания происходит передача спасательного каната. Стоит отметить, что при малой толщине морского линя (площадь сечения составляет 1,5 мм<sup>2</sup>) он имеет прочность на разрыв с узлом 230 кг. Сегодня любое морское судно, спускаемое на воду, должно быть оборудовано всеми необходимыми спасательными средствами, включая линемёты. От надежности таких приборов многое зависит, в связи с чем их исследование имеет большую практическую ценность.

Пневматический линемет. До недавнего времени основным спасательным линемётом, представленным на российском рынке, был АЛ-1 [20]. Данный прибор работает за счет горения пороха в пиропатроне и представляет собой металлический тубус с ракетой. Однако использование горючих веществ было признано опасным для стрелка, а хранение таких изделий требовало особых правил – это в значительной степени усложняло эксплуатацию. Поэтому такие устройства сменили пневматические линемёты, работающие от запасенной энергии сжатого газа в ресивере. Сегодня единственным спасательным линемётом, который имеет сертификаты РМРС, является тип ИСТА-240 (рис. 1) [2]. В таких устройствах используются быстродействующие пневматические клапаны, подобные клапанам для ударных газодинамических труб [2, 15]. Основной отличительной особенностью данного прибора от других мировых аналогов является то, что упором для выстрела служит плечо стрелка, позволяя осуществить комфортный пуск «с плеча». Это было обеспечено за счет специальной конструкции системы гашения отдачи. «Классический» вариант пневматического линемёта производства норвежской компании

Елисеев Владимир Васильевич, доктор физикоматематических наук, профессор. E-mail: yeliseyev@inbox.ru Пискунов Владимир Александрович, аспирант. E-mail: vildan.05@mail.ru Restech Norway представляет собой пусковое устройство, устанавливающееся на лафет, что в значительной степени снижает точность выстрела, а также увеличивает время на подготовку пуска [13].

Исследование процессов в момент выстрела важно для оптимизации конструкции (снижения максимального значения импульса отдачи, уменьшения габаритных размеров). Но на практике осуществить замеры необходимых параметров оказалось невозможным (время выстрела составляет не более 50 мс). Для описания процессов был создан экспериментальный стенд, а также проведено математическое моделирование динамики системы тел линемёта. Чтобы описать динамику, рассмотрим общий вид и принцип работы линеметательного устройства. В составе прибора (рис. 2) можно выделить корпус 1, к которому прикреплена рукоятка 2 со спусковым крючком 3. Корпус через казенник 4 соединен со стволом 5. Баллон для сжатого воздуха с редукционным клапаном и манометром 6 установлен сверху и хомутами 7 прикреплен к корзине 8, установленной на подвижной гильзе 9. На конце гильзы установлен амортизатор 10.



Рис. 1. Пусковое устройство линемета

Для того, чтобы привезти линемёт в рабочее состояние, нужно открыть вентиль баллона высокого давления, после чего воздух через редуктор начнет поступать в управляющую полость под колпак объемом V<sub>2</sub>, затем по кольцевому зазору в рабочую камеру  $-V_3$ . При выстреле открывается запорный колпак клапана, и давление воздействует на снаряд, разгоняя его в стволе [11, 12]. Некоторая длина линя (равная длине ствола), укладывается в дно снаряда, а один конец закрепляется в казеннике линемёта. Разгон в стволе подчиняется законам внутренней баллистики, и можно считать перемещение контейнера как тела с постоянной массой. Поскольку время открытия клапана слишком малое (0,0005 с), то протекающие процессы можно считать адиабатическими и пренебречь эффектами газовой динамики. После того, как снаряд вылетает из ствола, срывается дно контейнера, и начинает разматываться линь, имеющий погонную массу р. Согласно рекомендации, выстрел следует производить примерно под углом 30 градусов по отношению к самой высокой точке цели пуска.

Моделирование выстрела. Для рассмотрения проблемы динамики системы тел линемёта перейдем к расчетной модели (рис. 2).



Рис. 2. Расчетная модель линемёта

В линемете имеем несколько движущихся тел: снаряд, пусковое устройство (ПУ) и колпак с массами  $m_1, m_2, m_3$  соответственно. В снаряде уложен линь – нерастяжимая нить с погонной массой  $\rho$  и длиной l. Массы  $m_1, m_2$  переменны из-за выхода линя из контейнера снаряда. Для описания движения эффективны уравнения Лагранжа 2-го рода [3, 7, 14]:

$$\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{i}}\right)^{\Box} - \frac{\partial K}{\partial x_{i}} = Q_{i} - \frac{\partial \Pi}{\partial x_{i}}$$
(1)

Обобщенные координаты  $X_i$  – это абсолютные

перемещения тел налево ( $X_1$ ) и направо ( $X_2, X_3$ ). Левые части уравнений (1) определяются выражением кинетической энергии

$$K = \frac{1}{2} [m_1(x_i)\dot{x}_1^2 + m_2(x_i)\dot{x}_2^2 + m_3\dot{x}_3^2],$$

$$m_1 = m_{10} + \rho(l - x_1 - x_2), m_2 = m_{20} + \rho(x_1 + x_2)$$
(2)

где  $m_{10}, m_{20}$  – массы снаряда и пускового устройства без линя. Вышедшая из контейнера снаряда часть линя считается неподвижной относительно ПУ.

В правых частях уравнений (1) – обобщенные силы с выделенными потенциальными слагаемыми. Для движения под действием только давления сжатого газа будем иметь  $Q_i = 0, \Pi = \Pi(V)$  – функция от объема газа. Потенциальную энергию  $\Pi$  определим из следующих соотношений [3, 14]:

$$\Pi = -\frac{p_0 V_0^{\gamma}}{1 - \gamma} V^{1 - \gamma}, \ p = -\frac{\partial \Pi}{\partial V}, \ p V^{\gamma} = p_0 V_0^{\gamma};$$
(3)

 $V(x_i) = V_0 + S_1(x_1 + x_2) + S_3(x_3 - x_2)$ В геометрическое соотношение для объема *V* системы (3) входит начальный объем *V*<sub>0</sub> и площади сечения ствола *S*<sub>1</sub> и колпака *S*<sub>3</sub>. Формулы содержат давление *p* и соответствуют адиабатическому процессу с показателем  $\gamma = 1.4$ . Однако из-за отдачи при выстреле необходима опора – «плечо». Ей соответствует обобщенная сила со свойствами упругости и демпфирования. Положим

$$Q_2 = -cx_2 - b\dot{x}_2; Q_1 = Q_3 = 0$$
 (4)

Приходим к следующей системе уравнений Лагранжа:

$$m_{1}\ddot{x}_{1} - \rho(\frac{1}{2}\dot{x}_{1}^{2} + \dot{x}_{1}\dot{x}_{2}) = p(V)S_{1},$$
  

$$m_{2}\ddot{x}_{2} + \rho(\frac{3}{2}\dot{x}_{2}^{2} - \dot{x}_{1}\dot{x}_{2}) = p(V)(S_{1} + S_{3}) + Q_{2},$$
(4)

 $m_3 \ddot{x}_3 = -p(V) S_3$ где объем V определяется выражением (3). Система нелинейная, шестого порядка. При заданных начальных условиях она интегрируется средствами компьютерной математики [6]. При этом вводим скорости  $v_i = \dot{x}_i$  и получаем шесть уравнений.

На рис. 3 представлены функции  $x_i(t)$  – результаты численного интегрирования с встроенной функцией *rkfixed* [6]. Значения параметров:  $m_{10} = 0.508$  кг,  $\rho = 1.13 \cdot 10^{-3}$  кг/м,  $m_{20} = 7.07$  кг,  $m_3 = 0.008$  кг,  $S_1 = 0.002$  м<sup>2</sup>,  $S_3 = 0.001$  м<sup>2</sup>,  $V_0 = 0.562 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>, l = 260 м, c = 100 H/м, b = 100 H · c/м. Законы изменения координат с большой точностью соответствуют равноускоренному движению – ускорения не успевают измениться на рассматриваемом начальном этапе.

Моделируемый *первый этап* процесса заканчивается соударением колпака с направляющей в некоторый момент времени  $t_1$ . При этом выполняется условие

$$x_{3}(t_{1}) - x_{2}(t_{1}) = \Delta$$
, (5)

где  $\Delta = 0.008$  мм – заданный начальный зазор. Из уравнения (5) численно определяется время  $t_1 = 1.46 \cdot 10^{-4}$  с. Графики на рис. 3 построены в более широком интервале.

Далее начинается *второй этап* процесса выстрела. Колпак и пусковое устройство составляют одно целое, координата  $X_3$  как независимая исчезает, количество уравнений Лагранжа уменьшается до двух. Начальные условия определяются значениями координат и скоростей в конце первого этапа. Численное интегрирование не вызывает проблем. Заканчивается этап вылетом снаряда из ствола в момент времени  $t_2$  с выполнением условия

$$x_1(t_2) + x_2(t_2) = L$$

(L = 0.75 м - длина ствола).

Последний *третий этап* – полет в пространстве. Его нетрудно моделировать, только если пренебречь

(6)

силой тяжести [10]. Иначе необходимо вводить дополнительные координаты по вертикали, учитывать изгиб линя, а также сопротивление воздуха. Это выходит за рамки данной статьи. Важнейшей расчетной величиной является скорость соударения колпака клапана линемета (КК) с направляющей пускового устройства

$$v^* = v_3(t_1) - v_2(t_1) = 108.9 \text{ M/c}$$
 (7)





Расчет этой величины важен для прогнозирования прочности КК [1]. При испытаниях и эксплуатации линемета были случаи разрушения КК. Поэтому проводились поиски особых прочных материалов для КК. Специально для клапана был выбран композиционный материал Хостаформ C27021 с полиформальдегидной матрицей и включениями в виде микросфер [8, 9].

Испытательный стенд. Для экспериментального исследования процессов в линемёте был создан испытательный стенд (рис. 4) [4, 5]. Рассмотрим схему стенда (рис. 5). На ней можно отметить следующие составляющие: 1 – рабочая камера высокого давления; 2 – баллон высокого давления; 3 – пусковой клапан и ПЭК; 4 – запорный элемент (колпак); 5 – ствол; 6 – измеритель скорости пролетного типа (а - первый оптический датчик, б - второй оптический датчик); 7 - уловитель снарядов [16, 17]. Аналоговые датчики давления (II,III,IV) - линейного типа; они соединены с аналогоцифровым преобразователем. Сигналы с него поступают на устройство вывода, обрабатываются, и выдаются в виде графиков. Цифровой датчик высокого давления (I) подключен непосредственно к рабочей камере линемёта и показывает давление в ней.



Рис. 4. Внешний вид испытательного стенда

Работу испытательного стенда можно разделить не несколько последовательных процессов:

- 1. подача электрического сигнала на катушку ПЭК;
- перемещение штока ПЭК подача воздуха на сбросовый клапан;
- 3. открытие сбросового клапана;
- сброс воздуха из-под колпака основного клапана срабатывание основного клапана линемёта;
- 5. разгон снаряда в стволе;
- 6. выход снаряда со среза ствола;
- 7. попадание в уловитель.

После накачивания рабочей камеры и подвода магистрали промышленного давления к пусковому клапану система готова к пуску. Началом отсчета всех процессов является подача электрического сигнала на катушку ПЭК и его запуск. После переключения рабочих полостей распределителя происходит запуск пускового клапана, который открывает сбросовое отверстие полости, соединенной с основным клапаном линемёта. Система начинает сбрасывать воздух из-под колпака. В определенный момент, когда давление под колпаком становится примерно в 3 раза меньше рабочего давления, происходит открытие клапана линемёта, снаряд приобретает импульс и начинает двигаться по стволу [18, 19]. При пролете над измерителем скорости первый и второй оптический датчики фиксируют изменение светового потока, и происходит замер скорости, отражающийся на дисплее. Затем снаряд тормозится уловителем, который представляет собой трубу длиной 1.3 м с толщиной стенки 12 мм, наполненную внутри демпфирующим материалом.

Один из результатов эксперимента: время импульса отдачи, который воздействует на плечо стрелка, напрямую зависит от времени разгона снаряда в стволе. Сократить время можно уменьшением длины ствола. Однако длину ствола можно уменьшать до определенных размеров, чтобы был обеспечен заброс снаряда на нужную длину. По показаниям датчиков II и IV было определено время разгона снаряда в стволе. Экспериментальные данные приведены в табл. 1.



Рис. 5. Схема испытательного стенда

Таблица 1. Врем	ия разгона снаряда в	стволе
-----------------	----------------------	--------

N⁰	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Р, Мпа	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
t, мс	31	23	22	20	18	17	16	15	14	13	13

Скорость на срезе ствола определялась специальным прибором – измерителем скорости пролетного типа, по оптическим датчикам. Результаты приведены в виде графика на рис. 6.

Выводы: рассмотрена конструкция и принцип линемёта ИСТА-240, с помощью уравнений Лагранжа смоделирован выстрел спасательным снарядом и описана динамика системы трех тел. С помощью средств компьютерной математики получены зависимости перемещений тел от времени. Вычислен важный параметр – скорость колпака в момент соударения. Данное значение позволит оптимизировать конструкцию, а также избежать механического разрушения. Сконструирован новый испытательный стенд, на котором получены такие характеристики как – время разгона снаряда в стволе и скорость на срезе ствола.





Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Минобрнауки России. Коды проектов: № 933-2014, № 1972-2014.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Воротов, А.В. Расчет типовых элементов пневмогидравлических систем / А.В. Воротов, Е.Л. Бусыгина, Н.В. Митюков // Вестник КИГИТ. 2011. № 5(18). С. 32–36.
- Григорьев, В.В. Газодинамическое исследование пневматического линемета / В.В. Григорьев, С.Н. Исаков, Р.Л. Петров, С.В. Юркин // Журнал технической физики. СПб. 2006. С.75-81.
- Елисеев, В.В. Механика упругих тел. СПб, Изд-во СПбГПУ, 2003. 336 с.
- Ефремов, А.К. Проблемы стендовых механических испытаний приборных устройств / А.К. Ефремов, С.В. Коршу-

нок, В.А. Пылаев // Современные проблемы машиностроения. – М., МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. С. 95–104.

- Испытательная техника. Справочник: в 2 кн. / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982. 560 с.
- 6. *Кирьянов, Д.В.* Mathcad 14. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 704 с.
- Колесников, К.С. Машиностроение. Энциклопедия. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. – Т. 1-3. Кн. 1 / К.С. Колесников, Д.А. Александров, В.К. Асташев. – М.: Машиностроение, 1994. 534 с.
- Кравчук, А.С. Механика полимерных и композиционных материалов / А.С. Кравчук, В.П. Майборода, Ю.С. Уржумцев. – М.: Наука, 1985. 304 с.
- Кристенсен, Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 336 с.
- Kharitonov, A.M. Aerothermodynamics of expert ballistic vehicle at hypersonic speeds / A.M. Kharitonov, N.P. Adamov, V.F. Chirkashenko et al. // Progress in flight physics. - M., 2011. 608 p.
- Математическая модель гидропневмоавтоматики: Отчет о НИР (заключ.) / Камский ин-т гуманитарных и инженерных технологий. КИГИТ; рук. Митюков Н.В. Ижевск, 2010. 53 с. Инв. № 50- 2009.
- Митюков, Н.В. Внутренняя баллистика дульнозарядных гладкоствольных орудий / Н.В. Митюков, К.Р. Крауфорд, Е.Л. Бусыгина и др. // Химическая физика и мезоскопия. 2012. Т. 14, № 3. С. 371–375.
- Надежность и эффективность в технике: Справочник: в 10 т. Т. 6.: Экспериментальная отработка и испытания / Под ред. *Р.С. Судакова, О. И. Тескина.* – М.: Машиностроение, 1989. 376 с.
- Пановко, Я.Г. Введение в теорию механического удара. М.: Наука, 1977. 224 с.
- Пискунов, В.А. О прочности конструктивных элементов пневматического линемета // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 4-й Междун. науч.-практ. конф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 308.
- Попов, А.Н. Пневматический ударный стенд / А.Н. Попов, В.В. Кузнецова, Ю.В. Никитина // XLIII неделя науки СПбГПУ: мат-лы научно-практ. конф. с междун. уч. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. С. 366.
- 17. РД 24.200.11-90 Правила проведения пневматических испытаний изделий на прочность и герметичность.
- Родыгин, М.П. Модель пневматической установки для ударных испытаний // Новый университет. Серия: технические науки. – Йошкар-Ола. 2014. № 05-06. С. 58-80.
- Самигуллин, Г.Х. Стенд для проведения пневматических испытаний / Г.Х. Самигуллин, Г.Г. Попов // Компрессорная техника и пневматика. 2015. №6. С. 21.
- Трофимов, В.Н. Пневматическое оружие. Справочник. М.: ДАИРС, 2006. 175 с.

# RESCUE LINE-THROWERS: MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL RESEARCHES

©2016 V.V. Eliseev, V.A. Piskunov Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

The mathematical model of a line-thrower during the shot is considered. The shell with the line is the body with the variable mass. The Lagrange equations are derived and solved numerically. The results of the experimental studies are shown as the dependences of pressure obtained from the sensors of the laboratory test rig.

Key words: pneumatic line-thrower, Lagrange equations, computer mathematics, shot, test rig

Vladimir Eliseev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor. E-mail: yeliseyev@inbox.ru; Vladimir Piskunov, Post-graduate Student. E-mail: vildan.05@mail.ru