

УДК 629.735.33

А.В. АМБРОЖЕВИЧ<sup>1</sup>, И.Ю. ДОЛЖЕНКО<sup>1</sup>, А.В. КОЛОМИЙЦЕВ<sup>2</sup>,  
С.Н. ЛАРЬКОВ<sup>3</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*<sup>2</sup> *Харьковский НИИ судебных экспертиз им. Засл. проф. Н.С. Бокариуса, Украина*<sup>3</sup> *ПО «Коммунар», Украина*

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА ИМПУЛЬСНЫХ ТЕПЛОВЫХ МАШИН С ГАЗООБРАЗНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

Приведена методика получения оценок энергетического совершенства ствольных пусковых устройств на основании общих подходов теории размерности и подобия. Рассмотрен анализ графических результатов исследования, а также место в нем собственных разработок. Показано, что предложенные критериальные оценки дают основания пересмотреть место и роль пневматических метательных устройств низкого поперечного давления (гранатометов и капсулометов). Представлен на примерах тот факт, что использование критериев подобия на ранних стадиях процесса проектирования дает возможность исключить тупиковые направления разработок.

**Ключевые слова:** теория подобия и размерности, метод оценки энергетического совершенства, критерии подобия, пиротехнические и пневматические метательные устройства.

### Введение

Переход от интуитивных форм творчества к интенсивным системным формам разработки новых объектов техники предполагает наличие средств анализа опыта, накопленного в соответствующих областях, с целью целенаправленного использования имеющихся достижений при решении новых задач синтеза.

Универсальной логической основой для формализации соответствующих поисковых работ является использование подходов теории подобия и размерности, обеспечивающих проведение сопоставительного анализа обширных многообразий известных технических решений.

В качестве примера можно привести метод критериальных оценок энергетического совершенства транспортных систем с различными способами ввода в полет и траекторного поддержания летательных аппаратов, описанный в [1 – 4], а также общие правила размерностей и подобия, рассмотренные в [5].

В предлагаемой статье такого рода принцип решения новых задач проектирования расширен на область метательных устройств на основе импульсных тепловых машин объемного типа с газообразным рабочим телом, имеющую, как известно, обширные традиции.

Предпосылками для обобщения являются, с одной стороны, близкая физическая природа рабочего процесса, а с другой – сходные полезные функции.

### 1. Пространство критериальных оценок энергетического совершенства метательных устройств

В качестве основного критерия подобия можно выбрать коэффициент полезного действия (КПД), который для любых механических систем может быть вычислен по формуле общего вида:

$$\eta = \frac{E_k}{E_p}, \quad (1)$$

где  $E_k$ ,  $E_p$  – полезная и затраченная энергии соответственно.

Частные формы (1) определяются способом получения энергии рабочего тела метательного устройства.

1.1. Адаптация определения КПД (1) к условиям процесса в пиротехнических метательных устройствах активного типа приводит к критерию подобия следующего вида:

$$\eta = \frac{E_k}{E_p} = \frac{M \cdot w_0^2}{2 \cdot Q_p \cdot M_p} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $E_k$  – начальная кинетическая энергия метаемого снаряда;  $E_p$  – потенциальная энергия заряда метательного взрывчатого вещества;  $M$  – масса снаряда;  $w_0$  – дульная скорость;  $Q_p$  и  $M_p$  – удельная теплотворная способность и масса порохового заряда.

1.2. В случае пневматических метательных устройств с накоплением энергии сжатия упругих

элементов конструкции, передаваемой газообразному рабочему телу, выражение КПД (1) принимает форму:

$$\eta = \frac{M \cdot w_0^2}{2 \cdot k \cdot P_m} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $k$  и  $P_m$  – жесткость и максимальная рабочая деформация пружины поршневого компрессора.

1.3. Принцип действия пневматических газобаллонных систем в рамках представлений (1) отображается следующим критериальным комплексом:

$$\eta = \frac{M \cdot w_0^2}{2 \cdot P \cdot (V_2 - V_1)} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $V_2, V_1$  – конечный и начальный объемы камеры поршневого компрессора соответственно;  $P$  – начальное давление в цилиндре компрессора.

1.4. С позиций теории размерности и подобия могут быть переосмыслены классические понятия баллистики, например, могущество [6] (размерная величина). Для получения критерия подобия, включающего в себя могущество, может быть использовано, например, представление об удельной внутрибаллистической работе, производимой максимальным поперечным давлением. Сформированный таким образом критерий могущества, который также следует рассматривать в качестве частного случая КПД (1):

$$\eta_m = \frac{M \cdot w_0^2}{2d^3} \frac{1}{P_{\max} \cdot \bar{L}}, \quad (5)$$

где  $\frac{M \cdot w_0^2}{2d^3}$  – могущество;  $P_{\max}$  – максимальное поперечное давление;  $d$  – калибр;  $\bar{L}$  – длина ствола в калибрах, позволяет сопоставить дульную энергию с соответствующей интенсивностью внутрибаллистического процесса. Критерий могущества (4) может быть использован для оценки шумового эффекта выстрела (интенсивности ударной волны), исходя из значений свойственных поперечных давлений и габаритных соотношений, а также напряженно-деформированного состояния конструкции. Универсальность критерия могущества обусловлена абстрагированием от способа получения поперечного давления, что обеспечивает равноценную применимость (5) при получении сравнительных оценок пиротехнических и пневматических ствольных систем.

Исходя из видовой и классификационной специфики метательных устройств, в качестве второй компоненты пространства критериальных оценок (2) – (5) может применяться длина ствола в калибрах.

## 2. Метод анализа критериальных оценок совершенства метательных устройств

Примеры применения оценок совершенства технических решений (2) – (5), овеществленных в выборке известных образцов пиротехнических и пневматических ствольных метательных устройств [7 – 15], представлены на рис. 1 – 3 в виде диаграмм.

В классе пиротехнических устройств рассмотрены главным образом системы низкого давления: активные гранатометы, минометы, винтовочные мортирки, пистолеты, гладкоствольные ружья. На рис. 3 для сравнения приведены также критериальные оценки систем высокого давления в классе штурмовых винтовок. Калориметрические свойства порохов заданы согласно [6].

В классе пневматических систем приведены оценки в группе пружинно-поршневых винтовок, а также гладкоствольного газобаллонного пускового устройства низкого давления ПУ-1 [16].

Некоторые аналитические возможности представленного метода критериальных оценок могут быть продемонстрированы на основе ряда выводов, непосредственным образом вытекающих из полученных результатов.

2.1. Пиротехнические системы с навесной траекторией полета: подствольные гранатометы и унифицированные с ними автономные образцы расположены весьма плотной группой, что объясняется функционально обусловленным единообразием внутрибаллистических характеристик короткоствольных систем низкого давления, выполненных в калибре – 40 мм (рис. 1, 3). Судя по значениям КПД (2) и критерия могущества (5), здесь очевидны преимущества унифицированного семейства активных гранатометов под безгильзовый выстрел ВОГ-25 (ГП-25, ГП-30, ГМ-94, «Пенал»). Приведенные оценки позволяют сделать заключение о высокой эффективности в своем классе внутрибаллистического процесса, осуществляющегося в двух расширительных камерах (высокого и низкого давлений), выполненных в корпусе гранаты. Предложенный вид критериального пространства позволяет также отобразить присущее данному техническому решению улучшение массо-габаритных характеристик.

2.2. В группе автоматических станковых гранатометов (рис. 1), расположенной в верхней части диаграммы, повышенное баллистическое совершенство достигается ценой роста массы конструкции и тем самым определяет свойственные функциональные ограничения.

2.3. В классе минометов отчетливо проявляется расслоение на группы высокой и низкой баллистики, что практически совпадает с разделением по

конструктивным признакам на дульно- и казнозарядные системы (рис. 1).

2.4. Критериальные оценки (2) позволяют также устанавливать проявление свойств атипичных образцов. Например, единственный в своем роде автоматический миномет 2Б9М «Василек» нельзя отнести к системам с высоким энергетическим совершенством, что следует рассматривать в качестве платы за автоматизацию процесса выстрела.

2.5. Расслоение на выраженные группы в классе дробовых ружей объясняется различием в энергетике применяемых боеприпасов (рис. 1). Наибольшее энергетическое совершенство присуще группе ружей с максимальным давлением 90-120 МПа, в которых используется усиленный патрон типа «magnum» с увеличенной до 76 мм длиной гильзы (Benelli, Gold Hunter, Сайга 12 и др.). Оценки, локализованные в нижней части диаграммы, относятся к образцам ружей с длиной патронника не более 70 мм, и максимальным давлением, не превышающим 66,3 МПа.

2.6. Обращают на себя внимание высокие КПД пневматических винтовок (рис. 2). Эффективность преобразования потенциальной энергии в полезную работу обусловлено использованием низкотемпературного рабочего тела, процесс расширения которого не связан с химическими превращениями и не сопровождается интенсивным рассеиванием избыточной тепловой энергии.

2.7. В классе пневматических газобаллонных систем (рис. 3) для стрельбы стальными плакированными шариками кал. 4,5 мм по критерию mogućества (5) наиболее выгодно выглядит группа самозарядных пистолетов, например – МР-654, т.е. короткоствольных конструкций.

Дальнейшее увеличение длины ствола в данном классе (ИЖ-67 «Корнет», МР-661 «Дрозд», «Crossman-357» и др.) не является эффективным фактором наращивания баллистических возможностей и должно рассматриваться как средство обеспечения имитационно-эргономических условий проектирования.

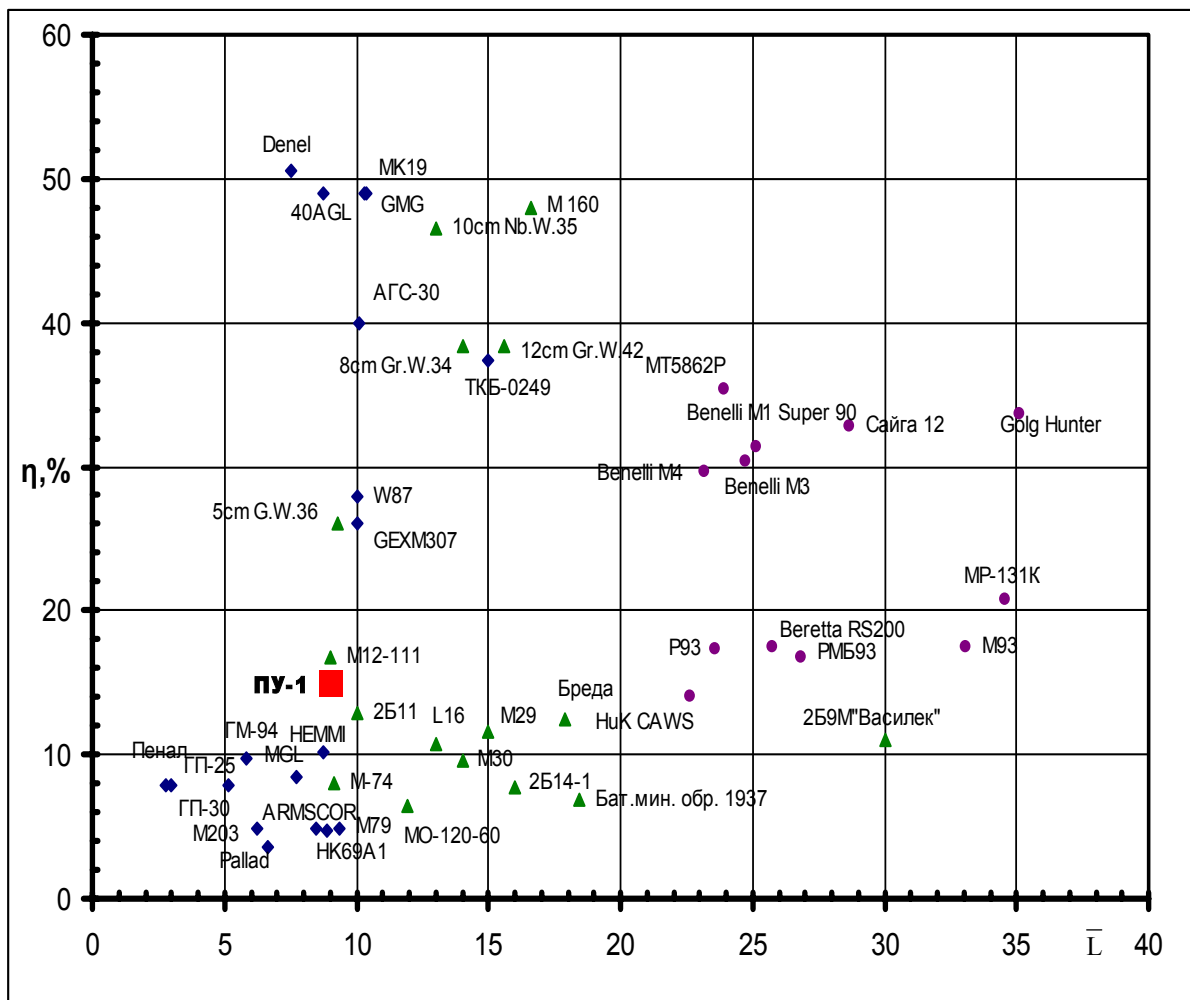


Рис. 1. Оценка энергетического совершенства ствольных пусковых устройств низкого поперечного давления:

◆ – гранатометы, ▲ – минометы, ● – гладкоствольные ружья, ■ – ПУ-1

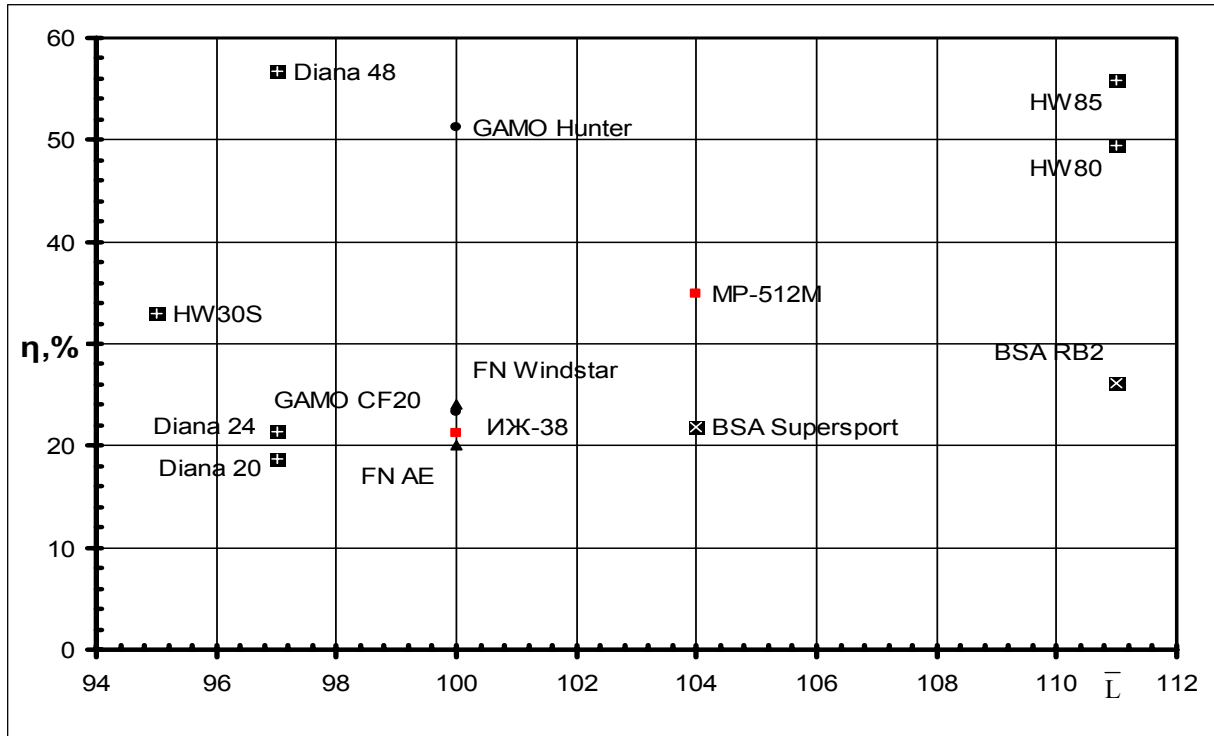


Рис. 2. Оценка энергетического совершенства длинноствольных пневматических винтовок:

■ – Германия, ■ – Россия, ⊠ – Великобритания, ▲ – Бельгия, ● – Испания

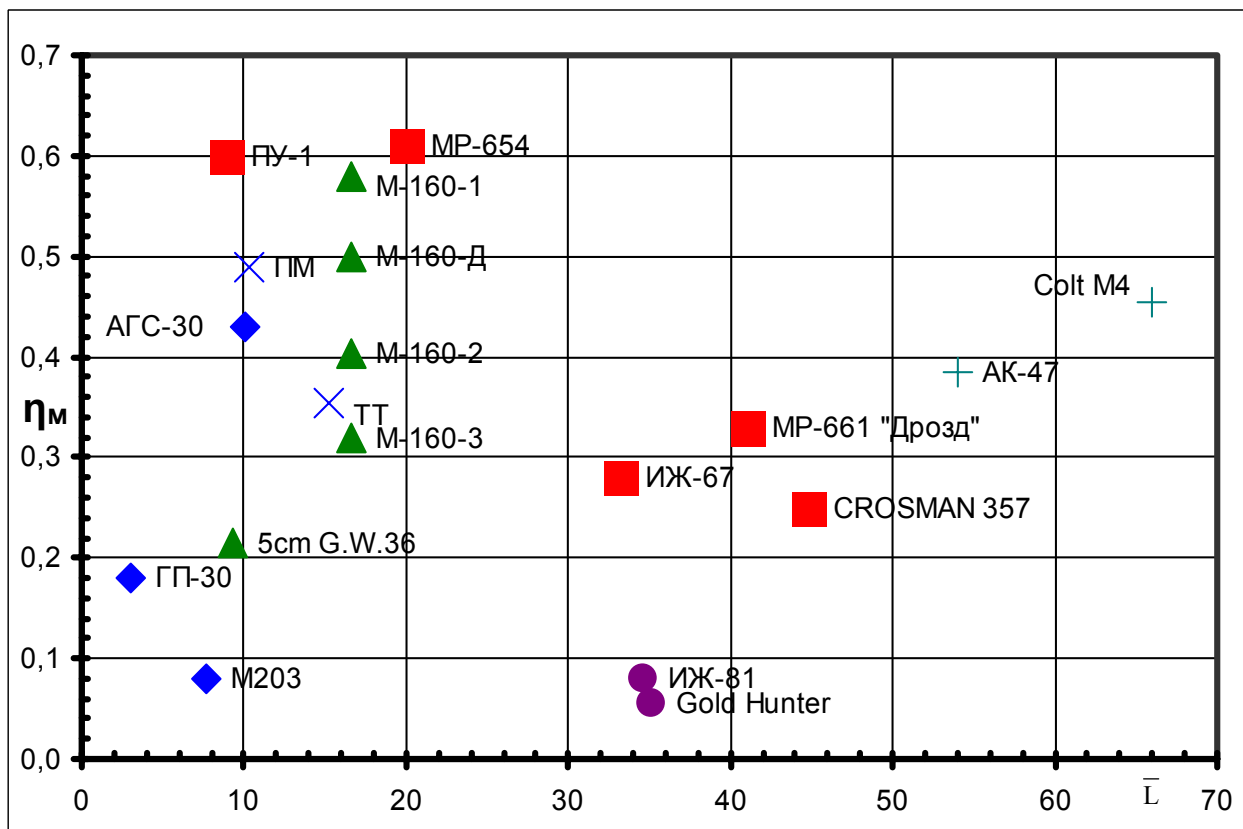


Рис. 3. Критерий могущества ствольных пусковых устройств:

◆ – гранатометы, ▲ – минометы, ● – гладкоствольные ружья, ■ – газобаллонные системы, × – pistols, + – штурмовые винтовки

2.8. Судя по критериальным оценкам (2), (4), (5), газобаллонная гладкоствольная система низкого поперечного давления ПУ-1, предназначенная для метания снаряда калибра 30 мм за счет одноразового срабатывания энергии стандартного углекислотного баллона, выгодно отличается от пиротехнических аналогов. В пространстве «критерий могущества – относительное удлинение ствола» данная система подобна самозарядным газобаллонным пистолетам (см. п. 2.7). Многократное превосходство по критерию могущества (5) является основанием к пересмотру господствующих в настоящее время пиротехнических традиций в группе малозумных ручных активных гранатометов и капсулометов.

### Заключение

1. Критерии подобия (2) – (5) предназначены для получения априорных оценок на ранних стадиях проектирования и решения широкого спектра экспертных задач, систематизации известных образцов, выявления перспективных тенденций и прогнозирования направлений развития и др.

2. Использование критериев (2) – (5) на ранних стадиях процесса проектирования дает возможность исключить тупиковые направления разработок.

3. Предложенные критериальные пространства позволяют выявлять уникальные проектные решения в меру присущих им аномальных свойств.

4. Критериальные оценки (2), (5) дают основание для пересмотра места и роли пневматических метательных устройств низкого поперечного давления (гранатометов и капсулометов) ввиду более адекватных внутрибаллистических характеристик по отношению к господствующим в данной области пиротехническим системам.

### Литература

1. Амброжевич М.В. Критериальные оценки транспортного совершенства летательных аппаратов с баллистическими и орбитальными траекториями полета / М.В. Амброжевич, А.С. Карташев, С.А. Яшин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 4(30). – С. 25-30.

2. Амброжевич М.В. Критериальные оценки энергетического совершенства атмосферных

ракетных летательных аппаратов / М.В. Амброжевич, А.С. Карташев, С.А. Яшин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 5(31). – С. 21-29.

3. Амброжевич М.В. Критериальные оценки транспортного и скоростного совершенства аэродинамических летательных аппаратов / М.В. Амброжевич, А.С. Карташев, С.А. Яшин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 6(32). – С. 19-23.

4. Авилов И.С. Критериальные оценки энергетического совершенства пусковых устройств легких беспилотных летательных аппаратов / И.С. Авилов, А.В. Амброжевич, В.А. Середа // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 2(38). – С. 15-19.

5. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1977. – 440 с.

6. Серебряков М.Е. Физический закон горения во внутренней баллистике / М.Е. Серебряков. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1940. – 216 с.

7. Мураховский В.И. Оружие пехоты: Справочник / В.И. Мураховский, С.Л. Федосеев. – М.: Арсенал-Пресс, 1992. – 390 с.

8. Суров О.А. Противопехотные гранатометы и боеприпасы к ним / О.А. Суров // *Зарубежное военное обозрение*. – 1986. – № 4. – С. 31-35.

9. Данилин Г.А. Огородников В.П., Заволокин А.Б. Основы проектирования патронов к стрелковому оружию: учебник / Г.А. Данилин, В.П. Огородников, А.Б. Заволокин. – СПб.: Балтийский государственный университет, 2005. – 374 с.

10. Шунков В.Н. Энциклопедия новейшего стрелкового оружия / В.Н. Шунков. – М.: АСТ, 2006. – 560 с.

11. Шунков В.Н. Артиллерия / В.Н. Шунков. – Мн.: Попурри, 2001. – 704 с.

12. Шунков В.Н. Газовое и пневматическое оружие / В.Н. Шунков. – Мн.: Попурри, 2004. – 512 с.

13. Блюм М.М. Охотничье ружье: Справочник / М.М. Блюм, И.Б. Шишкин. – М.: Экология, 1994. – 560 с.

14. Широкопад А.Б. Отечественные минометы и реактивная артиллерия / А.Б. Широкопад. – Мн.: Харвест, 2000. – 464 с.

15. Широкопад А.Б. Бог войны третьего Рейха / А.Б. Широкопад. – М.: АСТ, 2003. – 576 с.

Поступила в редакцию 22.04.2008

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры 205 А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**МЕТОД ОЦІНКИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ДОСКОНАЛОСТІ ІМПУЛЬСНИХ ТЕПЛОВИХ МАШИН  
З ГАЗОПОДІБНИМ РОБОЧИМ ТІЛОМ**

*О.В. Амброжевич, І.Ю. Долженко, О.В. Коломійцев, С.М. Ларьков*

Наведено методику одержання оцінок енергетичної досконалості ствольних пускових пристроїв на підставі загальних підходів теорії розмірності й подібностей. Розглянуто аналіз графічних результатів дослідження, а також місце в ньому власних розробок. Показано, що запропоновані критеріальні оцінки дають підстави переглянути місце й роль пневматичних металевих пристроїв низького поперечного тиску (гранатометів і капсулометів). Представлений на прикладах той факт, що використання критеріїв подібності на ранніх стадіях процесу проектування дає можливість виключити тупикові напрямки розробок.

**Ключові слова:** теорія подібності й розмірності, метод оцінки енергетичної досконалості, критерії подібності, піротехнічні й пневматичні металеві пристрої.

**METHOD OF AN ESTIMATION OF POWER PERFECTION OF PULSE THERMAL MACHINES  
WITH A GASEOUS WORKING BODY**

*A.V. Ambrozhevitch, I.Y. Dolzhenko, A.V. Kolomijetcev, S.N. Larkov*

The technique of approach of estimations of power perfection barrel launchers is resulted on the basis of the general approaches of the theory of dimension and similarity. The analysis of graphic results of research, and also a place in it of own development is considered. It is shown, that offered criteria estimations give the basis to reconsider a place and a role of pneumatic launchers of low cross-section pressure class (grenade launchers and capsule launchers). That fact is represented on examples, which use the criteria of similarity at early stages of process of designing enables to exclude deadlock directions of development.

**Key words:** theory of dimension and similarity, approach of estimations of power perfection, criterions of similarity, pyrotechnic and pneumatic launchers.

**Амброжевич Александр Владимирович** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедри ракетних двигателів Національного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Долженко Иван Юрьевич** – аспирант кафедри ракетних двигателів Національного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина,

**Коломійцев Александр Викторович** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник харьковского научно-исследовательского института судебных экспертиз имени Засл. проф. Н.С. Бокариуса, Харьков, Украина.

**Ларьков Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, главный технолог, Производственное объединение «Коммунар», Харьков, Украина.