

УДК 62-585.3

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОБЪЕКТЫ, ДВИЖУЩИЕСЯ С ВЫСОКИМИ СКОРОСТЯМИ

© 2022 В.А. Глущенков^{1,2}, Р.Ю. Юсупов¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара, Россия

² Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Самара, Россия

В работе представлен результат поискового эксперимента по воздействию импульсного магнитного поля (ИМП) на движущийся с высокой скоростью объект. Подтвержден факт такого воздействия при использовании плоского и цилиндрического индукторов. Описан созданный экспериментальный стенд для регистрации изменения траектории и скорости полета пули, с обеспечением требуемой временной увязки используемой аппаратурой. Даны направления использования ИМП для управления кинематикой различного рода быстро перемещающихся объектов.

Ключевые слова: Импульсное магнитное поле, движущийся объект, индукторы, экспериментальный стенд, траектория, скорость движения.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-93-99

ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

В конструкциях ряда технологических устройств различного назначения входят быстро-перемещающиеся элементы. Так, например, в пресс-пушках Мацукина [1] – это бойки, движущиеся со скоростями сотни метров в секунду. Движущиеся с высокими скоростями конструктивные элементы содержатся в магнитно-импульсных клепальных молотках [2-4], в электродинамических линейных приводах, в электрических коммутационных аппаратах [5, 6], в устройствах метания нанокомпозиций в порошковой металлургии и других устройствах.

Нередко возникает необходимость разгона или, наоборот, торможения движущихся элементов на конечной стадии процессов: для повышения эффективности листовой штамповки – ускорение; для криминалистического анализа – замедление до минимума [7-9]. В некоторых случаях требуется не только изменение скорости движения тел, но и их траектории [10].

Актуальной является техническая задача управления движением (полетом) объектов со скоростями десятки, сотни и даже тысячи метров в секунду.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Предлагается использовать бесконтактное силовое воздействие импульсного магнитного поля (ИМП) на перемещающийся с высокой скоростью объект. При этом возникают электроди-

Глущенков Владимир Александрович, кандидат технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Биоинженерия» Самарского федерального исследовательского центра РАН. E-mail: vgl@ssau.ru
Юсупов Ринат Юсупович, научный сотрудник.

намические силы взаимодействия ИМП с электропроводящим материалом объекта – силы Лоренса. [11]

Движущееся тело перемещаясь, например, над плоским индуктором, соединенным с магнитно-импульсной установкой (МИУ), испытывает электродинамическое воздействие F , возникающее в результате разряда батареи конденсаторов МИУ на индуктор. [12, 13] (рис. 1).

Возможно два вида взаимодействия ИМП с движущимся объектом: *в первом случае* – в каждый момент времени объект условно не подвижен, а ИМП – переменное; *во втором случае* – наоборот, магнитное поле постоянно, а объект движется, пересекая линии магнитного поля. В общем случае на движущийся объект действуют одновременно две силы Лоренса.

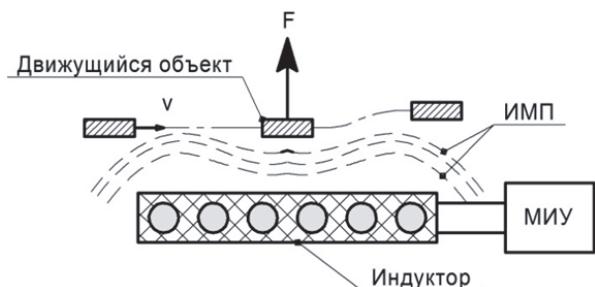


Рис. 1. Взаимодействие движущегося объекта в ИМП плоского индуктора

При *первом виде* воздействия переменное магнитное поле наводит в теле объекта вихревые токи, возникающие, при этом, электродинамические силы – результат взаимодействия двух полей: ИМП индуктора и магнитного поля от наведенных токов.

Во *втором случае*, возникающие силы Лоренса (векторная величина) зависят от угла между

направлением силовых линий магнитного поля и направлением движения объекта. При совпадении направлений (синус угла равен нулю) эти силы можно не рассматривать.

Под действием ИМП движущееся тело получает электродинамического усилие F , изменяя скорость и траекторию движения. Время действия импульса пропорционально длительности разряда МИУ в диапазоне $10^{-3}...10^{-5}$ секунд, и должно быть согласовано с временем движения объекта над индуктором.

На рисунках 2 приведены примеры схем взаимодействия ИМП с движущимися объектами для цилиндрических индукторов: с активной цилиндрической и конической зоной воздействия.

Рассмотрим вариант взаимодействия ИМП с движущимся телом в цилиндрическом индукторе:

- во время движения тела от входа и до оси симметрии активной зоны индуктора вектор магнитной индукции ИМП направлен в противоположную сторону траектории движения, сообщая тормозящее усилие;

- при включении ИМП во время движения тела за осью симметрии активной зоны поле стремится вытолкнуть тело, сообщая ему дополнительное ускорение (рис. 2а).

В коническом индукторе (рис. 2б), возникающая сила взаимодействия F_1 раскладывается на две составляющие: горизонтальную и вертикальную. Вектор горизонтальной составляющей F_2 направлен в противоположную сторону траектории движения. Конический индуктор представляет собой магнитную ловушку с «зеркальным» отражением, в которой напряженность ИМП сильно и плавно возрастает, что приводит к снижению скорости движения тела в выходной горловине индуктора. Если на траектории движения разместить несколько таких индукторов, то скорость движения можно свести до минимума.

Таким образом, взаимодействие ИМП с движущимися телами зависит: от конфигурации и размеров индуктора, от напряженности и длительности ИМП, направления и скорости движения тела, физических свойств материала тела и

соотношения геометрических размеров тела и активной зоны индуктора.

СИЛОВЫЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМП С ДВИЖУЩИМСЯ ОБЪЕКТОМ

При разряде емкостного накопителя энергии МИУ на индуктор, вокруг его витков формируется ИМП с напряженностью

$H = 10^5...10^7$ А/м и длительностью $\tau = 10^{-3}...10^{-5}$ сек. В электропроводном теле движущегося объекта наводятся вихревые токи $I_2 = 10...100$ кА, которые взаимодействуют с ИМП индуктора.

Энергия, запасенная в емкостном накопителе энергии МИУ, равна:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (1)$$

где C – емкость накопителя энергии; U – напряжение заряда.

Величина электродинамической силы F , действующей на электропроводное тело в импульсном магнитном поле равна:

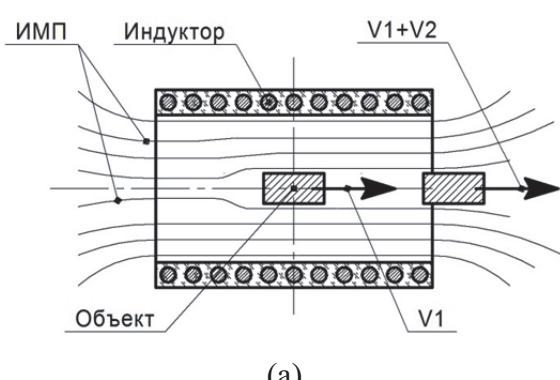
$$F = \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l_0 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \pi \cdot \Delta h}, \quad (2)$$

где I_1 – ток в индукторе; I_2 – наведенный ток в теле; l_0 – длина тела; Δh – расстояние между телом и витками индуктора; α – угол между направлением движения тела и направлением силовых линий ИМП.

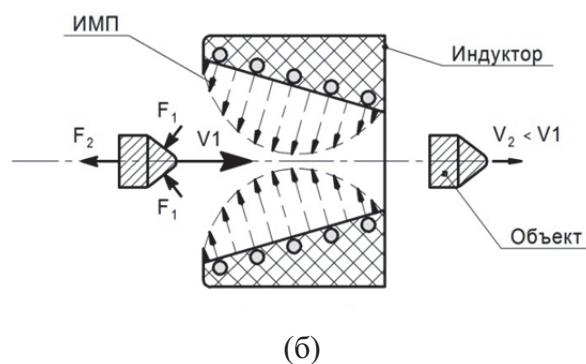
Формула (2) справедлива для случая, если размер тела в направлении действия электродинамической силы F , больше глубины проникновения ИМП в материал тела, т.е больше величины скин-слоя – Δ :

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho_0}{\pi \cdot \mu_0 \cdot f}}, \quad (3)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала тела; f – частота разрядного тока в индукторе; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – постоянная магнитная проницаемость.



(a)



(б)

Рис. 2. Схема взаимодействия ИМП с движущимся объектом при использовании:
а) цилиндрического индуктора; б) конусного индуктора

На рисунке 3 показана форма разрядного тока МИУ в индукторе, которая, в большинстве случаев, принимает форму затухающей синусоиды.

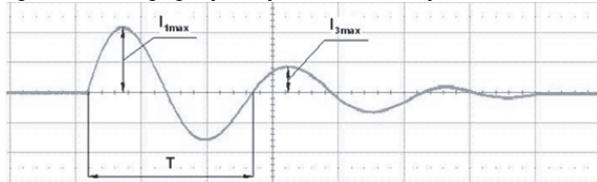


Рис. 3. Характер разрядного тока цепи:

МИУ – индуктор – тело:

$I_{1\max}$ – амплитуда 1^{го} полупериода тока,
 $I_{3\max}$ – амплитуда 3^{го} полупериода,

(T – период колебаний)

Затухание тока характеризуется декрементом затухания δ и определяет характер силового воздействия на движущийся объект во времени:

$$\delta = \ln \frac{I_{1\max}}{I_{3\max}}, \quad (4)$$

Как видно из рисунка 3, наибольший вклад на величину электродинамической силы F оказывает амплитуда первой полуволны тока – $I_{1\max}$, поэтому, при значительном декременте затухания тока влиянием последующих полупериодов можно пренебречь. Эффективная длительность импульса воздействующего на тело для колебательного характера разряда с небольшой погрешностью принимается равной периоду колебаний тока – T .

Таким образом, электродинамическая сила, действующая на движущееся электропроводное тело, пропорциональна напряженности ИМП, т.е. величине тока в индукторе, длине тела и обратно пропорциональна расстоянию между телом и витками индуктора (зазору между ними).

МЕТОДИКА ПОИСКОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель поискового эксперимента – проверка практической реализации предложенного технического решения и оценка его эффективности.

На рисунке 4 приведена схема экспериментального стенда.

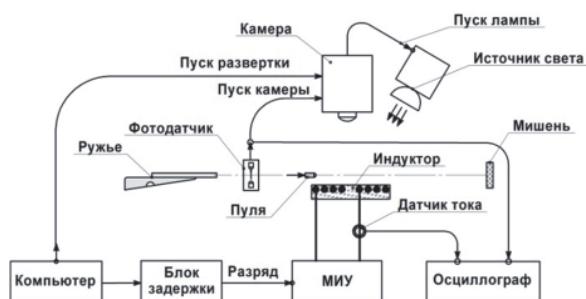


Рис. 4. Схема экспериментального стенда

Экспериментальный стенд, включает: МИУ с запасаемой энергией 10 кДж; высокоскоростную цифровую видеокамеру; импульсный источник света; бесконтактные оптические дат-

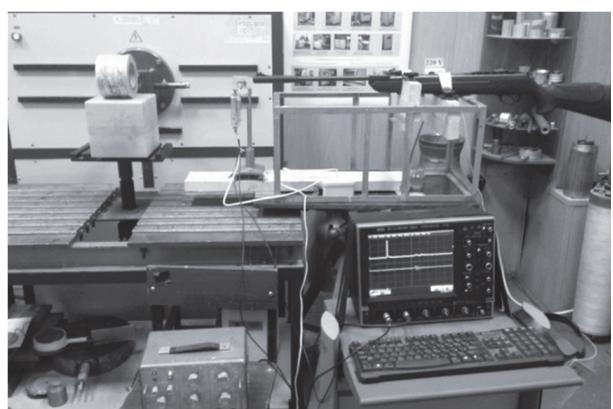


Рис. 5. Внешний вид измерительного комплекса

чики синхронизации; датчик импульсного тока; цифровой запоминающий осциллограф и блок задержки запуска МИУ с регулируемой задержкой в диапазоне $10^{-5}...10^{-3}$ секунд (рис. 5).

В эксперименте в качестве движущегося тела использовалась медная и свинцовая пуля, выпущенная из пневматического ружья. Начальная скорость пули: 150...170 м/сек. Медная пуля выполнена в виде цилиндра Ø4 мм, длиной 10 мм. Свинцовая пуля из стандартного комплекта ружья с размерами Ø4 x 8 мм.

Для воздействия ИМП на пулю использовались плоский (рис. 6) и цилиндрический (рис. 7) индукторы.



Рис. 6. Плоский индуктор

Плоский индуктор выполнен в виде спирали Архимеда и содержит 10 витков токопровода из медной шины 4 x 8 мм. Наружный диаметр индуктора 80 мм.

Цилиндрический индуктор представляет собой полую катушку, намотанную из 5 витков медной шины с внутренним диаметром 50 мм и рабочей зоной 30 мм.



Рис. 7. Цилиндрический индуктор

Ружье закреплялось жестко, обеспечивая стабильное направление полета пули над вит-

ками плоского индуктора и по оси цилиндрического индуктора.

Траектория полета пули над плоским индуктором регистрировалось цифровой видеокамерой «Cordin 505» со скоростью 9000 кадров в секунду в режиме «отраженного света». Длительность свечения импульсной лампы подсветки – $3 \cdot 10^{-5}$ сек.

Изменение траектории полета пули оценивалось по величине отклонения следа от пули на мишени. Изменение скорости пули сквозь цилиндрический индуктор рассчитывалось по обработке покадровой кинограммы на входе и выходе из индуктора.

На рисунке 8 представлен алгоритм управления аппаратурой стенда.

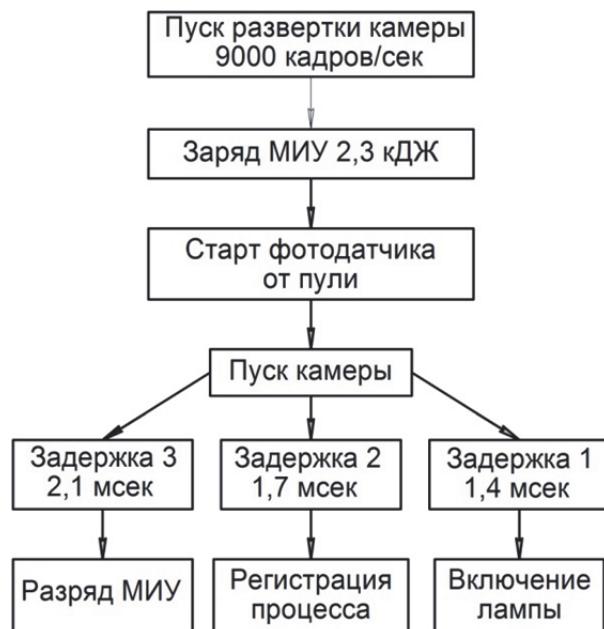


Рис. 8. Алгоритм работы экспериментального стенда

Синхронизация аппаратуры обеспечивалась оптическим датчиком в момент пересечения светового потока датчика летящей пулей с необходимыми задержками. Регулируя время задержки включения видеокамеры, регистрировались фрагменты полета пули на разном временном этапе. Одновременно измерялись электрические параметры силового воздействия: напряженность магнитного поля и разрядный ток в индукторе.

Запасаемая энергия МИУ регулировалась в пределах 2...5 кДж. Заряд накопителя энергии МИУ до заданного уровня осуществлялся заранее, затем МИУ находилась в ждущем режиме. Команда на разряд подавалась автоматически от компьютера с необходимой задержкой на время подлета пули к индуктору. Временная диаграмма работы основных элементов стенда показана на рисунке 9.

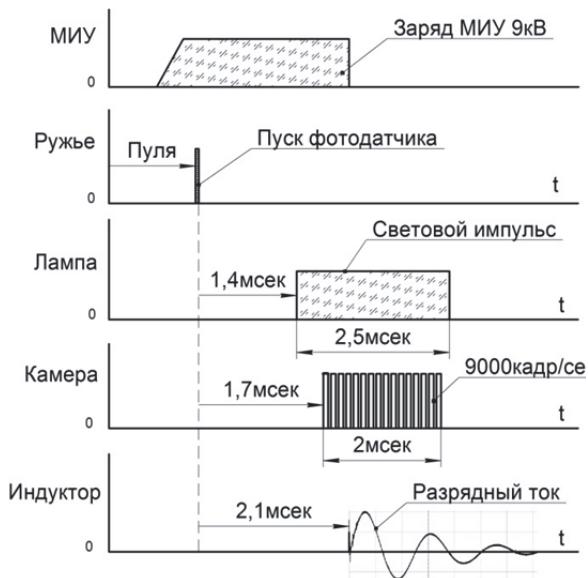


Рис. 9. Временная диаграмма работы экспериментального комплекса

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рисунках 10 и 11 представлены фрагменты покадровой киносъемки траектории полета пули при воздействии импульсным магнитным полем плоского и цилиндрического индукторов.

Конечный результат эксперимента можно оценить по следам пули на мишени на рисунках 12, 13.

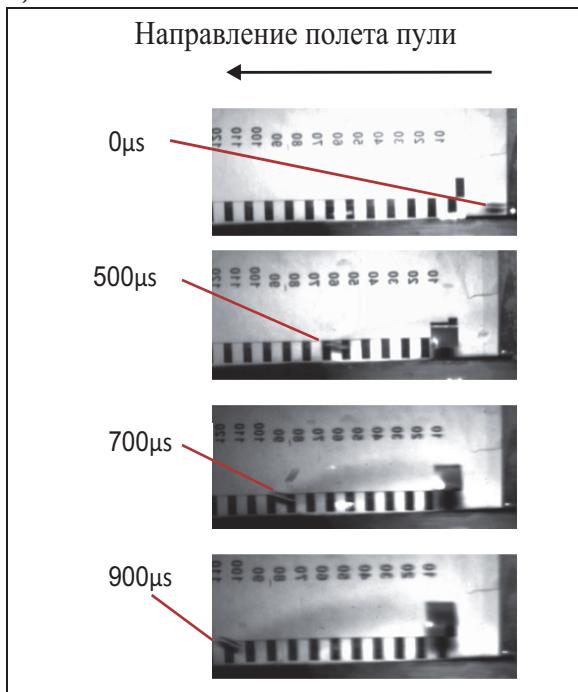


Рис. 10. Фрагменты киносъемки траектории полета пули с плоским индуктором под воздействием ИМП

На рисунке 11 фрагменты киносъемки полета пули сквозь внутреннюю полость цилиндрического индуктора

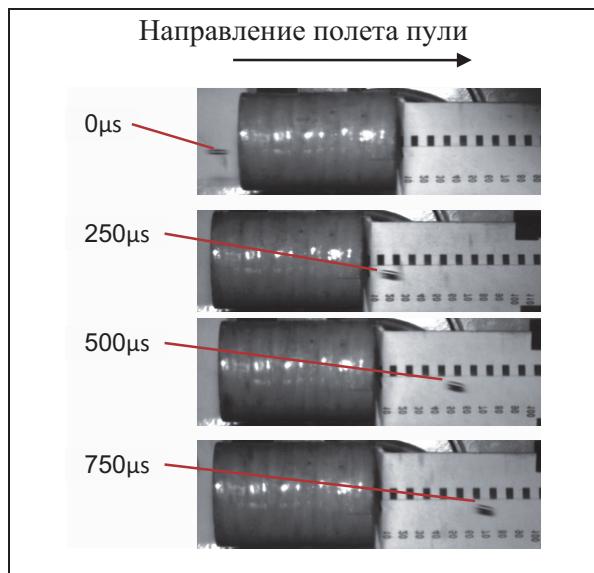


Рис. 11. Фрагменты киносъемки траектории полета пули с цилиндрическим индуктором

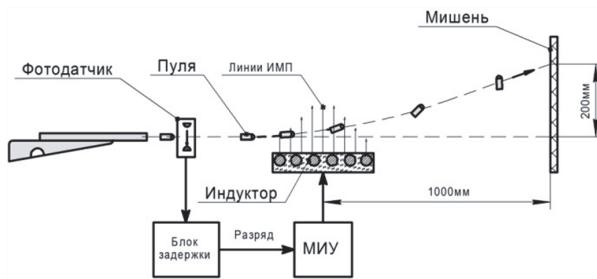


Рис. 12. Схема изменения траектории полета пули и ее взаимодействие с мишенью

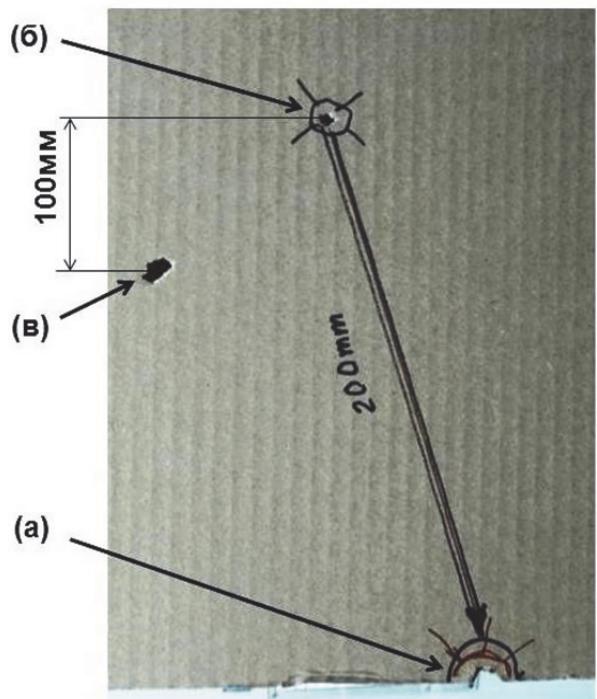


Рис. 13. Следы пули на мишени, установленной на расстоянии 1000 мм от индуктора
 (а) – без воздействия ИМП;
 (б, в) – с воздействием ИМП

В экспериментах с цилиндрическим индуктором скорость полета пули возрастала со 150 м/сек до 180 м/сек при энергии заряда МИУ – 3,5 кДж.

При использовании конусного индуктора зафиксировано замедление полета пули.

Кроме того, как видно из кадров видеозаписи воздействие ИМП не только изменяет скорость и траекторию движения тела, но вызывает его вращение вокруг центра масс, как результат неравномерности распределения магнитного поля вдоль траектории полета, а также возможного исходного смещения центра тяжести пули.

ВЫВОДЫ

Возможные направления использования управляемого воздействия ИМП на движущиеся с высокими скоростями объектов:

Для защиты особо важных объектов с возможностью быстрого автоматического многократного воздействия, бесшумного регулирования степенью воздействия, применение в закрытых помещениях и др. [14]

Применение в различного рода испытательной технике на динамическую нагрузку. [15]

В устройствах технологического применения: импульсная клепка, дорнование, пробивка отверстий и др. [2...4]

При создании средств обеспечения защиты летательных аппаратов от внешних летящих с высокими скоростями тел (осколков, микрометеоритов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Подтвержден факт эффективности влияния импульсного магнитного поля на скорость и траекторию быстро-перемещающихся электропроводных тел.

Отклонение траектории движения медного цилиндра с размерами Ø4 x 10 мм, перемещающегося со скоростью 150 м/сек над поверхностью плоского индуктора под воздействием импульсного магнитного поля напряженностью 10^5 А/м, составило 200 мм на расстоянии 1000 мм от индуктора.

При движении сквозь цилиндрический индуктор «на обжим» скорость движения тела увеличилась со 150 м/сек до 180 м/сек при энергии воздействия 3,5 кДж.

При использовании индуктора с конусной активной зоной «на обжим» с углом конусности $\alpha = 20^\circ$, скорость полета пули на выходе снизилась на 20 м/сек.

- Установлен эффект сопутствующего влияния ИМП на перемещающееся тело – приданье вращательного движения, из-за неравномерности поля в индукторе и смещения центра масс тела.

3. Определены основные факторы управления магнитно-импульсным воздействием на быстро перемещающиеся тела: энергия разряда МИУ; кинематика движения; физические свойства тел; длительность импульса воздействия; напряженность магнитного поля и др.

4. Определены области применения метода воздействия ИМП на быстро перемещающиеся тела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пихтовников, Р.В. Штамповка листового металла взрывом / Р.В. Пихтовников, В.И. Завьялова. – М.: Машиностроение, 1964. – С.175 .
2. Синельников А.Я. Устройство для магнитно-импульсной клепки// Патент на полезную модель РФ №100739, МПК B21J 15/24, 2010. Бюл. № 36
3. Лысенко Ю.Д., Устинов Д.С. Одноударный магнитно-импульсный молоток. Патент SU № 1564839, B21J 15/24, 1999, Бюл. №18.
4. Бондалетов, В.Н. Магнитно-импульсный инструмент для клепки и методика его расчета / В.Н. Бондалетов, А.В. Воронов, В.А. Тютъкин // Кузнеочно-штамповочное производство. – 1984. – № 7. – С. 24-26.
5. Чернов Е.Н., Однорал А.П., Тютъкин В.А. Быстро действующий привод коммутационного аппарата. А.с. №514362, 1978, Бюл. №18.
6. Балтаханов А.М., Буйнов А.Л., Тютъкин В.А., Филистович В.М. Быстро действующий коммутационный аппарат. А.с. №1429187, 1988.
7. Андреев, А.Н. Индукционное ускорение прово-
- дников и высокоскоростной привод / А.Н. Андреев, В.Н. Бондалетов // Электричество. – 1973. – № 10. – С. 36-41.
8. Бондалетов, В.Н. Торможение массивных проводников импульсным магнитным полем / В.Н. Бондалетов, В.А. Тютъкин // Электричество, 1979. - № 2. - С. 42-45.
9. Бельков, В.А. Криминалистическое исследование огнестрельного оружия / В.А. Бельков, В.Т. Халапханов – Иркутск, 2016. – 206 с.
10. Глушченков В.А., Юсупов Р.Ю. Способ активного изменения траектории движения ме-таллических тел, перемещающихся с высокой скоростью // Патент РФ № 2710963, МПК F41H 11/00, 2020. Бюл. № 2.
11. Кнопфель, Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 392 с.
12. Глушченков, В.А. Технология магнитно-импульсной обработки материалов / В.А. Глушченков, В.Ф. Карпухин. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. – 208 с.
13. Глушченков, В.А. Индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов / В.А. Глушченков. – Самара: Учебная литература, 2013. – 148с.
14. Татмышевский К.В. Магнитно-импульсные мечательные средства поражения для систем активной защиты объектов особой важности / К.В. Татмышевский, С.Н. Марычев, С.А. Козлов // Современные технологии безопасности. – 2005. – №4. – С. 8-11.
15. Татмышевский, К.В. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиа-космической техники на ударные воздействия / К.В. Татмышевский, С.А. Козлов // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – №12. – С. 52.

THE EFFECT OF PULSED MAGNETIC FIELDS ON OBJECTS, MOVING AT HIGH SPEEDS

© 2022 V.A. Glushchenkov^{1,2}, R.Yu.Yusupov²

¹ Samara National Research University named by academician S.P.Korolyev, Samara, Russia

² Samara Federal Research Centre of the RAS, Samara, Russia

Annotation. The paper presents the result of an exploration experiment on the effect of a pulsed magnetic field (PMF) on objects moving at high speeds. The fact of such an effect when using a flat and cylindrical inductor has been confirmed. The created experimental stand for recording changes in the bullet trajectory and its speed of the flight with the required time matching of the used equipment is described. The lines of using the pulsed magnetic fields to control the kinematics of rapidly moving objects of various kinds are given.

Keywords: a pulsed magnetic field, a moving object, an inductor, an experimental stand, a trajectory, speed of movement.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-93-99

REFERENCES

1. Pihtovnikov, R.V. Shtampovka listovogo metalla vzryvom / R.V. Pihtovnikov, V.I. Zav'yalova. – M.: Mashinostroenie, 1964. – S.175 .
2. Sinel'nikov A.Ya.Ustrojstvo dlya magnitno-impul'snoj klepki// Patent na poleznuyu model' RF №100739, MPK B21J 15/24, 2010. Byul. № 36.
3. Lysenko Yu.D., Ustinov D.S. Odnoudarnyj magnitno-impul'snyj molotok. Patent SU № 1564839, B21J 15/24, 1999, Byul. №18.
4. Bondaleto V.N. Magnitno-impul'snyj instrument dlya klepki i metodika ego rascheta /V.N. Bondaleto, A.V. Voronov, V.A. Tyut'kin // Kuznechno-shlampovochnoe proizvodstvo. – 1984. – № 7. – S. 24-26.
5. Chernov E.N., Odnoral A.P., Tyut'kin V.A. Bystrodejstvuyushchij privod kommutacionnogo apparata. A.s. №514362, 1978, Byul. №18.
6. Baltahanov A.M., Bujnov A.L., Tyut'kin V.A., Filistovich V.M. Bystrodejstvuyushchij kommutacionnyj apparat. A.s. №1429187, 1988.

7. Andreev, A.N. Indukcionnoe uskorenie provodnikov i vysokoskorostnoj privod / A.N. Andreev, V.N. Bondaletov // Elektrichestvo. – 1973. – № 10. – S. 36-41.
8. Bondaletov V.N. Tormozhenie massivnyh provodnikov impul'snym magnitnym polem / V.N. Bondaletov, V.A. Tyut'kin // Elektrichestvo, 1979. – № 2. – S. 42-45.
9. Bel'kov, V.A. Kriminalisticheskoe issledovanie ognestrel'nogo oruzhiya / V.A. Bel'kov, V.T. Halaphanov. – Irkutsk, 2016. – 206 s.
10. Glushchenkov V.A., Yusupov R.Yu. Sposob aktivnogo izmeneniya traektorii dvizheniya metallicheskikh tel, peremeshchayushchihsya s vysokoj skorost'yu // Patent RF № 2710963, MPK F41H 11/00, 2020. Byul. № 2.
11. Knopfel', G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polya / G. Knopfel'. – M.: Mir, 1972. – 392 s.
12. Glushchenkov, V.A. Tekhnologiya magnitno-impul'snoj obrabotki materialov / V.A. Glushchenkov, V.F. Karpuhin. – Samara: Izdatel'skij dom «Fedorov», 2014. – 208 s.
13. Glushchenkov, V.A. Induktory dlya magnitno-impul'snoj obrabotki materialov / V.A. Glushchenkov. – Samara: Uchebnaya literatura, 2013. – 148 s.
14. Tatmyshevskij K.V. Magnitno-impul'snye metatel'nye sredstva porazheniya dlya sistem aktivnoj zashchity ob'yektov osoboj vazhnosti / K.V. Tatmyshevskij, S.N. Marychev, S.A. Kozlov // Sovremennye tekhnologii bezopasnosti. – 2005. – №4. – S. 8-11.
15. Tatmyshevskij, K.V. Magnitno-impul'snye ustavokni dlya ispytanij izdelij avia-kosmicheskoy tekhniki na udarne vozdejstviya / K.V. Tatmyshevskij, S.A. Kozlov // Aviakos-micheskoe priborostroenie. – 2005. – №12. – S. 52.

Vladimir Glushchenkov, Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory «Bioengineering» of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. E-mail: vgl@ssau.ru
Rinat Yusupov, Researcher.