

## РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОРАЗМЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ МИ

*В.В. Куливар, НТУ «Днепровская политехника», Украина*

*А.Л. Кириченко, Государственное предприятие «Научно-производственное объединение «Павлоградский химический завод», Украина*

Разработана методика расчета сечения и интенсивности поглощения от длины волны лазерного излучения включением взрывчатого вещества с учетом использования теории упругого рассеяния оптического излучения на частицах микрометрового диапазона. Показано, что поглощательные свойства частицы существенным образом зависят от свойств среды, в которой эта частица находится, и от длины волны излучения.

В шестидесятых годах прошлого столетия экспериментально обнаружено явление зажигания взрывчатых веществ (ВВ) лазерным излучением, история которого и его физические особенности описаны, например, в [1-4]. Исследования возбуждения детонации проводились с использованием штатных иницирующих ВВ. Наибольшее внимание уделялось ТНРС, азиду свинца и серебра [5-7]; из вторичных ВВ наиболее детально изучая (и изучается) ТЭН [9, 10], в меньшей степени гексоген и октоген. В работах [10] и [11] изучались соответственно закономерности освещенности в объеме ВВ и влияние поглощающих примесей на механизм зажигания ВВ, при этом уделялось внимание вопросам кинетики и механизму разложения ВВ [12]. Исходя из современной концепции, в рамках которой предъявляются требования к первичным ВВ, принципиально новых свойств обнаружить не удавалось. Первичные ВВ оставались чрезвычайно чувствительными к механическим, тепловым воздействиям и опасными в обращении, характеризовались небольшой мощностью. По этим причинам их использование в лазерных системах было нецелесообразным. Для создания новой системы иницирования требовались первичные ВВ с высокой светочувствительностью.

Разработка и синтез светочувствительных энергонасыщенных композитов – первичных ВВ нового класса [2, 3, 13-19] для средств иницирования лазерных систем [20-23] стимулировало исследования физико-химических особенностей и взрывчатых характеристик иницирующих ВВ, в том числе, работ по поиску новых светочувствительных составов к действию лазерного излучения. Необходимость проведения таких исследований обусловлена главным образом относительно безопасным (с чувствительностью как у ТЭНа) применением первичных ВВ.

В настоящее время лазерное иницирование зарядов ВВ успешно используется на предприятиях машиностроительного и горно-металлургического комплекса, в пировавтоматике космических аппаратов, автомобилей и др. [1-4]. Требование практики заключается в создании безопасной к любым внешним электромагнитным воздействиям, прецизионной и максимально надежной, системы иницирования, превосходящей по своим техническим характеристикам известные мировые образцы [20]. Достижение подобного результата станет возможным в случае синтеза первичных ВВ, характеризующихся высокой светочувствительностью, мощностью, относительной безопасностью, в обращении и чувствительностью к тепловым и различным механическим воздействиям, соответствующей тэну.

Актуальность исследований заключается в изучении физических процессов, протекающих при лазерном нагревании оптических микронеоднородностей (дефектов кристаллической микроструктуры, посторонних примесей) для обоснования математической модели очагового зажигания светочувствительных композитов. Дефекты существенно искажают зонную структуру, а при воздействии лазерного излучения дополнительно поглощают излучение, вызывая очаговый разогрев и зажигание ВВ.

Целью исследования является разработка и апробация методики определения сечения поглощения лазерного излучения включением с учетом использования теории упругого

рассеяния оптического излучения на частицах микрометрового диапазона (теория Ми).

Для решения задачи лазерного инициирования зарядов ВВ в первую очередь требуется определение температурных полей в системе включение-матрица, точность расчета которых определяется корректным заданием скорости энерговыделения в поглощающем включении. Для этого необходимо достаточно точно задавать значение сечения поглощения  $O_p$ . Решение этого вопроса, на наш взгляд, возможно в рамках теории рассеяния света сферической частицей, разработанной Густавом Ми (теория Ми) [24-26].

Согласно этой теории, рассеянное частицей излучение представляется суперпозицией полей – мультиполей, индуцированных падающей волной в частице. Математически это выражается сходящимся рядом осциллирующих функций, зависящих от параметра дифракции

$$x = \frac{2\pi r_0}{\lambda}$$

и комплексного показателя преломления  $m = n - i\alpha$ .

Здесь  $r_0$ -радиус частицы,  $m$  и  $\alpha$  – показатели преломления и затухания на длине волны лазерного излучения  $\lambda$ .

Вычисления удобно проводить не для сечений, а для их безразмерных аналогов – эффективностей соответствующих процессов:

$$Q = \sigma / \sigma_g,$$

где  $\sigma$  -сечение процесса,  $\sigma_g = \pi r^2$  – геометрическое сечение для сферической частицы. Указанные ряды имеют вид [26]:

Для эффективности рассеяния :

$$Q_s = \frac{2}{x^2} \sum_{z=1}^{\infty} (2z + 1)(|a_z|^2 + |b_z|^2); \quad (1)$$

для эффективности ослабления:

$$Q_t = \frac{2}{x^2} \sum_{z=1}^{\infty} (2z + 1)\text{Re}(a_z + b_z); \quad (2)$$

для эффективности поглощения:

$$Q_a = Q_t - Q_s.$$

Зависимость  $Q$  от  $x$  и  $m$  заложена в специальных функциях  $a_z(x, m)$  и  $b_z(x, m)$ -коэффициентах Ми:

$$a_z = \frac{\varphi_z(x)\varphi'_z(y) - m\varphi_z(y)\varphi'_z(x)}{\xi_z(x)\varphi'_z(y) - m\varphi_z(y)\xi'_z(x)} \quad (3)$$

$$b_z = \frac{m\varphi_z(x)\varphi'_z(y) - \varphi_z(y)\varphi'_z(x)}{m\xi_z(x)\varphi'_z(y) - \varphi_z(y)\xi'_z(x)}$$

Здесь  $y = mx$ ; штрих обозначает производную по соответствующему аргументу,  $\varphi_z$  и  $\xi_z$  – функции Рикатти-Босселя, определяемые рекуррентными соотношениями [27]

$$W_{z+1} = \frac{2z+1}{z} W_z(z) - W_{z-1}, \quad (4)$$

$$W'_z(z) = -\frac{z}{z} W_z(z) - W_{z-1}(z). \quad (5)$$

Функции  $\varphi_z$  и  $\xi_z$  обладает следующим свойством :  $\varphi_z(x) = \text{Re}\xi_z(x)$  для действительных  $x$ .

Два первых значения функции, необходимые для применения рекуррентных формул (4), (5) имеют вид:

$$W_0(x) = \sin x + i \cos x$$

$$W_{-1}(x) = \cos xi - i \sin x$$

Использование рекуррентных формул для вычисления  $a_z$  и  $b_z$  приводит к ряду трудностей,

отмеченных в [25], а именно, происходит накопление погрешностей при вычислении убывающих функций, что влечет получение "верных", но физически бессмысленных результатов (сечение рассеяния становится больше сечения ослабления). В литературе описаны методы, позволяющие избежать этого. Они основаны на использовании цепных дробей, либо на применении для вычисления действительной и мнимой частей  $\xi$  для двух разных рекуррентных формул [80]. Как показывают результаты нашей программной реализации, их применение оправдано при расчетах для очень больших.

Следуя методу, предложенному в [25], введем логарифмическую производную

$$D_z(y) = \frac{\varphi'_z(y)}{\varphi_z(y)} \quad (7)$$

Используя (5), получим рекуррентную формулу

$$\left(D_z(y) + \frac{z}{y}\right) \left(D_{z-1}(y) - \frac{z}{y}\right) = -I$$

Отсюда образуется восходящая рекуррентность

$$D_z(y) = -\frac{z}{y} \left(D_{z-1}(y) - \frac{z}{y}\right)^{-1}.$$

Из (5) и (6) получим начальное значение  $D_0 = ctgu$  и асимптотическое значение для больших  $|y|$ :  $D_0 \approx 0 + i$

Из (3), применяя (4), (5) и (7), получаются выражения для коэффициентов Ми [25]

$$a_z = \frac{(D_z(y)/m + z/x) \operatorname{Re} W_z(x) - \operatorname{Re} W_{z-1}(x)}{(D_z(y)/m + z/x) W_z(x) - W_{z-1}(x)}$$

$$b_z = \frac{(D_z(y)/m + z/x) \operatorname{Re} W_z(x) - \operatorname{Re} W_{z-1}(x)}{(D_z(y)/m + z/x) W_z(x) - W_{z-1}(x)}$$

Для вычисления этих коэффициентов и эффективностей была разработана компьютерная программа. Чтобы не проявлялись отмеченные выше накопления погрешностей, последовательно использовались переменные двойной точности, поэтому отмеченные Дейрменджаном трудности не проявлялись даже при относительно больших размерах частиц ( $x \sim 200$  мкм). Суммирование в рядах (1), (2) проводилось до тех пор, пока

$$\frac{(2z + 1)(|a_z|^2 + |b_z|^2)}{\sum_{k=1}^{z-1} (2k + 1)(|a_k|^2 + |b_k|^2)} \leq \varepsilon$$

Или

$$\frac{(2z + 1)\operatorname{Re}(a_z + b_z)}{\sum_{k=1}^{z-1} (2k + 1)\operatorname{Re}(a_k + b_k)} \leq \varepsilon$$

При  $\varepsilon = 10^{-4}$  необходимо было учитывать  $z \simeq x = 10$  членов ряда.

Для частиц, находящихся в материальной среде, величина  $m$  имеет смысл относительного комплексного показателя преломления  $m = m_0/n_0$ , где  $n_0$  - усредненное по оптическим осям значение коэффициента преломления.

Данная методика применяется в расчетах текущих исследований для определения сечения поглощения металлического включения, находящегося в азидах металлов, а также сечения поглощения сажистой частицы в тэне при длинах волн 0,69 и 1,06 мкм.

Для свинцовой частицы

$$m_o = 1,19 - 2,15i, \lambda = 0,6 \text{ мкм},$$

$$m_o = 0,86 - 3,33i, \lambda = 1,06 \text{ мкм};$$

для сажистой частицы

$$m_o = 1,28 - 0,41i, \lambda = 0,69 \text{ мкм},$$

$$m_o = 2,5 - i, \lambda = 1,06 \text{ мкм} [29].$$

Для азида свинца  $n_o = 1,85$ , для тэна  $n_o = 1,6$  [30].

На рис. 1 и рис. 2 представлены результаты расчетов – зависимости эффективности поглощения (зависимости сечения поглощения) от параметров дифракции сажистой и свинцовой частиц соответственно, находящейся в воздухе и в матрице ВВ, при воздействии излучения неодимового и рубинового лазеров..

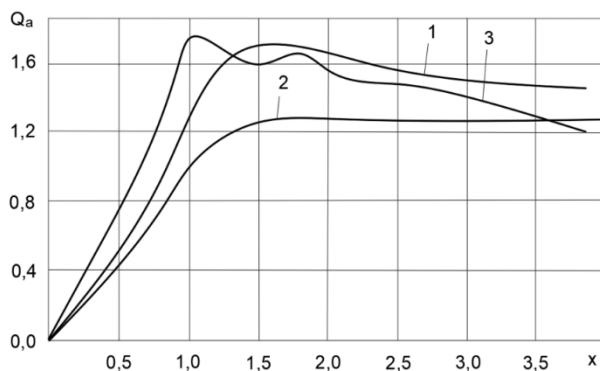


Рис.1. Зависимость сечения поглощения излучения от параметра дифракции на сажистой частице: 1 – частица в ТЭНе, длина волны излучения 1,06 мкм; 2 – частица в ТЭНе, длина волны излучения 0,69 мкм; 3 – частица в воздухе

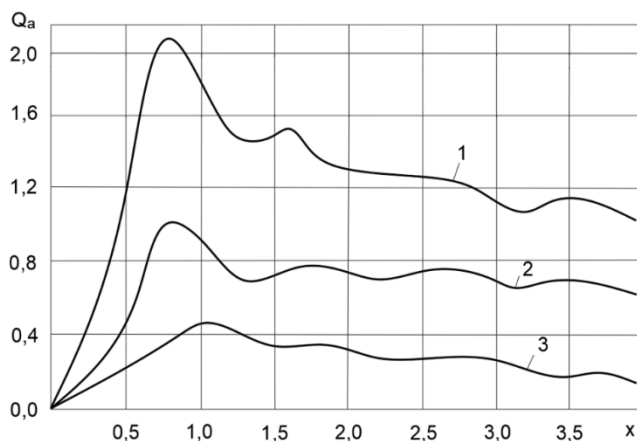


Рис. 2. Зависимость сечения поглощения излучения от параметра дифракции на свинцовой частице: 1 – частица в азиде свинца; длина волны излучения 0,69 мкм; 2 – частица в вакууме; длина волны излучения 1,06 мкм; 3 – частица в воздухе

Видно, что поглощательные свойства частицы существенным образом зависят от свойств среды, в которой эта частица находится, а также от длины волны излучения. Для сажистой частицы, находящейся в ТЭНе, поглощение при длине волны лазерного излучения 1,06 мкм сильнее, чем для излучения длиной волны 0,69 мкм. Иная картина поглощения, если свинцовая частица находится в азиде свинца: поглощение при длине волны 0,69 мкм в два раза сильнее, чем при длине волны 1,06 мкм

Предложенная методика расчета оптических характеристик микровключений использовалась для определения сечения поглощения в азидов металлов на длине волн неодимового и рубинового лазеров с целью выбора наиболее эффективного источника излучения для надежного инициирования первичных ВВ

#### Список литературы

1. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / Под ред. В.И. Кононова. – М.: Физматлит, 2008. – 312 с.
2. Илюшин М.А. Разработка компонентов высокоэнергетических композиций (Монография) / М.А. Илюшин, И.В. Целинский, А.М. Судариков и др. // СПб: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2006. – 150 с.
3. Илюшин М.А. Металлокомплексы в высокоэнергетических композициях: монография / М.А. Илюшин, А.В. Смирнов, А.М. Судариков и др. / Под. ред. И.В. Целинского. – Санкт-Петербург: ЛГУ им. А.С. Пушкина. – 2010. – 188 с.
4. [Сазонникова Н.А.](#) Лазерное инициирование детонации высокоэнергетических веществ. – Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&CO.KG, 2013. – 257 с.
5. Карабанов Ю.Ф., Боболев В.К. Зажигание инициирующих ВВ импульсом лазерного излучения // ДАН СССР. – 1981. – Т. 256, № 5. – С. 1152-1154.
6. Александров Е.И., Ципилев В.П. Исследование влияния длительности возбуждающего импульса на чувствительность азид свинца к действию лазерного излучения // Физика горения и взрыва. – 1984. Т.20, №6.–С.104-109.
7. Медведев В.В., Ципилев В.П. Особенности лазерного инициирования прессованных и насыпных порошков азид свинца / Энергетические конденсированные системы. Черноголовка, 2006. с.252-253
8. Таржанов В.И., Зинченко А.Д., Сдобнов В.И. Лазерное инициирование тэна // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 4, - С. 113-119.
9. Карабанов Ю.Ф., Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Зажигание твердых вторичных ВВ коротким импульсом ОКГ // В сб.: Горение конденсированных систем. – Черноголовка, 1977. – С. 5-8
10. Александров Е.И., Ципилев В.П. Особенности светового режима в объеме полубесконечного слоя ДРС при освещении направленным пучком конечной апертуры // Известия ВУЗов. Сер. физич. – 1988. – Т. 31, № 10. – С. 23-29.
11. Александров Е.И., Вознюк А.Г., Ципилев В.П. Влияние поглощающих примесей на зажигание ВВ лазерным излучением // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 26, № 1. – С. 3-9.
12. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П.. К вопросу о кинетике и механизме взрывного разложения азидов тяжелых металлов // Физика горения и взрыва. - 2006. - Т.42. - № 1, С.106-119.
13. Chernay A.V., Sobolev V.V., Ilushin M.A., Zhitnik N.E. (1994), "Generating mechanical pulses by the laser blasting of explosive coatings", Combustion, Explosion, and Shock Waves, V.30, No. 2, pp. 239-242.
114. Chernaj, A.V. Laser method of profiled detonation wave generation for explosion treatment of materials / A.V. Chernaj, V.V.Sobolev // Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov. – Issue 5, September 1995.–P. 120-123.
15. Chernay A.V.. Sobolev V.V.. Ilushin M.A. On the Mechanism of Energetic Materials By a laser Pulse // Chem. Phys. Reports. 1996. – V.15. – P.457-462.
16. Соболев В.В., Чернай А.В. Явище аномально високої чутливості вибухових сполук до детонаційного перетворення при дії лазерного моноімпульс // Наукові записки АН ВШУ. Вип. 1. К.: Хрещатик. – 1998. – С.289-296
17. Соболев В.В., Чернай А.В. Фізико-хімічні особливості взаємодії лазерного випромінювання з вибуховими сполуками // Наук. вісник Національної гірничої академії України.-1998.-№2.-С.66-69
18. Илюшин М.А., Соболев В.В., Чернай В.А. Иницирующие взрывчатые вещества и составы в опти-ческих системах иниции-рования пиросредств // Науковий вісник НГА України.-2001.-№1.-С.73-76

19. Chernai, A.V., Sobolev, V.V., Chernaj, V.A., Plyushin, M.A., Dlugashek, Laser ignition of explosive compositions based on di-(3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazole)-copper(II) perchlorate // Combustion, Explosion and Shock Waves Volume 39, Issue 3, May 2003, Pages 335-339
20. Sobolev V.V. OPSIN – A new system of blasthole and deep-hole charges blasting in explosives / V.V. Sobolev, A.V. Chernay, N.M. Studinsky // 5th – International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Sao Paulo, Brazil, 22-25 October 1996. – Sao Paulo, 1996. – P. 441-443.
21. Соболев В.В., Чернай А.В., Чернай В.А., Илюшин М.А. К вопросу о разработке системы лазерного взрывания зарядов ВВ // Высокоэнергетическая обработка материалов. Сб. науч. тр. / Редкол.: Соболев В.В. (Отв. ред.) и др. - Днепропетровск: Арт-Пресс, 1997. – С.63-67
22. Sobolev V., Chernay A. Physics and Chemistry of Materials Treatment // Scientific Reports of Mining, Metallurgy and Materials in Ukraine.– Freiburger Forschungshefte. – 2008. – P. 47–58.
23. Соболев В.В., Чернай А.В., Оболонский Р.В. Элементы оптической системы инициирования зарядов взрывчатых веществ // Перспективы освоения подземного пространства: матер. 5-й междунар научно-технич. конф. аспири и студ, 7-8 апреля 2011. – Д.: НГУ, 2011. – С.114-117.
24. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. –М. Наука, 197. – 885 с.
25. Дерменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения полидиспертными частицами. – М.: Мир, 1970. – 168 с.
26. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. – М.: Мир, 1981. – 280 с.
27. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стингана. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
28. Науменко Е.К., Пришивалко А.П., Кацева Н.Р. Оптимизация вычислительного алгоритма задачи о рассеянии излучения полидисперсными средами // Вестн. АН БССР, сер. физ.-мат. наук. –1975. – №1. – С. 71-79.
29. Таблицы физических величин / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
30. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнов Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред. – Л.: Химия, 1984. -

## **ВИВЧЕННЯ СТАНУ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК НА ШАХТАХ ТОВ «ДТЕК ДОБРОПІЛЛЯВУГІЛЛЯ»**

*Р.М. Терещук, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»*

Розглянуто гірничо-геологічні та гірничотехнічні умови проведення і підтримки гірничих виробок на шахтах ТОВ «ДТЕК Добропіллявугілля». Виконано аналіз виробничої діяльності ТОВ «ДТЕК Добропіллявугілля». Визначено основні фактори, що впливають на стійкість виробок. Намічено основні напрямки досліджень для вирішення технічних питань поліпшення роботи шахт, що пов'язані з проведенням, кріпленням і підтримкою гірничих виробок.

**Актуальність роботи.** Товариство з обмеженою відповідальністю «ДТЕК Добропіллявугілля» складається з двох шахтоуправлінь «Добропіллявугілля» і «Білозерське», в які входять п'ять шахт: «Добропіллявугілля», «Алмазна», «Білозерська», «Новодонецька» і «Піонер».

Поля шахт розташовані в північно-західній частині Красноармійського вугленосного району Донбасу і являють собою рівнину степового характеру площею близько 1900 км<sup>2</sup>.

Вугленосні відкладення Красноармійського регіону включають понад 50 вугільних пластів робочої потужності. Основна промислова вугленосність пов'язана з відкладеннями світ  $C_2^5$ ,  $C_2^6$ ,  $C_2^7$ , що містять більше 30 вугільних пластів, з яких понад 10 розташовані на значній площі і мають потужність 0,7...2,6 м. Потужність інших пластів не перевищує 0,65 м. Кут падіння