

УДК 623.454.257.4

Термоэлектрический генератор для МЭМС-взрывателя

Ефремов А. К.^{1,*}, Власов К. В.¹

^{*}efrak@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассматривается структурная схема взрывателя, содержащего микроэлектромеханические системы (МЭМС). Проведен анализ возможных источников питания для электрических узлов и выбран автономный термоэлектрический генератор (ТЭГ), обладающий рядом преимуществ по сравнению с другими типами. Показано, что перепад температуры между холодными и горячими спаями, необходимый для создания термоЭДС, может быть обеспечен за счет аэродинамического нагрева корпуса снаряда на траектории. Предложены математическая модель формирования температурного поля на корпусе снаряда и методика расчета выходного сигнала ТЭГ. Приведен пример расчета для конкретного боеприпаса (снаряд 57-мм зенитной пушки С-60), параметры ТЭГ выбраны исходя из требований к безотказности исполнительного элемента огневой цепи взрывателя.

Ключевые слова: структурная схема взрывателя, микроэлектромеханические системы (МЭМС), автономный термоэлектрический генератор (ТЭГ), аэродинамический нагрев снаряда, перепад температур на спаях

Введение

Структурная схема взрывателя как автоматического устройства, предназначенного для приведения в действие боеприпаса, содержит инициирующую систему (ИС), огневую цепь (ОЦ) и систему предохранения (СП). Принцип действия взрывателя определяет ИС – активная составная часть, включающая в себя датчик цели (сенсор) и вырабатывающая команду на запуск ОЦ. На выходе последней формируется детонационный или огневой исполнительный импульс. СП должна обеспечить безопасность взрывателя в условиях эксплуатации и надежное взведение при выстреле (пуске), т.е. подготовить его к исполнению управляющей функции [1].

К достоинствам электромеханических взрывателей относят высокую чувствительность и быстродействие, возможность адаптации к условиям встречи с целью, уменьшение числа подвижных элементов, а также 100%-ный контроль электрических частей в процессе производства.

Автономный источник питания (ИП) – неотъемлемая часть взрывателей, содержащих электрические цепи. Возможны два варианта подготовки электрической системы взрывателя к срабатыванию:

1) при выстреле ИП заряжает накопитель энергии, который при встрече с преградой, после получения сигнала от датчика цели, инициирует запуск огневой цепи взрывателя путем разрядки накопителя через исполнительный элемент – электровоспламенитель или электродетонатор;

2) ИП, как составная часть более сложного устройства – предохранительно-исполнительного механизма (ПИМ), вырабатывает выходной сигнал, необходимый для управления работой электронных логических элементов.

В обоих случаях рабочий уровень управляющего сигнала должен быть достигнут в пределах времени дальнего взведения, определяемого типом боеприпаса.

Перспективным направлением разработки взрывателей является создание микроэлектромеханических систем (МЭМС), обладающих расширенными функциональными возможностями и устойчивых к воздействию помех и внешних дестабилизирующих факторов. В качестве элементов коммутации электрической цепи могут быть использованы микроакселерометры и микроключи (нормально замкнутые или разомкнутые) балочного типа, срабатывающие при заданном уровне перегрузки и включающие (или отключающие) соответствующие функциональные блоки взрывателя. Специфические преимущества МЭМС сводятся к следующему [2-4]:

- малый разброс параметров благодаря изготовлению компонентов в едином технологическом цикле и возможность компенсации схемотехническими или конструкторскими методами;

- высокая повторяемость свойств, что достигается применением апробированных технологических процессов и отсутствием сборочных операций;

- микроминиатюрность (габаритные размеры значительно меньше по сравнению с традиционными дискретными устройствами);

- высокая функциональность за счет интеграции сенсоров, схем обработки и исполнительных механизмов в едином однокорпусном устройстве, сопоставимом по габаритам с интегральными микросхемами (ИМС);

- улучшенные характеристики функционирования благодаря высокой точности исполнения;

- повышенная надежность и устойчивость по отношению к внешним воздействиям по сравнению с дискретными элементами и узлами;

- низкая стоимость по сравнению с устройствами, построенными без применения интегральной технологии.

Следует, однако, отметить, что, как и в случае ИМС, технология МЭМС требует довольно сложного и дорогого оборудования и оправдывает себя лишь при достаточных объемах выпуска.

Важная роль в структуре МЭМС-взрывателей принадлежит эффективному автономному источнику питания. В данной работе рассматривается возможность создания такого его варианта, как термоэлектрический генератор (ТЭГ) с аэродинамическим

нагревом горячих спаев за счет использования тепла, образующегося в результате трения корпуса снаряда о поток набегающего воздуха на траектории. Для количественной оценки данного процесса необходимо определить параметры движения снаряда в канале ствола орудия и в воздушной среде с помощью методов внутренней и внешней баллистики [1, 5-7]. Важнейшими начальными параметрами траектории являются дульная скорость и частота вращения снаряда, эти начальные данные в дальнейшем используются для количественного описания процесса нагрева корпуса снаряда на траектории и оценки работоспособность ТЭГ. При этом важно определить момент начала генерации сигнала и выхода его на рабочий режим, т.е. длительность процесса дальнего взведения взрывателя.

Структурная схема МЭМС-взрывателя с ИП в виде ТЭГ представлена на рис. 1, где помимо упомянутых выше элементов показаны система самоликвидации (СЛ), механизм дальнего взведения (МДВ) и элемент огневой цепи – электродетонатор (ЭД); К1...К5 – микроключи.

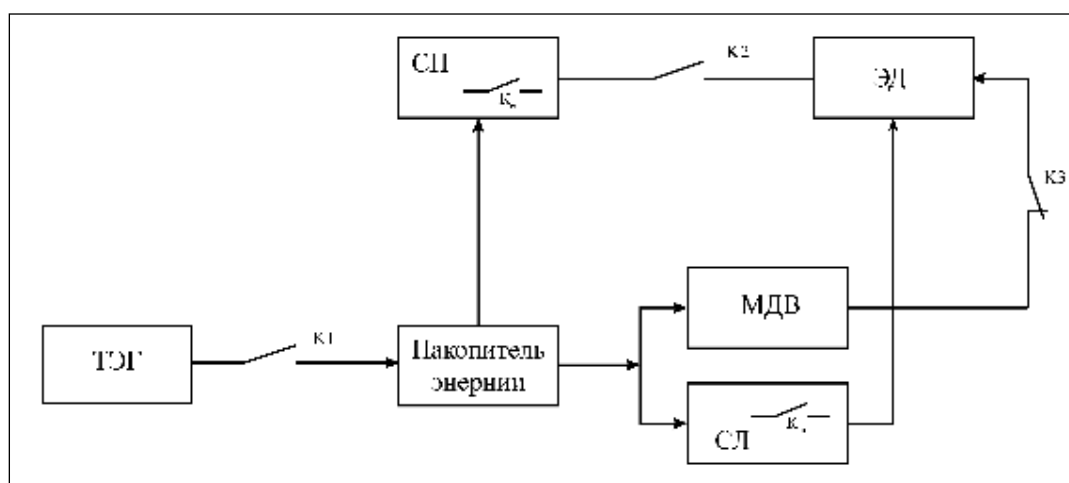


Рис. 1. Структурная схема МЭМС-взрывателя

В работе приведена методика расчета ТЭГ и представлены результаты его исследования на примере конкретной артиллерийской системы – 57-мм зенитной пушки С-60.

1. Постановка задачи

Некоторые разновидности источников питания взрывателей, в структуре которых имеются электрические и электронные узлы, обладают недостатками. К их числу, например, относятся аккумуляторные батареи (ограниченные сроки хранения и необходимость перезарядки), топливные элементы (низкий к.п.д. и непригодность для вращающихся боеприпасов) и радиоизотопные элементы (необходимость соблюдения радиационной безопасности). Более перспективными считаются «резервные» тепловые и ампульные аккумуляторные батареи, которые допускают длительное хранение, а время активации (вывода из инертного состояния) можно довести до 25 мс, что соответствует требованиям по времени дальнего взведения взрывателей для артиллерийских снарядов.

Ведутся работы по созданию электромагнитных генераторов, приводимых в действие потоком воздуха, который поступает в специальный патрубок (воздухозаборник) [8]. Из нехимических ИП особо выделяют пьезоэлектрические и магнитоупругие [9, 10].

Разработка термоэлектрических генераторов применительно к взрывателям ведется по двум направлениям [11, 12]: 1) преобразование энергии аэродинамического нагрева боеприпасов на траектории в электрическую энергию; 2) использование в качестве источника тепловой энергии запала, срабатывающего от капсюля-воспламенителя в момент артиллерийского выстрела или пуска ракеты. В предлагаемой работе рассматривается первый вариант.

Вопросы, связанные с использованием термоэлектричества, изложены в фундаментальной работе [13], где также проанализирована история развития данного научно-технического направления.

Авторами был проведен патентный поиск в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96. Так, объектом изобретения по патенту US3088988 (Германия, 1958 г.) является электрический источник питания в ракетах (рис. 2). В носовой части расположены датчики (блок термопар), выполняющие преобразования тепла от аэродинамического нагрева в электрическую энергию, при необходимом градиенте температуры.

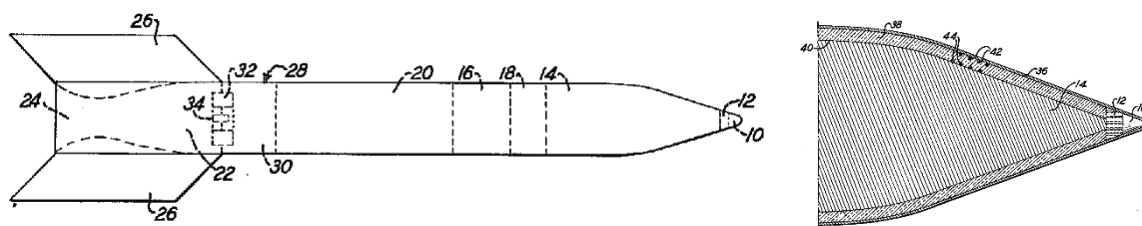


Рис. 2. Ракета и разрез носовой части

На рис. 3 представлен артиллерийский снаряд с термоэлектрическим энергетическим устройством (патент США US3946675, 1976 г.).

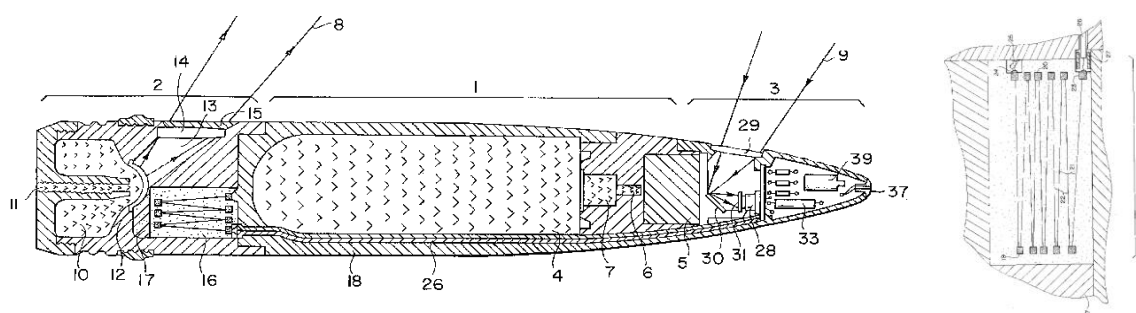


Рис. 3. Снаряд и термоэлектрическое устройство

Снаряд структурно включает эффективную часть (1), ИК-систему наведения (2) и приемное устройство (3). Активация источника тепла происходит в момент вылета

снаряда из канала ствола. Устройство 16 – генератор, состоящий из ряда последовательно соединенных термопар, горячие спаи которых нагреваются пиротехническим зарядом 10 через пластину 17, обеспечивающую равномерное распределение температуры. Генератор включается по истечении заданного времени дальнего взведения.

На рис. 4 показан термоэлектрический генератор для боеголовки (патент США US4372211, 1983 г.) с пиротехническим источником тепла. Указывается, что генерируемое напряжение формируется на емкостном накопителе и может быть использовано для управления электронными устройствами, а также для инициирования огневой цепи взрывателя.

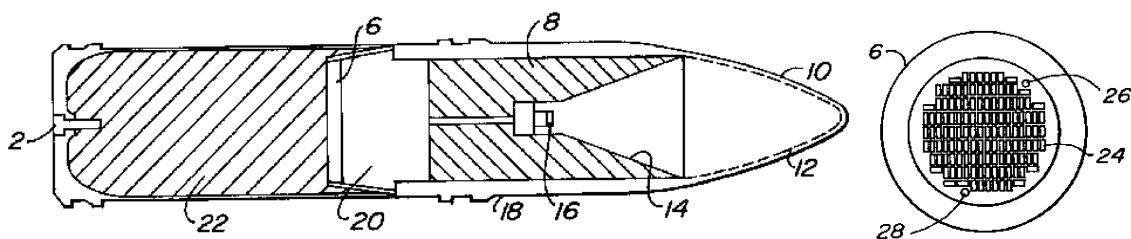


Рис. 4. Генератор и блок термоэлементов

В рамках предлагаемой работы рассматриваются следующие задачи:

- 1) создание математической модели преобразования тепла, поступающего от источника, в электрический сигнал на выходе термогенератора;
- 2) определение начальных и текущих параметров траектории снаряда;
- 3) исследование распределения динамического температурного поля в головной части снаряда (в местах расположения горячих спаев термопар);
- 4) расчет выходного сигнала термоэлектрогенератора.

Следует отметить, что требования к времени активации генератора могут быть различными в зависимости от типа снаряда, например системы ближнего боя (десятки мс) или ракеты (до единиц секунд).

2. Нагрев головной части снаряда

2.1. Нагрев снаряда при выстреле

Вопрос о нагреве артиллерийского снаряда при выстреле практически не изучен. Во внутренней баллистике обычно рассматривается лишь процесс теплообмена между пороховыми газами и стенками канала ствола, при этом влиянием нагрева ствола за счет врезания и трения ведущего пояска пренебрегают [14]. При разработке корпуса снаряда и оценке его прочности при выстреле наибольший интерес представляет максимальное давление пороховых газов, а температура корпуса не учитывается, поскольку она заведомо меньше той, которая может оказать дестабилизирующее воздействие на боевой заряд.

В работе [15] выделены два этапа формирования температурного поля на корпусе снаряда. Первый этап – нагрев снаряда во время движения по каналу ствола, основным фактором при этом является поверхностное и объемное тепловыделение в ведущем пояске, температура которого в момент выхода снаряда из ствола может достигать 800...1000 К. Отметим, что с точки зрения функционирования ТЭГ именно этот этап является решающим, теплопередачей к корпусу от пороховых газов можно, по-видимому, пренебречь, учитывая скоротечность процесса выстрела (единицы мс). Второй этап характеризуется аэродинамическим нагревом снаряда в процессе его движения на траектории (см. ниже).

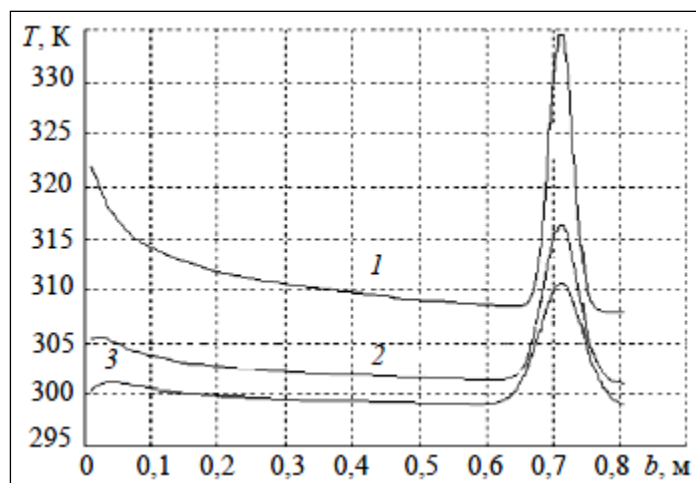


Рис. 5. Температурное поле вдоль корпуса 152-мм снаряда

На рис. 5 представлен полученный в результате математического моделирования график распределения нестационарного температурного поля вдоль поверхности 152-мм снаряда [15], где кривая 1 соответствует 10 с полета, кривая 2 – 30 с, кривая 3 – 50 с. Ведущий поясок удален от головной части снаряда на 0,7 м. Таким образом, формируются две зоны повышенной температуры: головная часть снаряда, нагреваемая трением набегающего потока воздуха, и зона ведущего пояска. Согласно рис. 5, температура ведущего пояска в течение 10 с снижается от 800...1000 К до 340 К.

2.2. Аэродинамический нагрев

Вопросы, связанные с исследованием аэродинамического нагрева артиллерийских снарядов, рассматриваются в известных источниках недостаточно полно. Последующий материал базируется главным образом на работах [11, 12, 16-18].

Воздушный поток, обтекая поверхность снаряда, вследствие сжатия и трения тормозится. Максимальная температура нагрева поверхности снаряда формируется в головной части, в точке с координатой $x = 0$ (ось x направлена вдоль оси снаряда), которая называется критической. Далее поток вдоль корпуса постепенно ускоряется, а давление и температура постепенно уменьшаются. Интенсивность обмена тепловой

энергией между воздушным потоком и поверхностью снаряда характеризуется удельным тепловым потоком [16]

$$q_{aэp} = q_k + q_{изл},$$

где q_k – удельный конвективный тепловой поток от пограничного слоя к поверхности тела, зависящий от скорости снаряда (числа Маха); $q_{изл}$ – удельный тепловой поток от поверхности тела во внешнюю среду. При расчете температурного поля в области головной части снаряда ограничимся рассмотрением процесса нагрева в рамках одномерной задачи теплопроводности, считая, что теплофизические характеристики материалов не зависят от температуры. В этом случае зависимость температуры корпуса снаряда от времени может быть найдена в результате решения уравнения теплового баланса [17]

$$c_0 \gamma \delta \frac{dT_w}{dt} = q_k - q_{изл}, \quad (1)$$

где c_0 – удельная теплоемкость материала; γ – плотность материала; δ – толщина стенки; T_w – средняя по толщине температура поверхности стенки; dT_w/dt – градиент температуры корпуса снаряда, характеризующий процесс теплообмена на поверхности снаряда.

Величина q_k зависит от состава и параметров обтекающего газа, режима его течения в пограничном слое, а также от того, сопровождается ли теплообмен между газом и поверхностью тела массообменом. В области критической точки конвективный тепловой поток характеризуется ламинарным пограничным слоем и определяется по следующей приближенной зависимости [18]

$$q_{ксл}^{лам} = \frac{2.0 \cdot 10^{-4} V_\tau^3(t) \rho_{возд}^{0.5}}{R^{0.5}} \left(1 - \frac{T_w}{T_{возд}} \right) \quad (2)$$

где R – радиус сферического притупления в критической точке; $\rho_{возд}$ – плотность воздуха; $V_\tau(t)$ – виртуальная скорость снаряда [6, 7].

Удельный тепловой поток при обмене между воздухом и поверхностью тела [18]

$$q_{изл} = \sigma \varepsilon T_w^4, \quad (3)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, ε – коэффициент черноты поверхности.

Таким образом, получаем расчетную формулу в окончательном виде

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{q_k - \sigma \varepsilon T_w^4}{c_0 \gamma \delta}, \quad (4)$$

где q_k определяется по (2). В результате численного интегрирования данного уравнения можно рассчитать изменение температуры корпуса вдоль траектории полета при принятых допущениях.

3. Математическая модель термоэлектрического генератора

Математическая модель ТЭГ описывает процесс преобразования тепла, поступающего от источника (температурное поле в головной части снаряда), в электрический выходной сигнал. Принимая приближенный метод расчета, рассматриваем теплоемкости частей элемента как сосредоточенные на краях ветвей термопар. Если к поверхности снаряда и, соответственно, к горячим спаям генератора подводится поток тепла Q_{Γ} при температуре T_w , а от холодного спая отводится поток тепла Q_x при температуре T_x , то под действием возникшего перепада температур на спаях термоэлемента ΔT , согласно эффекту Зеебека [13], возникает термоЭДС $E_{\Gamma T}$. Структурное представление ТЭГ приведено на рис. 6.

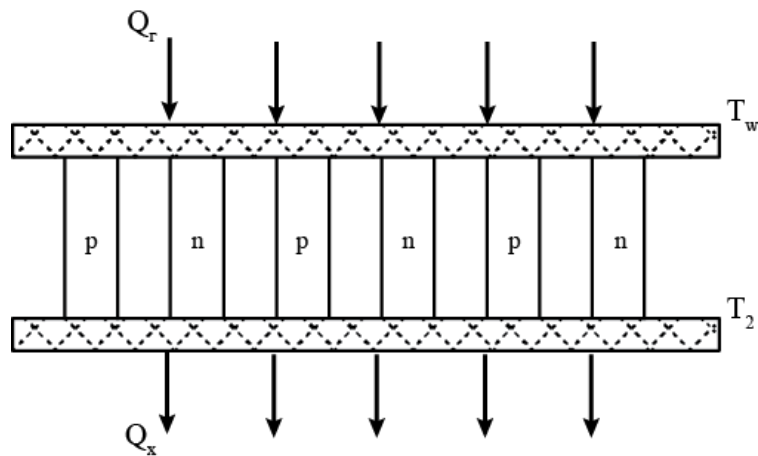


Рис. 6. Структурное представление ТЭГ

В предположении о независимости термоэлектрических параметров от температуры выражение для термоЭДС можно записать в виде

$$E_{\Gamma T} = (\alpha_p + \alpha_n) \Delta T,$$

где α_p , α_n – коэффициенты термоЭДС термостолбиков p - и n - типов проводимости; ΔT – перепад температур [19]. В замкнутой цепи возникает ток I , протекающий через сопротивление R . Следует также учитывать внутреннее сопротивление ТЭГ, складывающееся из сопротивлений каждого термостолбика (соответственно r_p , r_n) и сопротивления коммутации пластины r_k

$$r_{mz} = r_n + r_p + r_k.$$

Величина сопротивлений термостолбиков выражается через геометрические размеры и удельные сопротивления термоэлектрических материалов [19]

$$r_{mz} = \left(\rho_p \frac{l}{s_p} + \rho_n \frac{l}{s_n} \right) (1 + m_p),$$

где ρ_p и ρ_n – удельные сопротивления термостолбиков; l – длина термостолбика; s_p и s_n – площади поперечных сечений термостолбиков; $m_p = r_n / (r_n + r_p)$. Общее сопротивление цепи равно $r_{mz}(1 + \beta)$, где $\beta = R/r_{mz}$. Запишем выражение для тока в цепи ТЭГ

$$I = \frac{E_{TT}}{(1 + \beta)r_{mz}}. \quad (5)$$

Соответственно, рабочее напряжение на нагрузке

$$U = \frac{\beta}{\beta + 1} E_{TT}. \quad (6)$$

С помощью формул (5) и (6) можно получить выражение для мощности выходного сигнала ТЭГ

$$W_{TT} = U \cdot I = \frac{\beta}{(\beta + 1)^2} \frac{E_{TT}^2}{r_{mz}} = \frac{\beta}{(\beta + 1)^2} \frac{(\alpha_p + \alpha_n)^2 \Delta T^2}{\left(\rho_p \frac{l}{s_p} + \rho_n \frac{l}{s_n} \right) (1 + m_p)}.$$

Эти соотношения позволяют выбрать необходимые параметры ТЭГ в зависимости от характеристик элементов исполнительных устройств взрывателя.

4. Пример расчета

Приведем пример расчета для конкретной артиллерийской системы, а именно – 57-мм зенитной пушки С-60 [1, 5]. Расчет характеристик выстрела проводился при стандартных значениях внутрибаллистических параметров [5]. На рис. 7 представлен график изменения скорости снаряда при выстреле; дульная скорость снаряда 1000 м/с; частота вращения снаряда у дульного среза 500 Гц; максимальная перегрузка $25 \cdot 10^3$; длительность участка нарастания перегрузки 2,6 мс; длительность выстрела 7,0 мс. Начальную температуру головной части снаряда в момент вылета из канала ствола ориентировочно принимаем равной 50°C [15].

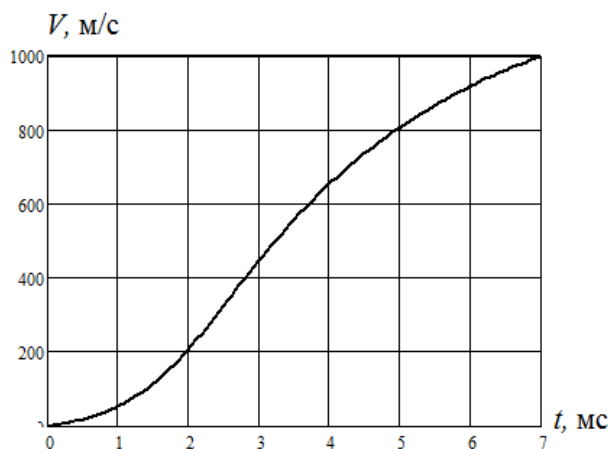


Рис. 7. График изменения скорости снаряда в канале ствола

Параметры траектории снаряда, используемые при расчете ТЭГ, определяются движением артиллерийского снаряда в воздухе от момента окончания действия на снаряд пороховых газов (в периоде последействия) до момента достижения цели. При исследовании движения снаряда как материальной точки может быть использована известная математическая модель внешней баллистики [1, 5-7]. В данной работе использована предложенная одним из авторов аппроксимация закона сопротивления воздуха 1943 г., являющегося основным в России [20].

При расчете угол возвышения принят равным 60° , условия стрельбы – нормальные артиллерийские [6], для современных снарядов коэффициент формы относительно закона 1943 г. $i \approx 1,0$. Графики изменения элементов движения снаряда на траектории (высота полета и скорость) представлены на рис. 8 и 9. Поскольку объектом моделирования являлась зенитная пушка (стрельба по воздушным целям), расчет выходного сигнала ТЭГ производился при ограничении по времени, соответствующем достижению вершины траектории снаряда, т.е. 34,9 с; высота вершины траектории 8,4 км, скорость снаряда в этой точке 160 м/с. Расчеты параметров ТЭГ на траектории производились при указанном ограничении по времени.

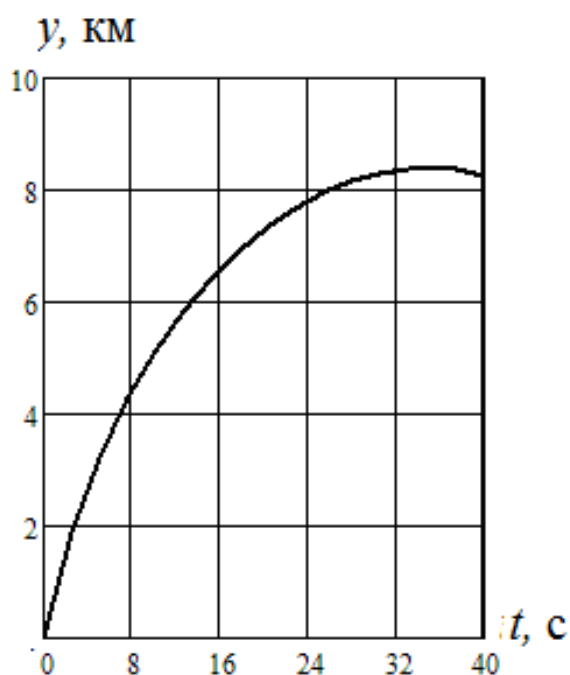


Рис. 8. Высота полета

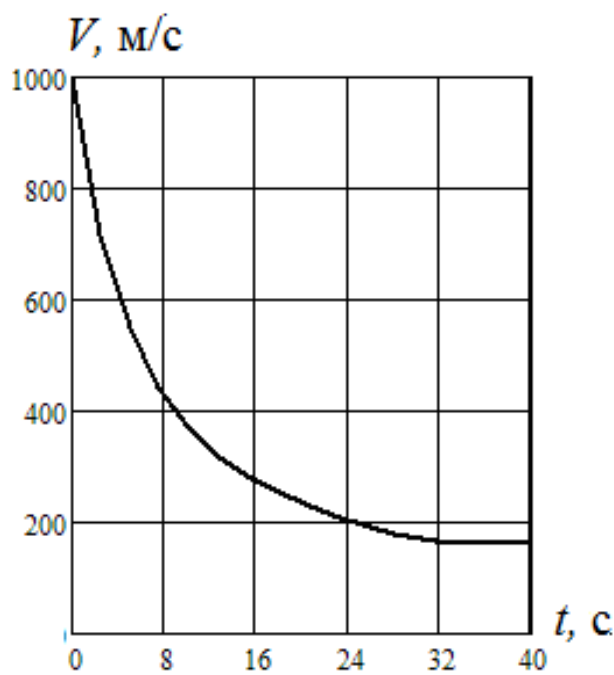


Рис. 9. Скорость снаряда

При расчете выходного сигнала ТЭГ были приняты следующие значения параметров материала корпуса снаряда: $c_0 = 470$ Дж/(кг·К), $\gamma = 7830$ кг/м³, $\varepsilon = 0,56$, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Результаты моделирования аэродинамического нагрева показывают, что пик температуры имеет место примерно на 2 с полета (рис. 7), и составляет 250°C , после чего происходит спад температуры поверхности, обусловленный падением скорости снаряда на траектории и изменением параметров обтекающего воздуха.

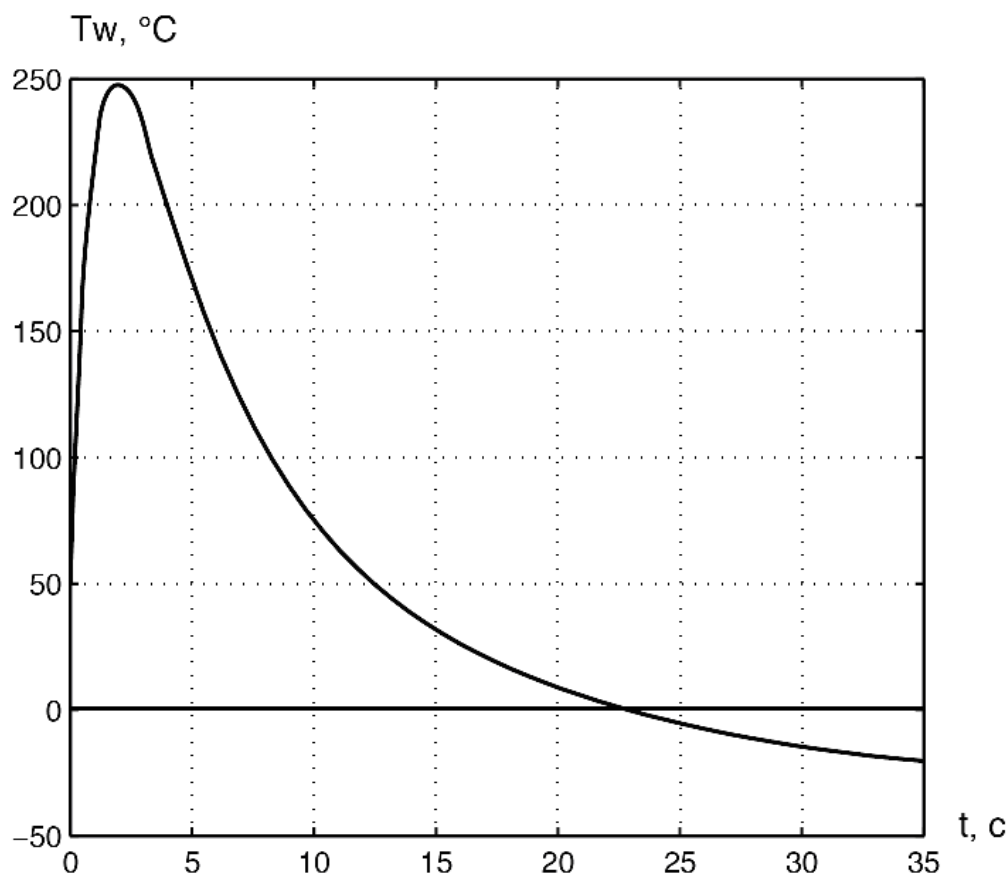


Рис. 7. Температурное поле снаряда на траектории

При расчете выходных характеристик ТЭГ в качестве примера были выбраны параметры следующих полупроводниковых ветвей: n -проводимости – $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.9}\text{Se}_{0.1})_3$ и p -проводимости – $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.25})_2\text{Te}_3$, теплопереходы представляют собой керамические пластины на основе BeO [21]. Моделирование осуществлялась с принятием ряда допущений, а именно: параметры материалов, включая термоЭДС, не зависят от температуры; влияние джоулева тепла не учитывается; зависимость температуры холодного спая от времени носит монотонный характер.

На рис. 8 приведена зависимость перепада температур между спаями ТЭГ от времени, а на рис. 9 – соответствующий график выходного напряжения ТЭГ. Расчет проводился при следующих параметрах: число термопар $n=38$, $\alpha_p = |\alpha_n| = 195 \text{ мкВ/К}$, $l = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $s_p = s_n = 10^{-6} \text{ м}^2$, остальные параметры выбраны с учетом данных,

приведенных в [22, 23]. Их этих графиков видно, что примерно на 17 с происходит обращение в ноль как перепада температур, так и выходного сигнала ТЭГ.

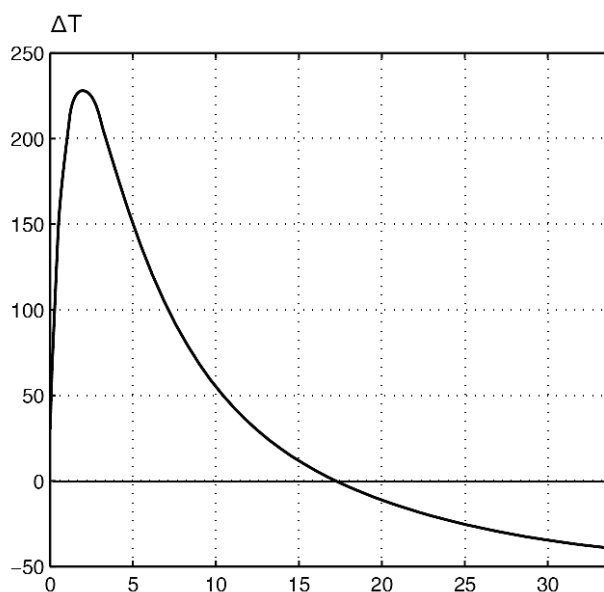


Рис. 8. Перепад температур на спаях ТЭГ

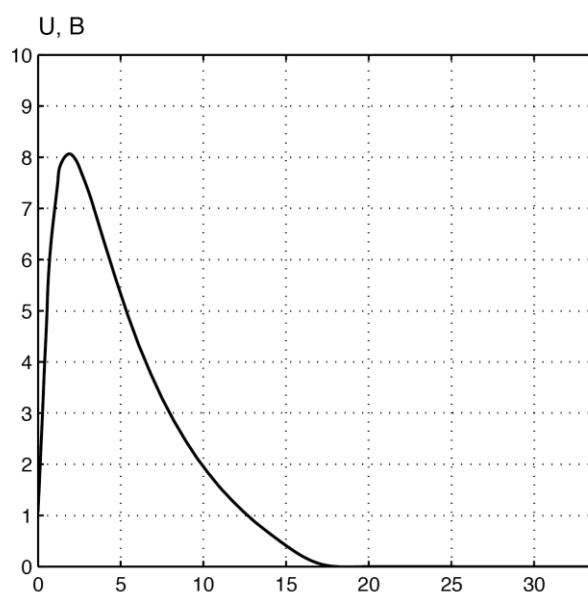


Рис. 9. Напряжение на выходе ТЭГ

Как видно из структурной схемы взрывателя (рис. 1), в ее состав входит накопитель энергии, который аккумулирует энергию, поступающую от ТЭГ, и передает ее к микроключам. После предварительного анализа существующих вариантов накопителей энергии был выбран емкостный накопитель, обеспечивающий высокую эффективность передачи энергии и имеющий малое внутреннее сопротивление. Энергию сигнала на выходе емкостного накопителя можно рассчитать с помощью соотношения

$$W_n = \frac{1}{2} C_n \int_0^t U^2(t) dt,$$

где C_n – емкость конденсатора; $U(t)$ – напряжение, поступающее на накопитель от генератора. Параметры накопителя были выбраны исходя из условий проверки работоспособности типовых омических исполнительных элементов огневой цепи взрывателя, а именно: сопротивление мостика 2...16 Ом, безотказность обеспечивается при энергии источника питания 0,18...2,56 мДж (емкость конденсаторного накопителя 0.1... 20 мкФ).

Графики, иллюстрирующие работу накопителя энергии, представлены на рис. 10 и 11. После отсечки генератора будет наблюдаться экспоненциальный участок разрядки, обусловленный потерями из-за утечки (кривая разрядки обозначена пунктиром). Однако за счет соответствующего выбора параметров электрической цепи можно обеспечить уровень выходного напряжения, обеспечивающего надежное срабатывание исполнительного элемента огневой цепи.

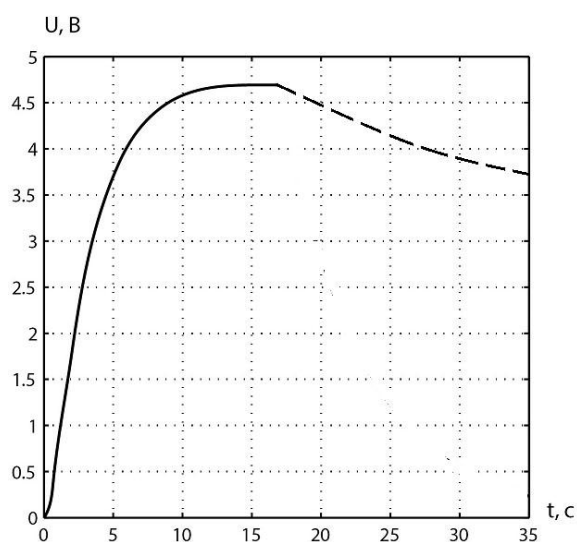


Рис. 10. Процесс зарядки емкостного накопителя

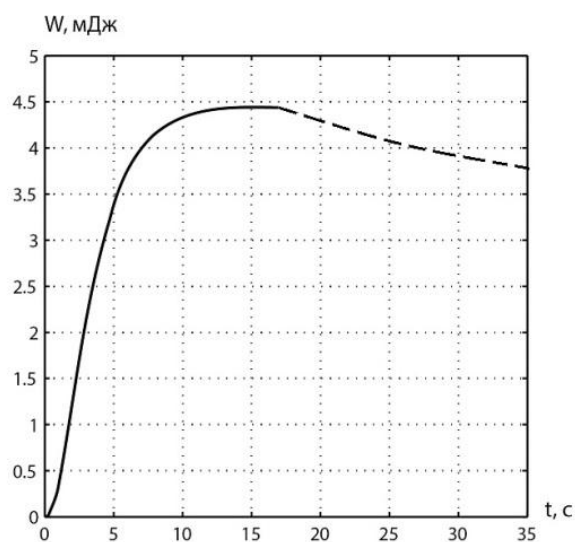


Рис.11. Процесс накопления энергии во времени

Можно показать, что при указанных параметрах ТЭГ надежное удержание микроключей в замкнутом положении обеспечивается.

Заключение

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1) На основе анализа структурной схемы МЭМС-взрывателя и возможных типов автономных источников питания электрических цепей выбран термоэлектрический генератор (ТЭГ).

2) Для генерирования напряжения на выходе ТЭГ необходимо обеспечить перепад температуры на холодных и горячих спаях. Показано, что существует два периода нагрева корпуса снаряда: при движении по каналу ствола (нагрев за счет врезания и трения ведущего пояса) и при движении на траектории. В последнем случае используется аэродинамический нагрев корпуса снаряда, обусловленный трением о набегающий поток воздуха.

3) Предложены математические модели формирования температурного поля вдоль корпуса снаряда от критической точки и генерирования выходного сигнала ТЭГ.

4) Представлен пример расчета для конкретной артиллерийской системы – 57-мм зенитной пушки С-60, параметры ТЭГ выбраны, исходя из требований безотказного срабатывания исполнительных элементов огневой цепи омического типа. Показано, что возможна отсечка генератора на большой высоте полета, после чего происходит частичная разрядка накопителя, и поэтому параметры ТЭГ должны быть выбраны с необходимым запасом.

Список литературы

1. Ефремов А.К. Автономные информационные и управляющие системы. В 4 т. Т. 4. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. 332 с.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
3. Ефремов А.К., Капустян А.В. Перспективы применения МЭМС во взрывателях // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2008. № 1. С. 52-54.
4. Defense Applications of MEMS // Microelectromechanical Systems Opportunities. A Department of Defense Dual-Use Technology Industrial Assessment. Report. US Department of Defense, 1995. P. 2 -24. Available at: http://www.eee.metu.edu.tr/~tayfuna/DoD_mems.pdf , accessed 01.03.2015.
5. Баллистика ствольных систем / РАРАН; под ред. Л.Н. Лысенко и А.М. Липанова. М.: Машиностроение, 2006. 461 с.
6. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. Внешняя баллистика: учебник для вузов. 4-е изд. М.: Машиностроение, 2005. 608 с.
7. Правдин В.М., Шанин А.П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999. 496 с.
8. Неконтактные взрыватели и их источники тока // Зарубежное военное обозрение. 2014. 4 апреля. Режим доступа: <http://www.zvo.su/suhoputnye-voyska/nekontaktnye-vzryvateli-i-ih-istochniki-toka.html> (дата обращения 01.03.2015).
9. Ефремов А.К. Магнитоупругий генераторный преобразователь // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 6. С. 195-208. DOI: [10.7463/0614.0716613](https://doi.org/10.7463/0614.0716613)
10. Ефремов А.К. Расчет пьезоэлектрического датчика цели с учетом волновых процессов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 11. С. 427-443. DOI: [10.7463/1114.0736576](https://doi.org/10.7463/1114.0736576)
11. Bateman P.J., So B. Some notes on the possible application of thermoelectric devices to guided missile fuzing projects. Technical Note No. ARM. 634. Royal Aircraft Establishment, 1959. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/312084.pdf> , accessed 01.03.2015.
12. Eggers P.E. Development of Thermocouple Generators for Small-Caliber Munitions Fuze. Phase 1. Final Report No. AD-A010 103. NTIS (National Technical Information Service), U.S. Department of Commerce, 1975. Available at: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA010103> , accessed 01.03.2015.
13. Анатычук Л.И. Элементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наукова думка, 1979. 762 с.

14. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. 3-е изд. М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.
15. Головкин В.А., Емельянов В.Н., Солк С.В. Обнаружение нагретых движущихся малоразмерных объектов в ИК-диапазоне // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 5. С. 40-44.
16. Краснов Н.Ф. Гл. 13. Трение // Аэродинамика. Ч. II. Методы аэродинамического расчета. 3-е изд. М.: Высшая школа, 1980. С. 240-313.
17. Прицкер Д.М., Сахаров Г.И. Аэродинамика. М.: Машиностроение, 1968. 310 с.
18. Конструкция управляемых баллистических ракет / ред. А.М. Синюков, Р.И. Морозов. М.: Воениздат, 1969. 443 с.
19. Стилбанс Л.С. Гл. 6. Термоэлектрические явления и теплопроводность // Физика полупроводников. М.: Советское радио, 1967. С. 294-330.
20. Ефремов А.К. Аппроксимация закона сопротивления воздуха 1943 г. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 10. С. 270-284. DOI: [10.7463/1013.0609269](https://doi.org/10.7463/1013.0609269)
21. Симкин А.В. Технологические и конструкционные способы повышения надежности работы термоэлектрической генераторной батареи: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 22 с.
22. Астахова Е.И., Бабин В.П., Равич Ю.И. Расчет и измерение постоянной времени охлаждающегося термоэлемента в регулярном режиме // Инженерно-физический журнал. 1992. Т. 62, № 2. С. 284-289.
23. Иорданишвили Е.К., Бабин В.П. Нестационарные процессы в термоэлектрических и термоманнитных системах преобразования энергии. М.: Наука, 1983. 216 с.

Thermoelectrical Generator for a MEMS-Fuze

A.K. Efremov^{1,*}, K.V. Vlasov¹

^{*}efrak@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: fuze structural block diagram, microelectromechanical systems (MEMS), autonomous thermoelectrical generator (TEG), aerodynamic heating of projectile, temperature difference on junctions

The structure of modern fuzes includes micro-electromechanical systems (MEMS), which have such advanced devices as micro-accelerometers and micro-switches, being triggered at a specified level of setback. Independent power source (PS), as an inherent part of the MEMS-fuze, charges an energy storage unit during the shot and triggers the fuze firing circuit when the shell encounters the target. Operating level of the control signal should be achieved within the time of remote arming, determined by the type of ammunition. The paper considers a possibility to develop PS as a thermoelectric generator (TEG) with aerodynamic heating of hot junctions due to friction of the projectile body on the incoming airflow. The initial temperature is determined by the driving band cutting into the rifling and friction during the movement of projectile through the tube bore. The paper presents a technique for calculating the temperature field along the body of the projectile from the critical point, located at the top of the shell head. The solution of the equation of heat balance reveals the temporal development of the projectile body temperature. The proposed mathematical model of the TEG describes the process of converting heat into electrical output signal (thermo-EMF). An example of calculation for a specific artillery system – 57-mm anti-aircraft gun S-60 is given. Calculation of the TEG output signal was limited by the time, which is necessary to reach the top of the projectile trajectory. It is shown that at high altitude the temperature difference may drop to zero, thus cutting off the TEG output signal. Selection of capacitive storage parameters can be based on the reliability test conditions of the fuze firing circuit actuators, taking into account the partial storage discharge on the trajectory before the projectile encounters the target.

References

1. Efremov A.K. *Avtonomnye informatsionnye i upravlyayushchie sistemy. V 4 t. T. 4* [Autonomous information and control systems. In 4 vols. Vol. 4]. Moscow, OOO NITs “Inzhener”, OOO “Oniko-M”, 2011. 330 p. (in Russian).
2. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory* [Micromechanical devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 400 p. (in Russian).

3. Efremov A.K., Kapustyan A.V. Perspectives of using MEMS in fuzes. *Boepripasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannye sistemy* = *Ammunition and highly energetic condensed systems*, 2008, no. 1, pp. 52-54. (in Russian).
4. Defense Applications of MEMS. In: *Microelectromechanical Systems Opportunities. A Department of Defense Dual-Use Technology Industrial Assessment. Report*. US Department of Defense, 1995, pp. 2 -24. Available at: http://www.eee.metu.edu.tr/~tayfuna/DoD_mems.pdf , accessed 01.03.2015.
5. Lysenko L.N., Lipanov A.M., eds. *Ballistika stvol'nykh sistem* [Ballistics of tubed artillery systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 461 p. (in Russian).
6. Dmitrievskii A.A., Lysenko L.N. *Vneshnyaya ballistika* [Exterior ballistics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 608 p. (in Russian).
7. Pravdin V.M., Shanin A.P. *Ballistika neupravlyaemykh letatel'nykh apparatov* [Ballistics of unguided airborne vehicles]. Snezhinsk, RFYaTs-VNIITF Publ., 1999. 496 p. (in Russian).
8. Proximity fuses and their current sources. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* = *Foreign Military Review*. 2014, April 4. Available at: <http://www.zvo.su/suhoputnye-voyska/nekontaktnye-vzryvateli-i-ih-istochniki-toka.html> , accessed 01.03.2015. (in Russian).
9. Efremov A.K. Magnetoelastic Generator Type Transducer. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* = *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 6, pp. 195-208. DOI: [10.7463/0614.0716613](https://doi.org/10.7463/0614.0716613) (in Russian).
10. Efremov A.K.. The Evaluation of Piezoelectric Contact Target Sensor Taking Account of the Wave Processes. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* = *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 11, pp. 427-443. DOI: [10.7463/1114.0736576](https://doi.org/10.7463/1114.0736576) (in Russian).
11. Bateman P.J., So B. *Some notes on the possible application of thermoelectric devices to guided missile fuzing projects*. Technical Note No. ARM.634. Royal Aircraft Establishment, 1959. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/312084.pdf> , accessed 01.03.2015.
12. Eggers P.E. *Development of Thermocouple Generators for Small-Caliber Munitions Fuze. Phase 1*. Final Report No. AD-A010 103. NTIS (National Technical Information Service), U.S. Department of Commerce, 1975. Available at: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA010103> , accessed 01.03.2015.
13. Anatychuk L.I. *Elementy i termoelektricheskie ustroystva* [Elements and thermoelectrical devices]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979. 762 p. (in Russian).
14. Serebryakov M.E. *Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem i porokhovykh raket* [Interior ballistics of tubed systems and solid propellant rockets]. Moscow, Oborongiz Publ., 1962. 703 p. (in Russian).
15. Golovkov V.A., Emel'yanov V.N., Solk S.V. Detection of Heated Small-Sized Object in IR-Spectral Range. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 40-44. (in Russian).

16. Krasnov N.F. Ch. 13. Friction. In book: *Aerodinamika. Ch. 2. Metody aerodinamicheskogo rascheta* [Aerodynamics. Pt. 2. Methods of aerodynamic calculations]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980, pp. 240-313.
17. Pritsker D.M., Sakharov G.I. *Aerodinamika* [Aerodynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 310 p. (in Russian).
18. Sinyukov A.M., Morozov R.I., eds. *Konstruktsiya upravlyaemykh ballisticheskikh raket* [Structural design of unguided ballistic rockets]. Moscow, Voenizdat Publ., 1969. 443 p. (in Russian).
19. Stil'bans L.S. Ch. 6. Thermoelectric phenomena and thermal conductivity. In book: *Fizika poluprovodnikov* [Semiconductors physics]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1967, pp. 294-330. (in Russian).
20. Efremov A.K. Approximation of the air resistance law of 1943. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 10, pp. 270-284. DOI: [10.7463/1013.0609269](https://doi.org/10.7463/1013.0609269) (in Russian).
21. Simkin A.V. *Tekhnologicheskie i konstruktsionnye sposoby povysheniya nadezhnosti raboty termoelektricheskoi generatornoi batarei. Avtoref. kand. diss.* [Technological and design methods of operating reliability enhancement of a thermoelectric generator type battery. Abstract of cand. diss.]. Moscow, 2014. 22 p. (in Russian).
22. Astakhova E.I., Babin V.P., Ravich Yu.I. Calculation and measurement of the time-constant of a cooling thermoelement in the steady state. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 1992, vol. 62, no. 2, pp. 284-289. (English version of journal: *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1992, vol. 62, iss. 2, pp. 211-215. DOI: [10.1007/BF00851790](https://doi.org/10.1007/BF00851790)).
23. Iordanishvili E.K., Babin V.P. *Nestatsionarnye protsessy v termoelektricheskikh i termomagnitnykh sistemakh preobrazovaniya energii* [Nonstationary processes in thermoelectric and thermomagnetic energy conversion systems]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 216 p. (in Russian).