

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 621.762.04
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-3-361-368>

Поступило в редакцию 16.09.2020
Received 16.09.2020

Член корреспондент А. Ф. Ильющенко, В. И. Овчинников

*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСКОРИТЕЛЯ
И РАЗМЕРОВ ДВИЖУЩИХСЯ С УСКОРЕНИЕМ МИКРОЧАСТИЦ КАРБИДА
КРЕМНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Аннотация. В настоящей работе представлена схема ускорителя микрочастиц, методика и результаты практического изучения индукции магнитного поля и электромагнитного излучения, образующихся в процессе ионизации продуктов взрыва и кумуляции энергии при подрыве заряда взрывчатых веществ (ВВ), а также влияния некоторых параметров процесса на ее изменение. Цель работы – изучение влияния энергетических параметров ускорителя и размеров микрочастиц карбида кремния на изменение индукции магнитного поля при их ускорении. Исследование влияния технологических параметров на электродинамические свойства процесса ионизации сложной химической системы, которой являются конденсированные ВВ проводили по разработанной методике, в основу которой положен эффект Холла с применением разработанных полупроводниковых датчиков Холла и специального измерительного комплекса. Среднее значение индукции магнитного поля составляет 48 мТл. Влияние энергетических параметров ускорителя (массы заряда взрывчатых веществ), а также размеров микрочастиц, вводимых в продукты взрыва (ПВ), на электродинамические свойства процесса ионизации и разгона микрочастиц определяли по результатам измерения и расчетов индукции магнитного поля. Получены практические результаты, которые подтверждают влияние размера частиц на состояние плазмы. С увеличением размера частиц от 20 до 100 мкм значение индукции растет до 50 мТл и резко уменьшается с изменением размера от 150 до 300 мкм. Полученные зависимости являются технологическими характеристиками процесса обработки материалов высокоскоростными потоками микрочастиц с применением энергии взрыва, регулируя которые можно сделать процесс управляемым.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, неидеальная плазма, ионизированный поток, эффект Холла, индукция магнитного поля

Для цитирования. Ильющенко, А. Ф. Влияние энергетических параметров ускорителя и размеров движущихся с ускорением микрочастиц карбида кремния на изменение индукции магнитного поля / А. Ф. Ильющенко, В. И. Овчинников // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 3. – С. 361–368. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-3-361-368>

Corresponding Member Alexander F. Ilyushchenko, V. I. Ovchinnikov

*Institute of Powder Metallurgy named after Academician O. V. Roman of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

**INFLUENCE OF ACCELERATOR ENERGY PARAMETERS AND SILICON CARBIDE MICROPARTICLE
SIZES ON THE CHANGES IN MAGNETIC FIELD INDUCTION DURING THEIR ACCELERATION**

Abstract. This article contains the microparticle accelerator scheme, the methods, and the results of practical study of magnetic field induction and electromagnetic radiation formed during explosion product ionization and energy accumulation during explosive charge detonation, as well as the influence of some process parameters on its change. The purpose of this work is to study the influence of accelerator energy parameters and silicon carbide microparticle sizes on the change in magnetic field induction during their acceleration. The influence of technological parameters on the electrodynamic properties of the ionization process of a complex chemical system, which is condensed EXPLOSIVES, was studied by the developed method based on the Hall effect with the use of the developed semiconductor Hall sensors and a special measuring complex.

The average magnetic field induction value is 48 MT. The influence of the energy parameters of the accelerator (explosive charge mass), as well as of the size of microparticles introduced into the explosion products (PV) on the electrodynamic properties of the processes of ionization and acceleration of microparticles was determined by measuring and calculating magnetic field induction. Practical results were obtained and confirmed the particle size influence on the plasma state. With an increase in the particle size from 20 to 100 microns, the induction value increases to 50 MT and decreases sharply with a change in the size from 150 to 300 microns. The obtained dependences are the technological characteristics of the process of processing materials by high-speed flows of microparticles with the use of explosion energy, which can be adjusted to make the process manageable.

Keywords: explosives, non-ideal plasma, ionized flux, Hall effect, magnetic field induction

For citation. Ilyushchenko A. F., Ovchinnikov V. I. Influence of accelerator energy parameters and silicon carbide microparticle sizes on the changes in magnetic field induction during their acceleration. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 3, pp. 361–368 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-3-361-368>

Введение. Настоящая работа является продолжением работ [1; 2], где были изложены результаты теоретических исследований формирования электромагнитного поля при подрыве кумулятивного заряда и применения кумулятивных зарядов для разгона порошковых микрочастиц до скоростей 2500 м/с, исследования их соударения с преградой и образующегося при этом ионизирующего излучения с энергией порядка $3,22 \cdot 10^{-2}$ Дж. При решении практических задач в физике взрыва часто возникает необходимость в расчете состава, термо- и электродинамических параметров продуктов взрыва (ПВ) конденсированных взрывчатых веществ (ВВ), которые представляют собой смесь газообразных и конденсированных продуктов при давлении 20–40 ГПа и температуре 300–5000 К [3; 4]. Однако очевидно, что одним из главных факторов, определяющих адекватность термодинамического и иного состояний ПВ, является точность измерений и правильность выбранных методик для оценки свойств и продуктов, составляющих большую часть массы ПВ. Таким образом, разработка приборов, методик позволяющих надежно измерить и вычислить электрофизические, термодинамические, магнитные параметры газообразных смесей при высоких давлениях и температурах, представляет собой исключительно важную задачу. Решение одной из таких задач – экспериментальное исследование электромагнитных свойств ПВ и было предпринято в настоящей работе.

Предложена идея контроля развития взрывной обработки материалов по измерению составляющих индукции магнитного поля B_x, B_y, B_z в декартовой системе координат X, Y, Z в непосредственной близости от эпицентра.

Материалы и методы исследования. Изучение образующегося импульса электромагнитного излучения проводили по разработанной методике измерением индукции магнитного поля с применением датчиков Холла. В качестве материала микрочастиц использовали порошок SiC фракции 60–70 мкм. Для энергообеспечения разгона микрочастиц использовали ВВ аммонит 6ЖВ. Регистрацию индукции магнитного поля проводили с использованием разработанных полупроводниковых датчиков Холла и измерительного комплекса¹.

Ускоритель для разгона микрочастиц. Для разгона микрочастиц использовали взрывной ускоритель (рис. 1) с кумулятивной линзой из трех состыкованных полусфер, обеспечивающий скорость потока микрочастиц 1–2,5 км/с.

Кумулятивная линза выполняет две функции: является контейнером для ускоряемых микрочастиц и формирует поток микрочастиц в виде кумулятивной струи. Кумулятивная линза изготавливается из алюминия.

Принцип действия разработанного ускорителя основан на создании физических условий для разгона микрочастиц до скоростей порядка 1–2,5 км/с. Для осуществления таких скоростей использовали кумуляцию энергии взрыва зарядов ВВ.

Применение эффекта Холла в исследовании магнитодинамических процессов. В основу методики регистрации электромагнитного излучения положен эффект Холла [4]. Эффект Холла заключается в том, что в полупроводнике с током, помещенном в магнитное поле, возникают электродвижущие силы (э. д. с.).

¹ Устройство для измерения индукции переменного магнитного поля: патент РБ № 9111 / В. И. Овчинников, Е. А. Дорошкевич, О. И. Коваль, В. Т. Шмурадко; дата публ.: 11.01.2007.

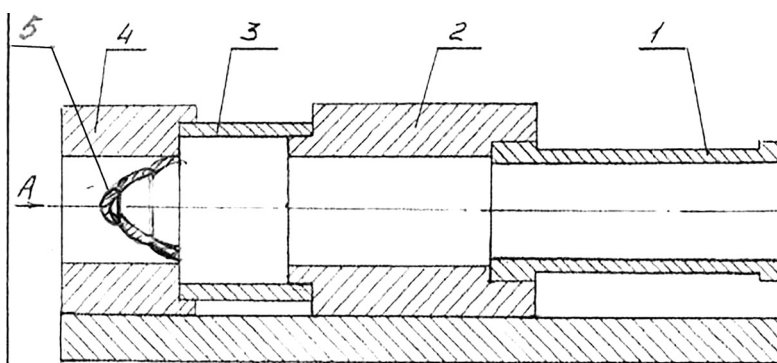


Рис. 1. Конструкция ускорителя микрочастиц: 1 – направляющая потока частиц нужного диаметра; 2 – регулирующая (фокусирующая) опора; 3 – камера формирования потока частиц; 4 – корпус взрывного устройства; 5 – кумулятивная воронка (линза)

Fig. 1. Design of the microparticle accelerator: 1 – guide for the flow of particles of the desired diameter; 2 – adjusting (focusing) support; 3 – particle flow forming chamber; 4 – the case of the explosive device; 5 – cumulative funnel (lens)

Причины возникновения э. д. с. Холла заключаются в изменении траектории движения электронов и дырок в полупроводнике вследствие действия силы Лоренца при наличии внешнего магнитного поля. Она действует перпендикулярно к направлениям скорости носителей заряда и магнитной индукции B . Сила Лоренца $F = g[VB]$, где g – заряд носителей для электрона ($-e$), дырки ($+e$), а V – их скорости.

Напряженность поля H и э. д. с. U в эффекте Холла можно выразить формулами

$$H = R_x B_n j,$$

$$U = R_x B_n I / d,$$

где d – толщина образца; I – полная сила тока; R_x – коэффициент Холла; B_n – проекция величины магнитной индукции на плоскость, перпендикулярную пластине Холла.

Важным параметром для расчетов и измерений физических величин является коэффициент Холла, который зависит от изменения внешних факторов, воздействующих на полупроводниковый материал датчиков.

Для промежуточных полей коэффициент Холла можно представить в виде

$$R_x = \frac{(p - nb^2) + b^2 \mu_p^2 B^2 (p - n) I}{(bn + p)^2 + b^2 \mu_p^2 B^2 (p - n)^2 e'}$$

где $b = \mu_n / \mu_p$.

Это выражение справедливо для случая, когда время жизни (релаксации) носителей постоянно и не зависит от их скорости.

Коэффициент Холла может зависеть и от таких внешних факторов, как давление, уровень радиационных воздействий и пр. Но наиболее эффективно влияющими на R_x факторами являются температура среды и магнитные поля.

Измерительно-вычислительный комплекс и методика измерений. Для проведения измерений применяли измерительно-вычислительный комплекс, предназначенный для измерения и визуализации на экране дисплея компьютера трехмерных составляющих вектора индукции магнитного поля в зависимости от времени в режиме *in situ*, с дальнейшей математической обработкой полученной информации. Диапазон регистрируемых квазистатических и динамических магнитных полей 0,01 мТл – 2 Тл. На рис. 2 представлена структурная схема измерительного комплекса.

Методика измерения и принцип расчета индукции магнитного поля. Измерения составляющих вектора индукции магнитного поля B , т. е. B_x, B_y, B_z в декартовой системе координат X, Y, Z осуществляли с использованием трех преобразователей (полупроводниковых датчиков) Холла,

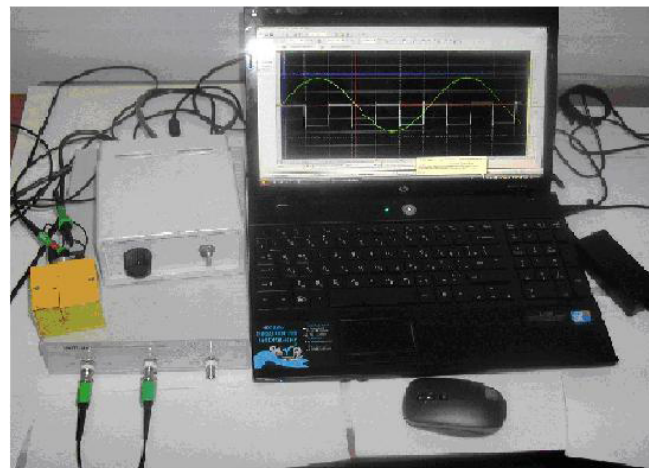
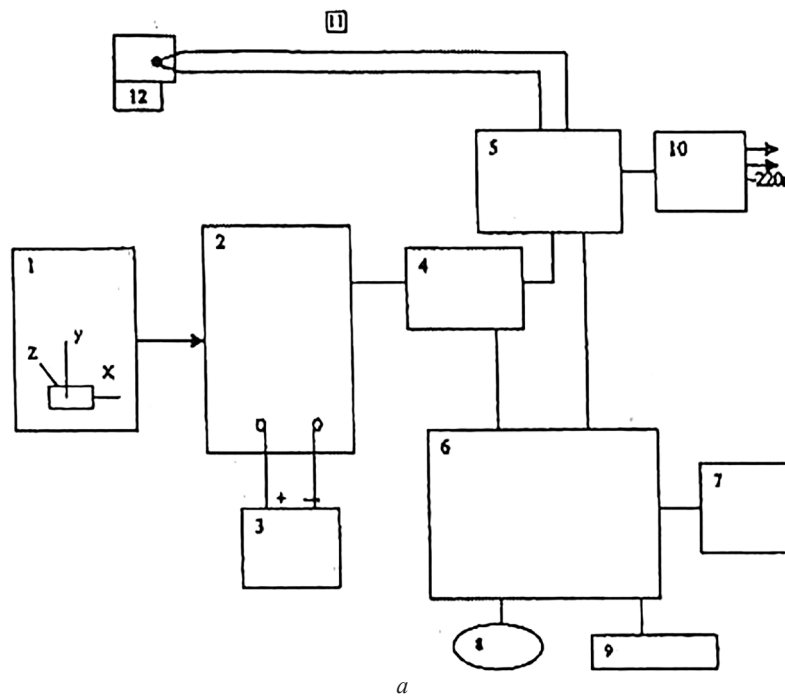


Рис. 2. Измерительный комплекс: *a* – структурная схема измерительного комплекса: 1 – датчик Холла; 2 – блок усиления сигнала; 3 – блок питания; 4 – разветвительная коробка; 5 – блок коммутации с АЦП; 6 – системный блок ПК; 7 – монитор ПК; 8 – мышь; 9 – клавиатура; 10 – блок питания от сети; *b* – измерительные приборы комплекса

Fig. 2. Measuring complex: *a* – block diagram of the measuring complex: 1 – Hall sensor; 2 – signal amplification unit; 3 – power supply unit; 4 – junction box; 5 – switching unit with ADC; 6 – PC system unit; 7 – PC monitor; 8 – mouse; 9 – keyboard; 10 – power supply from the network; *b* – measuring devices of the complex

размещенных в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, нормаль к которым проходит по осям X , Y , Z соответственно.

Чувствительность преобразователя Холла Υ к магнитному полю B в режиме изменения э. д. с. Холла описывается соотношением

$$\Upsilon = U_x / B = R_x I d^{-1} = I(\text{end})^{-1} = (Pb\mu/lden)^{1/2},$$

где U_x – напряжение Холла на выходе датчика; B – величина индукции магнитного поля (одна из составляющих B_x , B_y , B_z , направленная по нормали к соответствующему датчику); P – мощность,

рассеиваемая на ПХ; $R_x = -1 / en$ – коэффициент Холла; n и μ – концентрация и подвижность электронов соответственно; b , l и d – ширина, длина и толщина пленки; I – ток питания преобразователя; e – заряд электрона.

Составляющие вектора индукции магнитного поля B определяли из измерений э. д. с. датчиками Холла по каждому каналу соответственно [4; 5]:

$$B_x = U_x / \Upsilon_1,$$

$$B_y = U_y / \Upsilon_2,$$

$$B_z = U_z / \Upsilon_3,$$

где Υ_1 , Υ_2 , Υ_3 – магнитные чувствительности датчиков Холла, измеренные при постоянном магнитном поле (в статике наиболее точные измерения).

Сигналы с выхода усилителя каналов X , Y , Z подаются на соответствующие входы плат АЦП системного блока компьютера.

Если в момент времени t на экране монитора э. д. с. по каналам X , Y , Z равны U_x , U_y , U_z соответственно в [мВ], то соответствующие составляющие вектора магнитной индукции определяются в [мТл] по формулам

$$B_x = U_x / V,$$

$$B_y = U_y / V,$$

$$B_z = U_z / V.$$

Относительная погрешность измерения не превышает ± 5 %.

Модуль вектора магнитной индукции рассчитывается по формуле

$$B = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2} = \{(U_x^2 + U_y^2 + U_z^2)^{1/2}\} / V.$$

Относительная погрешность, вызванная отклонением размещения оси (например) X от заданного направления на угол β , вычисляется по формуле

$$\Delta x = \{B_x - B_x \cos(\beta)\} / B_x = 1 - \cos(\beta).$$

Расчетная относительная погрешность, выраженная в процентах от верхнего предела измерений (± 2 В), при изменениях температуры окружающего воздуха на каждые 10 °С по сравнению с комнатной не должна превышать $\pm 0,75$ %.

Введение микрочастиц в состав ПВ. Состав ПВ конденсированных ВВ представляет собой смесь газообразных и конденсированных продуктов при высоких давлениях и температуре. Подобные состояния типичны для низкотемпературной неидеальной многокомпонентной и многофазной плазмы с малой концентрацией частиц. Основную массу ПВ составляют газообразные продукты элементного состава CHNO , образующиеся при высокотемпературном разложении ВВ и находящиеся при высоком для этих веществ давлении [6].

Если в состав ПВ добавить определенное количество частиц порошка, то мы изменим не только состав продуктов взрыва, но и состояние неидеальной плазмы. Попробуем представить и описать модель состояния неидеальной плазмы взрыва и плазмы с добавленными частицами.

В результате добавки частиц, мы получим в составе плазмы заряженные частицы, в нашем случае SiC , а точнее их диполи двух видов. В процессе взаимодействия частиц с движущимися электронами на их поверхности образуется отрицательный заряд, а сама частица будет иметь положительный. Это диполь, образованный самой частицей. Могут образоваться диполи из двух разноименно заряженных частиц. Плазма с заряженными частицами является системой с сильным кулоновским взаимодействием, что может приводить к высокой степени неидеальности за счет значительной величины заряда макрочастиц. Вопрос упорядочения частиц в такой системе с сильным кулоновским взаимодействием остается неизученным.

Для плазмы с микрочастицами, должно быть характерно то, что частицы в такой плазме могут заряжаться потоками электронов и ионов, а также путем термо- или вторичной эмиссии электронов с их поверхности. Последние два варианта в данной работе мы не рассматриваем. Благодаря своим размерам, от нескольких микрон до десятков и даже сотен микрон, вводимые в плазму частицы могут иметь заряд Z порядка 10^2 – 10^5 элементарных зарядов. В результате средняя кулоновская энергия взаимодействия частиц, которая зависит от Z^2 может превосходить их тепловую энергию, что приводит к возникновению сильнонеидеальной плазмы [4]. В то же время электроны и ионы продуктов взрыва остаются идеальным газом. Таким образом, при изучении плазмы, содержащей макрочастицы, кроме диагностики газовой среды, необходимо определять основные параметры частиц, которые наряду с параметрами плазмы (концентрация и температура электронов, ионов и нейтралов) определяют ее основные свойства (электрофизические, термодинамические и др.).

Исследование влияния параметров эксперимента на изменение магнитной индукции. При подрыве заряда в результате схлопывания кумулятивной воронки и последующего процесса растяжения кумулятивной струи происходит вытягивание силовых линий магнитного поля внутри кумулятивной струи вдоль ее оси, и соответственно происходит нарастание индукции магнитного поля. В результате соударения кумулятивной струи, в состав которой входит поток ионизированных микрочастиц порошка (~1 %) и плазмы, материал мишени намагничивается и на поверхности раздела и вокруг мишени индуцируется магнитное поле, величина которого будет зависеть от количества частиц, магнитных свойств материала, ионизации и скорости потока частиц.

Рассмотрим как изменится величина магнитной индукции от энергии ускорителя (количества ВВ заряда), от которой зависит скорость микрочастиц. Результаты проведенных измерений индукции магнитного поля в зависимости от величины энергии (количества ВВ) представлены на рис. 3.

Из графика, представленного на рис. 3, следует, что значение индукции магнитного поля увеличивается с увеличением массы заряда, однако это значение находится не в прямопропорциональной зависимости и изменяется не прямолинейно. Это связано с тем, что большие градиенты за фронтом инициирующей ударной волны в конденсированных ВВ могут приводить к распределению электрических зарядов в детонационной плазме и движущемся потоке микрочастиц. Известно, что распределение электрических зарядов вызывает распределение электрического поля и потенциала. Распределение потенциала было обнаружено при исследовании электропроводности детонационной плазмы вдоль распространения детонации в работах [6; 7]. Установлено, что изменение массы взрывчатого вещества с 0,1 до 0,5 кг приводит к изменению индукции магнитного поля от 5 до 80 мТл.

Дополнительное введение микрочастиц порошка различного размера в кумулятивную воронку ускорителя приводит к изменению индукции магнитного поля и оказывает влияние на процесс кумуляции. Были проведены измерения индукции магнитного поля при введении

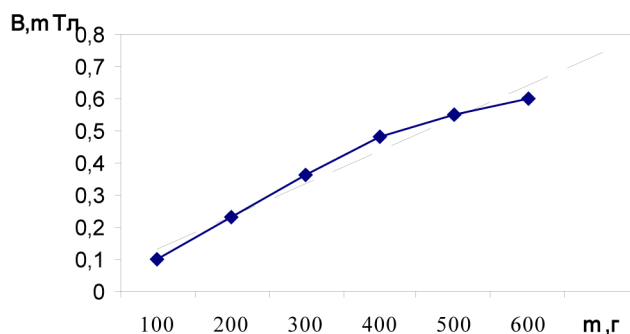


Рис. 3. Зависимость индукции магнитного поля от массы заряда

Fig. 3. Dependence of magnetic field induction on charge mass

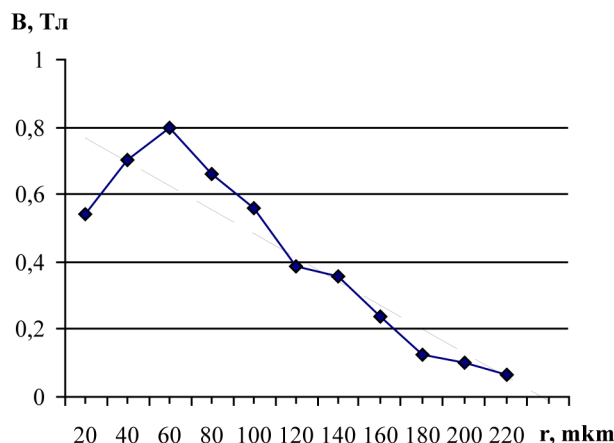


Рис. 4. Изменение индукции магнитного поля от размера вводимых частиц

Fig. 4. Changes in the magnetic field induction from the size of the introduced particles

в поток кумулятивной струи частиц SiC с размером от 21 до 200 мкм. Результаты измерений приведены на рис. 4.

График зависимости магнитной индукции от размера микрочастиц порошка, вводимого в поток неидеальной плазмы взрыва, показывает влияние размера частиц на состояние плазмы. С увеличением размеров свыше 150 мкм резко увеличивается неидеальность плазмы за счет увеличения числа нейтралов и снижения электрического потенциала плазмы.

Установлено, что зависимость интенсивности электромагнитного излучения от размеров частиц не является линейной функцией и увеличивается до максимального значения с изменением размера частиц от 20 до 100 мкм и резко уменьшается с увеличением размера от 150 до 300 мкм.

Полученные зависимости являются технологическими характеристиками процесса обработки материалов высокоскоростными потоками микрочастиц с применением энергии взрыва, регулируя которые можно сделать процесс управляемым.

Заключение. В результате проведенных исследований получены экспериментальные и теоретические подтверждения зависимости интенсивности электромагнитного излучения от условий движения, распределения и величины зарядов, в неидеальной плазме взрыва, зависящих от размеров микрочастиц при их дополнительном введении.

Использование разработанной методики имеет важное значение для оценки сигналов диагностики магнитных полей, являющихся неотъемлемой составляющей при обработке материалов потоками микрочастиц и неидеальной плазмы, ускоренных энергией взрыва, оказывающих определенное влияние на характер распределения потока микрочастиц и плазмы, которые зависят от его плотности, массы заряда, состава и количества заряженных микрочастиц.

Понимание связи электропроводности и распределения потенциалов с физикой детонации, знание зависимости изменения индуцируемых магнитных полей от количества вводимых взрывчатых веществ и их влияния на условия протекания процесса может позволить управлять этим процессом.

Список использованных источников

1. Ильющенко, А. Ф. Особенности зарождения электромагнитного поля в условиях ионизации продуктов взрыва / А. Ф. Ильющенко, В. И. Овчинников // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 1. – С. 115–119
2. Ильющенко, А. Ф. Особенности электромагнитного излучения при взаимодействии высокоскоростного потока микрочастиц карбида кремния с металлической преградой / А. Ф. Ильющенко, В. И. Овчинников // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 620–626. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-620-626>
3. Гилев, С. Д. Электропроводность продуктов детонации тротила / С. Д. Гилев, А. М. Трубачев // Тр. Междунар. конф. «3 Харитоновские научные чтения». – Саров, 2002. – С. 59–64.
4. Зубков, П. И. К электронному механизму проводимости продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ / П. И. Зубков, Б. Д. Янковский // Тезисы 15 Междунар. конф. «Уравнения состояния вещества». – Терскол, 2000. – С. 109–111.

5. Кобус, А. Датчики Холла и магниторезисторы / А. Кобус, Я. Тушинский; пер. с пол. В. И. Тихонова, К. Б. Макдонской; под ред. О. К. Хомерики. – Москва, 1971.
6. Антипенко, А. Г. О зоне электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ / А. Г. Антипенко, А. Н. Дремин, В. В. Якушев // Докл. Акад. наук СССР. – 1975. – Т. 225, № 5. – С. 1086–1088.
7. Кирко, В. И. Воздействие высоковольтной плазмы, полученной с помощью взрывного источника, на внутреннюю поверхность полости и канала / В. И. Кирко // Физика горения и взрыва. – 1978. – Т. 14, № 6. – С. 97–101.

References

1. Plyushchenko A. F., Ovchinnikov V. I. Origin of an electromagnetic field under ionization conditions of explosion products. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 1, pp. 115–119 (in Russian).
2. Plyushchenko A. F., Ovchinnikov V. I. Features of electromagnetic radiation in the interaction of a highspeed flow of silicon carbide microparticles with a metal barrier. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 5, pp. 620–626 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-620-626>
3. Gilev S. D., Trubachev A. M. Electrical conductivity of TNT detonation products. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii "3 Kharitonovskie nauchnye chteniya"* [Proceedings of the International Conference "3d Kharitonovskie Scientific Readings"]. Sarov, 2002, pp. 59–64 (in Russian).
4. Zubkov P. I., Yankovsky B. D. On the electronic mechanism of conductivity of detonation products of condensed explosives. *Tezisy 15 Mezhdunarodnoi konferentsii "Uravneniya sostoyaniya veshchestva"* [Theses of the 15th International Conference "Equations of state of matter"]. Terskol, 2000, pp. 109–111 (in Russian).
5. Kobus A., Tushinsky Ya. *Hall Sensors and Magnetoresistors*. Moscow, 1971 (in Russian).
6. Antipenko A. G., Dremine A. N., Yakushev V. V. On the zone of electrical conductivity during detonation of condensed explosives. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1975, vol. 225, no. 5, pp. 1086–1088 (in Russian).
7. Kirko V. I. Effect of high-enthalpy plasma from an explosive source on the inner surface of a cavity and channel. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1978, vol. 14, no. 6, pp. 781–785. <https://doi.org/10.1007/bf00786112>

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, директор. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mailbelpak.by.

Овчинников Владимир Ильич – канд. техн. наук, заведующий лабораторией. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: OvchinnikovVI@yandex.ru.

Information about the authors

Plyushchenko Alexander F. – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mailbelpak.by.

Ovchinnikov Vladimir I. – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: OvchinnikovVI@yandex.ru.