

УДК 662.215.4

А.Л. Кириченко  
В.В. Куливар  
В.В. Соболев

## ВЗРЫВЧАТЫЕ КОМПОЗИТЫ, ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ К ИМПУЛЬСНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

*Приведены основные результаты экспериментальных исследований некоторых физических характеристик светочувствительных энергонасыщенных композитов для средств иницирования лазерных систем. Рассматривается, в частности, энергонасыщенный композит, состоящий из порошка азидов свинца, распределенного в полимерной матрице. Исследуемый взрывчатый композит характеризуется аномально высокой чувствительностью к действию лазерного импульсного излучения, при этом чувствительность к механическим воздействиям находится на уровне чувствительности вторичных иницирующих взрывчатых веществ.*

*Ключевые слова: взрыв, импульс, лазер, излучение, композит, иницирование, чувствительность, детонация.*

**Постановка проблемы.** Практика выполнения различного вида взрывных работ ставит перед специалистами ряд новых научно-технических требований, необходимость выполнения которых в течение ближайшего будущего обусловлена актуальностью создания новых технологий и материалов. Остаются, например, нерешенными важные задачи в области создания малотоксичных и более мощных иницирующих ВВ, более безопасных неэлектрических систем иницирования зарядов взрывчатых веществ (ВВ). решение проблемы образования дополнительных вредных газов в продуктах взрыва при разрушении горных пород. В частности, к разрабатываемым системам иницирования предъявляются требования по обеспечению безопасности, надежности, многофункциональности передачи энергии к детонаторам, устойчивости к любым внешним электромагнитным воздействиям и прецизионному взрыванию.

**Современные достижения.** Систематические исследования лазерного иницирования светочувствительных свойств некоторых иницирующих ВВ особенно активно начали проводиться в последней четверти прошлого века в СССР [1-4], Украине [5,6], за рубежом [7,8]. Одной из таких систем, имеющих высокую стойкость к различным электромагнитным наводкам, является оптическая система иницирования зарядов ВВ, первый экспериментальный образец которой изготовлен специалистами Национального горного университета в 1994 г. [9]. В данной оптической системе предусмотре-

на возможность реализации короткозамедленного взрывания одновременно двумя способами: первый – за счет заданного времени задержки передачи излучения непосредственно от лазеров по магистральным световодным шнурам к группам зарядов [10]; второй способ состоит в использовании оптических детонаторов различных конструкций [11-14]. Иницирование детонации зарядов ВВ может быть осуществлено путем передачи лазерного импульса через воздушную атмосферу непосредственно на открытую для лазерного луча поверхность ВВ [15-17]. Кроме этого лазерная система позволяет осуществлять прецизионное взрывание заряда объемом до 1 мм<sup>3</sup>, массой несколько миллиграмм, возбуждать детонацию одновременно всей поверхности заряда ВВ любой конфигурации, в целом проводить любого вида взрывные работы [18-20], в том числе и такие, которые известными способами принципиально осуществить невозможно. Такой глубокий физический потенциал системы иницирования существенно расширяет области применения энергии взрыва.

Одной из особенностей создания оптических систем иницирования зарядов ВВ является конструирование лазерных источников энергии с электронной синхронизацией излучения активными элементами, а также разработка и синтез светочувствительных взрывчатых веществ [12-15]. Наиболее ответственным элементом системы является оптический детонатор, снабженный первичным светочувствительным ВВ. При лазер-

ном иницировании обеспечивается высокий уровень изолированности оптического детонатора (ОД) от внешних псевдоимпульсов, поскольку в оптическом диапазоне отсутствуют случайные источники с мощностью, достаточной для подрыва ОД [9,14].

Одним из главных элементов системы лазерного иницирования являются светочувствительные первичные ВВ в оптических детонаторах. Синтез нового класса первичных иницирующих взрывчатых веществ, чувствительных к воздействию лазерного излучения [5,14,15], положил начало развитию работ в создании новой конкурентоспособной системы оптического иницирования зарядов ВВ – ОПСИН [9]. Таким образом, новые светочувствительные иницирующие композиционные ВВ, по существу, дали жизнь оптической системе взрывания. Однако, несмотря на открытие нескольких десятков светочувствительных композиционных ВВ, известно не более трех типов ВВ с рекордно высокой чувствительностью, т.е. таких первичных взрывчатых веществ, которые можно рекомендовать к использованию в ОД.

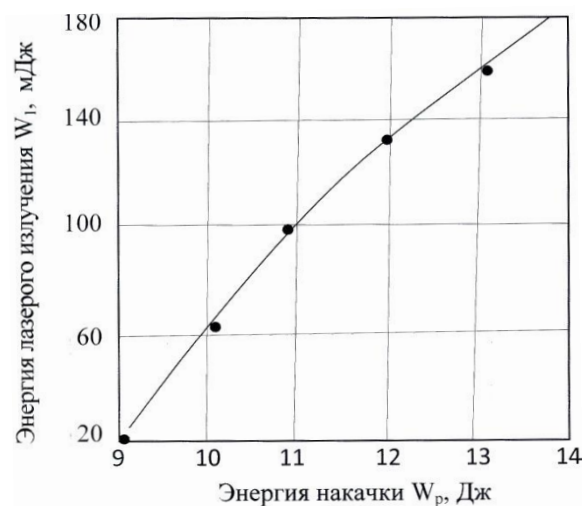
**Цель работы** – получение композиционных энергонасыщенных материалов на основе штатных первичных иницирующих ВВ для придания высокой чувствительности к действию лазерного импульсного излучения.

**Материалы и методика исследований.** Образцы ВВ для исследования на чувствительность к лазерному излучению представляют собой композиционные энергонасыщенные материалы (аналогичны композициям химического отверждения), состоящие из двух компонент: микрокристаллов ВВ, распределенных в твердой матрице, образованной затвердевшим полимером (ПМВТ-3М), прозрачной для лазерного излучения. Образцы взрывчатых составов (ВС) содержали полимер с массовой концентрацией 5, 10, 15, 20 и 30%. Диаметр образцов 7-10 мм, толщина до 3 мм. Исследовались два энергонасыщенных вещества:  $Pb(N_3)_2$  и  $BaNCIO_3$ . Источник лазерного излучения – оптический квантовый генератор (ОКГ) на неодимовом стекле CFR-200-10 PulsedNd: YAG Laser System.

Измерение энергии лазерного импульса осуществлялось калориметром ИКТ-1Н. Распределение интенсивности лазерного пучка по вертикальному и горизонтальному

его сечению получали с помощью анализатора Silicon Camera Model LBA-100A. Форма лазерного импульса измерялась с помощью быстродействующего фотодиода Sub-Nanosecond 50 ohm Photodiode фирмы Instrument Technology LTD. В экспериментах использовался 2-х канальный цифровой осциллограф TDS 1000 фирмы Tektronix (США). Лазеры работают в импульсном режиме; длина волны  $\lambda=1,06$  мкм.

Установлено, что при рабочем напряжении накачки 1500 В значение энергии лазерного моноимпульса находилось в диапазоне  $E_r = 0,150 \dots 0,155$  Дж. Возможно, такой разброс значений обусловлен погрешностью калориметра. Несмотря на то, что общие характеристики лазера были известны, для оперативного изменения энергии излучения  $W_l$  (за счет энергии накачки лампы-вспышки  $W_p$ ) была установлена зависимость  $W_l = W_l(W_p)$ , рис. 1.



**Рис. 1.** Зависимость энергии лазерного импульса от энергии накачки

Энергия лазерного излучения на поверхности исследуемых образцов композитных энергетических материалов измерялась прибором ИЭЛ-300, показания которого масштабировались таким образом, чтобы они совпадали с показаниями калориметра ОРНИР, измерительная головка которого размещалась в месте установки исследуемого образца. Погрешность измерения энергии излучения калориметром в диапазоне от 1 до 100 мДж не превышала 3%. Калориметр ОРНИР использовался также для определения зависимости выходной энергии лазерного излучения  $W_l$  от энергии накачки  $W_p$  – энергии излучения импульсной лампы–

вспышки.

Распределение плотности энергии в лазерном пучке определялось с использованием анализатора лазерного пучка Silicon Camera Model LBA-100A фирмы Spiricon. Анализатор включал камеру высокого разрешения Pulnix TM-745 (количество зарядных элементов в матрице равно 768(H)×493(V), размер одного элемента 11 мкм×13 мкм), непосредственно регистрирующей излучение, и микропроцессорную систему, анализирующую распределение энергии и отображающую результаты на мониторе.

При измерении критической энергии зажигания ВВ использовались светофильтры СЗС-17, НС-3, НС-7, СС-1, СЗС-20 с предварительно измеренным коэффициентом пропускания на длине волны лазера  $\lambda=1,06$  мкм, значения которого равнялись соответственно 0,2; 0,25; 0,5; 0,53 и 0,84. Светофильтр перед фотоэлектрическим преобразователем ФК-2 устанавливался для ослабления сигнала, регистрируемого осциллографом. Установка позволяла измерять чувствительность ВВ величину импульса продуктов взрыва. Подрыв образцов осуществлялся в стальной камере, диаметр которой равен 430 мм, длина 600 мм, толщина стенок 20 мм. Для корректного измерения параметров лазерного зажигания использовался одномодовый одночастотный ОКГ.

**Результаты исследования.** Функция распределения плотности энергии в лазерном пучке определялась в соответствие с разработанной методикой измерения диаметра лазерного пятна – отпечатка на материале, претерпевающим фазовое превращение, которое наблюдалось как визуально, так и под микроскопом. Фазовый переход должен носить пороговый характер, то есть осуществляться при воздействии энергии лазерного, излучения, плотность которой превышает некоторую пороговую величину  $E^*$ . В качестве такого материала использовалась засвеченная и проявленная фотобумага, изменяющая окраску при лазерном воздействии. В этом случае получают контрастные отпечатки, размеры которых могут быть измерены с большой точностью. Основное допущение, которое было принято в данной методике следующее: функция распределения интенсивности излучения в поперечном сечении пучка не меняется от импульса к импульсу. Это требо-

вание выполняется при стабильной работе ОКГ, генерирующего импульсы с одинаковой энергией. Изменение плотности энергии излучения осуществлялось с помощью калиброванных светофильтров.

Распределение плотности энергии по сечению пучка находили, используя следующее выражение:

$$E(r) = E_0 \omega(r), \quad (1)$$

где  $E_0$  – плотность энергии в центре пучка;  $r$  – радиус кольца шириной  $dr$ , на котором ищется значение величины  $E(r)$ .

Представление функции плотности энергии в виде (1) предполагает радиальную симметрию функции распределения. Нормируя эту функцию на полную энергию в импульсе

$$W = 2\pi E_0 \int_0^{\infty} \omega(r) r dr \quad (2)$$

и разделив (1) на (2), получим:

$$E(r) / W = \omega(r) / 2\pi k$$

где  $k = \int_0^{\infty} \omega(r) r dr$  – коэффициент.

Меняя пропускание лазерного тракта, на фотобумаге была получена серия отпечатков, радиусы которых измеряли с помощью микроскопа. Граница отпечатков соответствует пороговой энергии изменения окраски  $E^*$ . Используя результаты измерений, запишем систему уравнений в виде:

$$E^*(r) / W_i = w(r_i) / 2\pi k, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где  $n$  – количество измерений;  $W_i$  – энергия излучения, при которой радиус отпечатка равен  $r_i$ .

Путем экстраполяции зависимости радиуса лазерного пучка от лазерной энергии  $W(r)$  было найдено, что для радиуса, равного нулю,  $W(0) \approx 2$  мДж. Таким образом, зная эту величину, определяем пороговую энергию фазового превращения фотобумаги:

$$E^* / W(0) = w(0) / 2\pi k = 1 / 2\pi k \quad (4)$$

Разделив последовательно уравнения системы (3) на уравнение (4), получим  $\omega(r_i) = W(0) / W_i, \quad i = 1, \dots, n.$

Знание функции распределения  $\omega(r)$  полностью решает поставленную задачу. Для определения плотности энергии в центре пучка  $E_0$ , а также  $E^*$  необходимо путем

графического интегрирования найти величину  $k$ . После этого по формуле  $E_0=W/(2\pi k)$  была вычислена плотность энергии  $E_0$ .

В дальнейшем экспериментально полученная функция распределения аппроксимировалась распределением Гаусса. Аналитическое представление распределения плотности энергии по диаметру пучка удобно использовать при обработке экспериментальных результатов.

Форма лазерного импульса показана на рис. 2. Характерное время нарастания и спада импульса составляет  $10^{-10}$  с. Сигнал с фотодиода регистрировался осциллографом SCD 1000. Максимальная частота входного сигнала составляет 1 ГГц. Из рисунка видно, что длительность лазерного импульса на полувысоте интенсивности составляет  $Dt=10,997$  нс; форма импульса практически не менялась от "выстрела к выстрелу".

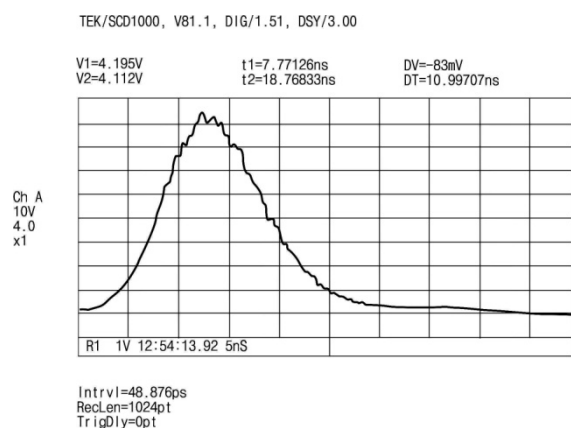


Рис. 2. Форма лазерного моноімпульса

Результаты исследований чувствительности некоторых образцов композитных

высокоэнергетических материалов приведены в табл. Для сравнения приведены значения энергий зажигания штатных взрывчатых веществ как весьма чувствительных к внешним физическим воздействиям – азида свинца и тринитрорезорцината свинца. В сыпном виде эти ВВ под действием лазерного излучения не взрывались, микрочастицы разбрасывало в стороны как инертный материал. Поэтому в экспериментах образцы этих первичных ВВ были получены путем предварительного прессования при давлении  $2 \times 10^9$  Па. Видно, что рекордно высокой чувствительностью характеризуется ВС-2 – почти в 50 раз большей чувствительностью, чем прессованный азид свинца. Таким образом, исследованные композитные энергоёмкие материалы  $BaNCIO_3$  и  $PbN_6$  можно характеризовать как светочувствительные инициирующие ВВ.

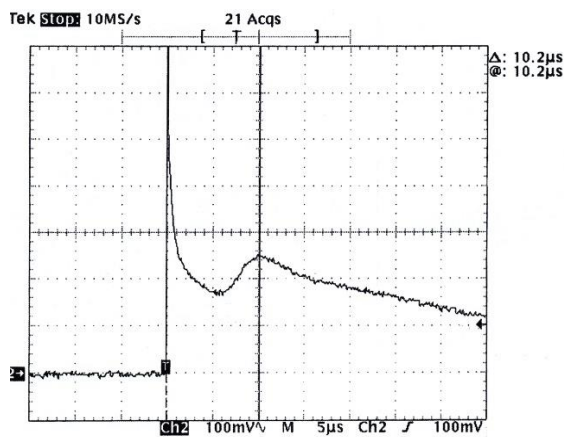
Природа взрыва азида свинца или азида серебра заключается в деформации их кристаллической решетки, являясь причиной нарушения стабильности группы  $N_3$ , – что ведет к ее дестабилизации, потере устойчивости и распаду [21], а, следовательно, к образованию реакционно-активных радикалов  $N_3$ , взаимодействие которых в условиях плотной упаковки атомов твердого тела является причиной подрыва ВВ[22].

Пороговые значения энергии инициирования детонации композиционных энергонасыщенных материалов свидетельствует об аномально высокой их чувствительности к лазерному импульсу в сравнении с первичными ВВ.

Таблица 1 – Результаты исследований чувствительности композитных энергонасыщенных веществ к действию лазерного излучения

Энергонасыщенное вещество	Концентрация полимера, %	Минимальная плотность энергии инициирования $E_{кр}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Светочувствительность
ТНПС (прессованный порошок)	0	$\sim 2,5 \times 10^{-1}$	слабая
$Pb(N_3)_2$ (прессованный порошок)	0	$\sim 1,0 \times 10^{-1}$	слабая
ВС-2	20	$\sim 2,3 \times 10^{-3}$	высокая
$BaNCIO_3$	10	$\sim 5,0 \times 10^{-3}$	высокая
$Pb(N_3)_2$	30	$\sim 5,1 \times 10^{-2}$	средняя

При определении времени задержки взрыва относительно лазерного импульса в процессе экспериментов выяснилось, что измерения можно проводить с помощью одного фотодиода, который регистрировал как лазерный импульс, так и импульс света от продуктов взрыва. Типичная осциллограмма приведена на рис. 3. Первый пик соответствует лазерному импульсу, а второй пик соответствует максимуму светового излучения, исходящего от продуктов взрыва. При использовании двухканальной схемы регистрации с помощью двух фотодиодов результаты были аналогичными.



**Рис. 3.** Осциллограмма регистрации времени задержки зажигания  $\text{BaNCIO}_3 + 10\%$  ПМВТ-3М, инициированно-го действием лазерного моноимпульса

Установлена зависимость задержки времени зажигания исследованных светочувствительных ВВ относительно начала действия лазерного импульса от плотности световой энергии. При массовой концентрации полимера 15 % время задержки оказывается больше, чем у образцов, содержащих 20% полимера. Логичным был бы результат обратный: чем больше содержание взрывчатого вещества в ВС, тем меньше должно быть время задержки "зажигания". На наш взгляд, отмеченный факт свидетельствует о том, что индукционное время зажигания ВС определяется временем формирования очага зажигания, а время перехода от горения к детонации составляет сравнительно малую часть от общего регистрируемого времени задержки зажигания.

В качестве характеристики чувствительности может быть выбрана или средняя плотность энергии лазерного импульса

$E_{cp} = 4W / \pi d^{*2}$ , или плотность энергии в центре пучка  $E_0$ . Здесь  $d^*$  – диаметр отпечатка.

**Выводы.** Отработана методика относительно безопасного получения инициирующих композитов смешиванием порошка азид свинца с жидким полимером. Принципиальным отличием полученного высокоэнергетического композита от штатного инициирующего азид свинца является аномально высокая чувствительность к действию лазерного излучения – об аномальной чувствительности свидетельствует низкое пороговое значение энергии инициирования детонации.

Светочувствительные композиционные ВВ, исследованные в данной работе, целесообразно использовать в качестве инициирующих в оптических детонаторах лазерных систем. Флегматизированный азид свинца характеризуется значительно меньшей опасностью в обращении, определяя, таким образом, и соответственно меньшую степень опасности системы инициирования в целом.

Основной объем исследований выполнен при непосредственном участии доктора физико-математических наук, профессора Черная Анатолия Владимировича, в память о котором написана данная статья.

### Список литературы

1. Бриш А.А. О механизме инициирования ВВ излучением ОКГ / А.А. Бриш, И.А. Галеев, Б.Н. Зайцев // Физика горения и взрыва. – 1969. – Т. 5, №4. – С. 475-480.
2. Александров Е.И. Инициирование азид свинца лазерным излучением / Е.И. Александров, А.Г. Вознюк // Физика горения и взрыва. – 1978. – Т. 14, №4. – С. 86-91.
3. Александров Е.И. Влияние режима генерации на особенности размерного эффекта при лазерном инициировании прессованного азид свинца / Е.И. Александров, В.П. Ципилев // Физика горения и взрыва. – 1982. – №6. – С. 60-62.
4. Карабанов Ю.Ф. Зажигание инициирующих взрывчатых веществ импульсным лазерным излучением / Ю.Ф. Карабанов, В.К. Боболев // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 256, №5. – С. 1152-1155.
5. О методе получения механических импульсов нагружения, основанном на лазерном подрыве покрытий из взрывчатых составов / А.В. Чернай, В.В. Соболев, М.А. Илюшин // Физика горения и взрыва. – 1994. – №2. – С. 67-73.
6. 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.
7. Hagan J.T. Low energy laser initiation of single

crystal of  $\alpha$ -lead aside / J.T. Hagan, M.M. Chaundri // *J. Mat. Sci.* – 1999. – V.16, 9. – P. 2457-2466.

8. Robert J. Harrach. Estimates on the ignition of high explosives by laser pulse / J. Robert / *Appl. Phys.* – 1976. – V. 47, №6. – P. 2473–2482.

9. Sobolev V.V. OPSIN – A new system of blast-hole 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.

10. Generating mechanical pulses by the laser blasting of explosive coatings / Chernay A.V., Sobolev V.V., Puzhin M.A., Zhitnik N.E. // *Combustion, Explosion, and Shock Waves.* – 1994. – V.30, №2. – P. 239–242.

11. Куратов С.Е. Физико-математическая модель лазерного детонатора / С.Е. Куратов, А.А. Серёжкин, А.А. Чесноков // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике.* – 2015. – Т.16, №1. – С. 1–9.

12. 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.

13. 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.

14. Илюшин М.А. Энергонасыщенные вещества для средств инициирования / М.А. Илюшин И.В. Целинский, А.А. Котомин и др. – СПб.: СПб ГТИ (ТУ). – 2013. – 176 с.

15. Sobolev V.V. Laser Ignition of Explosive Compositions Based on di-(3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazole)-Copper(II) Perchlorate / V.V. Sobolev, A.V. Chernay, V.A. Chernay [et. al.] // *Combustion, Explosion, and Shock Waves.* – 2003. – V.39, №3. – P.335–339.

16. Леоненко Н.А. Воздействие лазерного излучения на энергонасыщенные составы / Н.А. Леоненко, В.И. Архипов // *Добыча золота. Проблемы и перспективы. Доклады научного семинара 25-27 ноября 1997 г. Хабаровск.* – 1997. – Т. 3. – С. 385–388.

17. Coordination complexes as in organic primary explosives / M.A. Ilyushin, I.V. Tselinsky, I.A. Ugrumov, [et al.] // *Proceeding of the VI seminar "New trends in research of energetic materials".* – Pardubice. Czech Republic. – April 22–24, 2002. – P. 146–152.

18. Зажигание взрывчатых веществ импульсным лазерным излучением / А.В. Чернай, В.В. Соболев, В.А. Чернай, М.А. Илюшин и др // *Физика импульсной обработки материалов: под ред. В.В. Соболева.* – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2003. – С. 267–314.

19. Соболев В.В. Обработка металлов взрывом с применением лазерного инициирования зарядов взрывчатых веществ / В.В. Соболев, А.В. Чернай // *Высокоэнергетическая обработка материалов [Сб. научн. трудов] / Редкол.: В.В.Соболев (отв. ред.), Л.Н. Шиман и др. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2009. – С. 173–181.*

20. Илюшин М.А. Лазерное инициирование светочувствительных энергетических материалов, перспективных для систем пировавтоматики космических аппаратов / М.А. Илюшин, А.А. Котомин, С.А. Душенков и др. // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина.* – 2017. – №1 (35). – С. 43–52.

21. Sobolev V. The evolution of molecules chemical bonds stability in the field of surface charges / V.Sobolev//*Scientific Reports on Resource Issues 2010. Volume 1. – Freiberg (Germany): TU Bergakademie Freiberg, 2010. – p.186–193.*

22. Чернай А.В. О механизме зажигания конденсированных вторичных ВВ лазерным импульсом / А.В. Чернай // *Физика горения и взрыва.* – 1996. – Т. 32, № 1. – С. 62–69.

## References

1. Brish A.A., Galeev I.A., Zaitsev B.N. (1969), "On the mechanism of initiation of explosive by laser radiation", ["O mehanizme inicirovaniya VV izlucheniem OKG"], *Fizika Goreniya i Vzryva*, V. 5, No. 4, pp. 475-480 (In Russian)].

2. Aleksandrov E.I., Voznyuk A.G. (1978), "Initiation of lead azide with laser radiation", ["Inicirovanie azida svinca lazernym izlucheniem"], *Fizika Goreniya i Vzryva*, V. 14, No. 4, pp. 86-91 (In Russian)].

3. Aleksandrov E.I., Tsipilev V.P. (1982), "Effect of the generation regime on the features of the size effect during laser initiation of the pressed lead azide", ["Vlijanie rejima generacii na osobennosti razmernogo efekta pry lazernom unyucyrovayu presovannogo azida svintsja"], *Fizika Goreniya i Vzryva*, No. 6. pp. 60-62 (In Russian)].

4. Karabanov Yu.F., Bobolev V.K. (1981) "Ignition of initiating explosives by pulsed laser radiation", ["Zazhyhanye iniciiruyushih vzrivchatyh veschestv impulsnyim lazernym izlucheniem"], *Doklady AN SSSR*, V. 256, No. 5, pp.1152–1155 (In Russian)].

5. Chernaj, A.V., Sobolev, V.V., Ilyushin, M.A. (1994), "The method of obtaining mechanical loading pulses based on a laser initiation of explosion of explosive coatings", ["O metode polucheniya mehanicheskikh impulsov nagruzheniya, osnovannom na lazernom podryve pokritiy iz vzrivchatyh veschestv"], *Fizika Goreniya i Vzryva*, Volume 30, Issue 2, pp. 106-111.

6. Chernaj, A.V., Sobolev, V.V. (1995), "Laser method of profiled detonation wave generation for explosion treatment of materials", *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, Issue 5, pp. 120-123.

7. Hagan J.T., Chaundri M.M. (1999), "Low energy laser initiation of single crystal of  $\alpha$ -lead aside", *J. Mat. Sci.*, V.16, 9, pp. 2457-2466

8. Robert J. Harrach. (1976), "Estimates on the ignition of high explosives by laser pulse", *J. Appl. Phys.*, V. 47, No. 6, pp. 2473-2482

9. Sobolev V.V., Chernay A.V., Studinsky N.M. (1996) "OPSIN-A new system of blast-hole and deep-hole charges blasting in explosives", *5th – International Symposium on Mine Planning and Equipment Selektion, Sao Paulo, Brazil*, pp. 441-443.

10. Chernay A.V., Sobolev V.V., Puzhin 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.

11. Kuratov S., Serezhkin A., Chesnokov A. (2015), "Physico-Mathematical Model of Laser Detonator", ["Fiziko-matematicheskaya model lazernogo detonatora"], *Fiziko-himicheskaya kinetika d hazovoy dinamike*, V.16, No. 1. pp.1-9 (In Russian)].

12. Ilyushin M.A. I.V. Tselinsky, A.M. Sudarikov [et al.] (2006), "Development of components of high-energy compositions (Monograph)". ["Razrabotka komponentov visokoenerhetichesk-



yh kompozitsiy (Monografiya)”, *St. Petersburg, LGU im A.S. Pushkina Publ.*, pp. 150 (In Russian)].

13. Iliushin M.A., Smirnov A.V., Sudarikov A.M., Tselinskii I.V. (2010), ”Metallic complexes in high-energy materials”, [”Metallokompleksy v visokoenergeticheskyyh kompozitsiyah: monografiya”], *St. Petersburg, LGU im A.S. Pushkina Publ.*, pp. 188 (In Russian)].

14. Iliushin M.A., Tselinskii I.V., Kotomin A.A. (2013), ”High power substances for arsenal of initiation”, [”Enerhonasisheniye veschestva dlya sredstv iniciirovaniya”], *St. Petersburg, SPbGTI(TU) Publ.*, pp. 176 (In Russian)].

15. V.V. Sobolev, A.V. Chernai, V.A. Chernai [et. al.] (2003), ”Laser Ignition of Explosive Compositions Based on di-(3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazole)-Copper(II) Perchlorate”, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, V.39, No. 3, pp. 335-339.

16. Leonenko H.A., Arkhipov V.I. (1997), ”Influence of laser radiation on energy-saturated compositions”, [”Vozdeystvie lazernogo izlucheniya na enerhonasisheniye sostavyi ”], *Dobicha zolota. Probemy I sostavyi. Doklady nauchnogo seinara*, V. 3, pp. 385-388 (In Russian)].

17. M.A.Ilyushin, I.V.Tselinsky, I.A.Ugrumov, A.Yu.Zhilin, A.S.Kozlov (2002), ”Coordination complexes as inorganic primary explosives”, *Proceeding of the VI seminar "New trends in research of energetic materials. – Pardubice. Czech Republic*, pp. 146–152.

18. Chernay A.V., Sobolev V.V., Chernay V.A., Ilyushin M.A. (2003), ”Ignition of Explosives by Pulsed Laser Radiation”, [”Zazhihanie vzrивchatih vesch-

estv impulsnym lazernym izlucheniem”], *Fizika Impulsvoy Obrabotki Materialov, Ed. V.V. Sobolev. – Dnepropetrovsk: Art-Press*, pp. 267–314.(In Russian)].

19. Sobolev V.V. Chernay A.V.(2009), ”Processing of metals by explosion with the use of laser initiation of explosive charges”, [”Obrabotka metallov vzryvom s primeneniem lazernogo iniciirovaniya zaryadov vzrивchatih veschestv.”], *High-energy material processing [Сб. nauchn. trudov] / Editorial Board: V.V.Sobolev (editor), L.N.Shiman and other. – Dnepropetrovsk: Art-Press*, pp. 173–181 (In Russian)].

20. Ilyushin M.A., Kotomin A.A., Dushenok S.A. etc. (2017), ”Laser initiation of photosensitive energy materials, promising for spacecraft pyroautomatic systems”, [”Lazernoe iniciirovanie svetochuvstvitelnyh energeticheskikh materialov, perspektivnyh dlya system piroavtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov ”], *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, No. 1 (35), pp. 43–52. (In Russian)].

21. Sobolev V. (2010), ”The evolution of molecules chemical bonds stability in the field of surface charges”, *Scientific Reports on Resource Issues, Volume 1. – Freiberg (Germany): TU Bergakademie Freiberg*, pp.186–193.

22. Chernay A.V. (1996), ”On the mechanism of ignition of condensed secondary explosives by a laser pulse”, [”O mehanizme zazhihaniya kondensirovanyh vtorichnykh VV lazernym impulsom”], *Fizika Goreniya I Vzryva*, T.32, No 1. pp. 62–69 (In Russian).

Надійшла до редакції 28.10.2017

Рецензент д-р. техн. наук, проф. О.В. Фролов.

**Кириченко Алексей Леонидович**, кандидат технических наук, главный технолог, Государственное предприятие «Научно-производственное объединение «Павлоградский химический завод» (г. Павлоград Днепропетровской обл., 51400, ул. Заводская, 44).

E-mail: [alekseyphz@gmail.com](mailto:alekseyphz@gmail.com)

**Куливар Вячеслав Вячеславович**, аспирант кафедры строительства, геотехники и геомеханики, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (г. Днепр 49005, пр. Д. Яворницкого, 19).

E-mail: [kulivarslavik@gmail.com](mailto:kulivarslavik@gmail.com)

**Соболев Валерий Викторович**, доктор технических наук, профессор кафедры строительства, геотехники и геомеханики, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (г. Днепр 49005, пр. Д. Яворницкого, 19).

E-mail: [velo1947@ukr.net](mailto:velo1947@ukr.net)

## ВИБУХОВІ КОМПОЗИТИ, ВИСОКОЧУТЛИВІ ДО ІМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Анотація.** Приведені основні результати експериментальних досліджень деяких фізичних характеристик світлочутливих енергонасичених композитів для засобів ініціювання лазерних систем. Розглядається, зокрема, енергонасичений композит, що складається з порошку азиду свинцю, розподіленого в полімерній матриці. Досліджуваний вибуховий композит характеризується аномально високою чутливістю до дії лазерного імпульсного випромінювання, при цьому чутливість до механічних дій знаходиться на рівні чутливості вторинних вибухових речовин.

**Ключові слова:** вибух, імпульс, лазер, випромінювання, композит, ініціація, чутливість, детонація.

**Кириченко Олексій Леонідович**, кандидат технічних наук, головний технолог, Державне підприєм-

ємство «Науково-виробничеоб'єднання«Павлоградський хімічний завод» (м. Павлоград Дніпропетровської обл., 51400, вул. Заводська, 44).

E-mail: [alekseyphz@gmail.com](mailto:alekseyphz@gmail.com)

**Кулівар Вячеслав Вячеславович**, аспірант кафедрибудівництва, геотехнікиігеомеханіки, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (м. Дніпро 49005, пр. Д. Яворницького, 19).

E-mail: [kulivarslavik@gmail.com](mailto:kulivarslavik@gmail.com)

**Соболев Валерій Вікторович**, доктор технічних наук, професоркафедрибудівництва, геотехнікиігеомеханіки, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (м. Дніпро 49005, пр. Д. Яворницького, 19).

E-mail: [velo1947@ukr.net](mailto:velo1947@ukr.net)

#### EXPLOSIVE COMPOSITES, HIGH-SENSITIVE TO PULSED LASER RADIATION

**Abstract.** Basic results over of experimental researches of some physical descriptions of photosensitive, energy saturated composites are given for facilities of initiation of the laser systems. The energy saturated composite, consisting from powder of lead azide, distributed in a polymeric matrix, is considered, in particular. The explored composite is characterized by abnormally high sensitivity to the action of laser impulsive radiation; under this sensitivity to mechanic impacts is at the level of sensitivity of secondary initiating explosives.

**Key words:** explosion, impulse, laser, radiation, composite, initiation, sensitivity, detonation.

**Kirichenko Aleksei Leonidovich**, candidate of technical sciences, main technologist, State company «The Scientific and production association «The Pavlograd chemical plant»( Pavlograd town of the Dnepropetrovsk region, 51400, street Zavodskaya, 44).

E-mail: [alekseyphz@gmail.com](mailto:alekseyphz@gmail.com)

**Kulivar Viacheslav Viacheslavovich**, graduate student of department of building, geotechnics and geomechanics, State higher education institution «National mining university» ( Dnepr 49005, avenue D. Yavornitskogo, 19 ).

E-mail: [kulivarslavik@gmail.com](mailto:kulivarslavik@gmail.com)

**Sobolev Valery Victorovich**, doctor of technical sciences, professor of department of building, geotechnics and geomechanics, State higher education institution «National mining university» ( Dnepr 49005, avenue D. Yavornitskogo, 19 ).

E-mail: [velo1947@ukr.net](mailto:velo1947@ukr.net)