

**ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ  
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ**©2009 В. И. Мордасов<sup>1</sup>, Н. А. Сазонникова<sup>1</sup>, Е. Г. Иванова<sup>1</sup>, Н. И. Лаптев<sup>2</sup>, В. В. Пойлов<sup>2</sup><sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет<sup>2</sup>Самарский государственный технический университет

При использовании относительно высоких плотностей мощности возможен быстрый нагрев малых доз вещества до критической температуры. Использование лазеров для инициирования воспламенения является перспективным, так как позволяет в больших диапазонах достаточно точно измерять, какое количество энергии затрачено для воспламенения и скорость, при которой данная энергия освобождается. Исследователь имеет возможность контролировать, какое количество вещества нагрето лазерным излучением. Важным преимуществом такой системы является возможность проконтролировать и измерить время срабатывания пиропатрона.

*Оптическое волокно, полупроводниковый лазер, инициирование детонации*

Оптоволоконные системы с полупроводниковыми лазерами в качестве источников излучения являются перспективными средствами однократного применения в системах двигателей летательных аппаратов. Основными компонентами таких систем являются полупроводниковые лазеры, оптические волокна или кабели, устройства согласования источника излучения с волокном, оптические соединители, распределители и др. [1,2] Применение элементов волоконной оптики в системах инициирования взрывной и пиротехнической автоматики исключает влияние помех. Данные системы позволяют формировать линии задержки в зависимости от длины волокна [1-4], осуществлять временное мультиплексирование сигналов и выделять полосы пропускания при использовании различных оптических элементов и создавать многоканальные системы инициирования. Для построения систем инициирования горения и детонации использовался полупроводниковый лазер с мощностью излучения 5Вт со встроенным отрезком оптического волокна. Из-за ограниченности информации в сопроводительной документации на полупроводниковые лазеры требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований для определения рабочих характеристик. Неотъемлемой частью исследований по созданию систем инициирования является построение диагностических систем для исследования процессов взрыва. Оптические измерительные системы позволяют осуществ-

лять бесконтактную диагностику быстропротекающих процессов с разрешением по времени. В настоящее время известны экспериментальные работы, направленные на изучение предвзрывных явлений при ударно-волновом и лазерном инициировании бризантных взрывчатых веществ [1,8]. Изучена начальная стадия разрушения ВВ при прямом лазерном инициировании. Для создания подобных систем требуется проведение дополнительных работ по исследованию зависимостей характеристик процессов взрыва от режимов генерации лазерных излучателей, выбору типа излучателя и обеспечению безопасных условий транспортировки лазерного излучения к поверхности ВВ.

Оптическое волокно состоит из сердцевины диаметром 3...125 мкм, отражающей оболочки и защитного полимерного покрытия. Попадая в волокно, излучение многократно отражается от границы раздела сердцевины и оболочки, благодаря чему распространяется по волокну. Предельная мощность вводимого излучения ограничена тепловой стойкостью волокна, которая в несколько раз ниже, чем для оптических стекол, что связано с концентраторами напряжений, возникающими при изготовлении волокна.

Применение волоконной оптики исключает попадание другого направленного излучения, сравнимого по мощности с командным. Малая апертура применяемых оптических волокон не позволяет проходить случайным световым сигналам. Важным

преимуществом такой системы является возможность проконтролировать и измерить время срабатывания пиропатрона. Величина внешней помехи радиочастотного диапазона ограничена температурой оптических волокон при диэлектрическом нагреве. Необходимо отметить технологичность подобного устройства, так как не требуется строгого выравнивания торцов оптических волокон и плоскости заряда. Между окном и концом жгута оптических волокон не существует плотного контакта. Концы волокон обрабатываются сколом.

Для построения подобных систем необходимо экспериментально определить характеристики источника излучения и компонентов оптоволоконной системы для обеспечения высокой эффективности ввода излучения источника в волокно, низких потерь на согласование компонентов оптоволоконной системы и затухание излучения при транспортировке.

Для транспортировки излучения целесообразно использовать оптоволоконный кабель на основе многомодового волокна, так как указанный источник излучения имеет достаточно большие размеры активной области и достаточно высокую мощность излучения, которую сложно передать через единичное волокно. Преимуществом применения оптоволоконных кабелей являются их малые размеры и масса по сравнению с электрическими кабелями, механическая прочность и защита от влияния окружающей среды, что существенно снижает потери при транспортировке излучения.

Чтобы обеспечить минимальное ослабление сигнала в соединении, нужно выдерживать очень жесткие допуски на положение соединяемых волокон [2,6].

Очевидно, в частности, что переход света из одного волокна другое, имеющее меньшую сердцевину или меньшую числовую апертуру, происходит с потерями, связанными с уменьшением геометрических площадей (рис. 1). В первом приближении потери пропорциональны отношению площадей сердцевин или отношению квадрата числовых апертур [3]. Большая часть соединений осуществляется путем совмещения наружных поверхностей

волокна (оптической оболочки или первичного покрытия), а не сердцевин, которая в большинстве случаев оказывается недоступной. Из этого вытекает, что в случае недостаточной концентричности сердцевин относительно наружной поверхности невозможно избежать несоосности сердцевин, а, следовательно, и потерь.

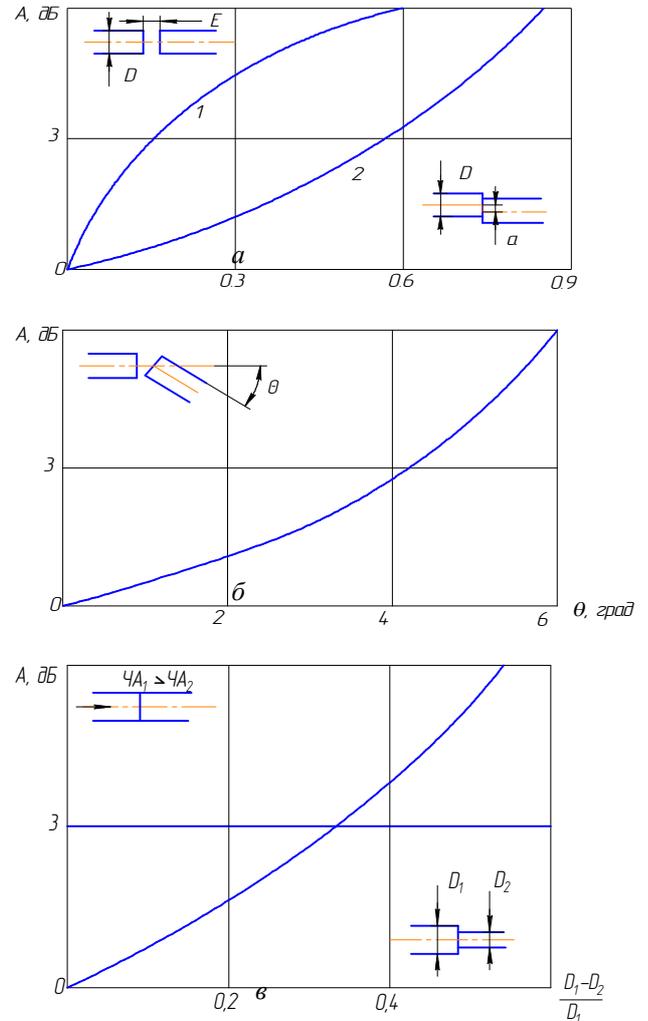


Рис.1. Экспериментальные зависимости величины ослабления сигнала при согласовании волокон от зазора (а, зависимость 1), осевого рассогласования (а, зависимость 2), углового смещения (б) и разности числовых апертур (в)

Выявлено, что эффективность ввода излучения определяется следующими факторами: тип лазера: модовый состав излучения, диаметр пятна, расходимость излучения, диаграмма направленности, астигматизм; состояние поверхности волокна: вид обработки (шероховатость), наличие загрязнений, форма среза; числовая апертура волокна, диаметр сердцевин (эффективность ввода падает с понижением

диаметра), эксцентриситет сердцевины; согласование числовых апертур и волновых фронтов источника излучения и волокна, точность совмещения осей источника излучения и волокна; вид устройства согласования: дискретные линзы и микролинзы, микролинзы цилиндрические и конические, выполненные на торце волокна, цилиндрические и градиентные линзы, устройства точной механики для совмещения осей источника излучения и волокна [7]. В настоящее время возможно осуществить ввод излучения в волокно с потерями на уровне 1дБ, температурная погрешность составляет 0,1дБ.

Оптоволоконный детонатор (рис. 2) включает в свой состав узел фокусирующей оптики и узел запала. Фокусирующая система коллимирует световой пучок, выходящий из сердцевины волокна, диаметром 100 мкм, и затем фокусирует в пятно требуемого размера на поверхности вещества. Запал соединен с узлом фокусирующей оптики, воспламеняемое вещество напрессовано в центре сапфирового окна, которое соединено с узлом фокусирующей оптики.

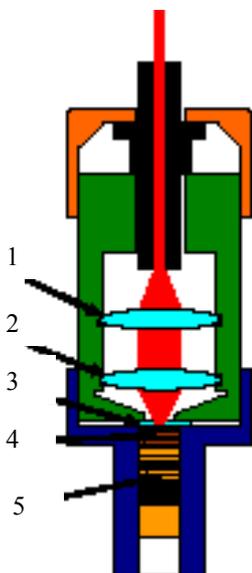


Рис.2. Схема лазерного детонатора:

1 – коллимирующая линза; 2 – фокусирующая линза;  
3 – сапфировое окно; 4 – первичное иницирующее  
вещество; 5 – детонирующий компонент

При использовании полупроводниковых лазеров в оптоволоконных системах наиболее важными являются следующие излучательные характеристики: ватт-

амперная характеристика, вольт-амперная характеристика, конфигурация диаграммы направленности и положение оси диаграммы направленности, а также временная стабильность указанных характеристик.

Оптическое волокно обладает свойством задерживать сигнал на время, пропорциональное своей длине [4]. В волокне со средним показателем преломления 1,5 время распространения оптического сигнала составляет 5 нс/м. Преимуществом данного способа формирования линии задержки является простота регулирования. Достаточно обрезать волокно на расстоянии, соответствующем требуемой задержке, при этом обеспечивается точность не ниже 1 нс. Возможно также применение акустических линий задержки, в этом случае потери пропорциональны корню квадратному из частоты, что приводит к искажению амплитуды и фаз задержки сигналов. Для оптических линий задержки искажения отсутствуют, если ширина спектра сигнала меньше полосы пропускания волокна.

Проведены экспериментальные исследования лазерного диода IDL 1000 M 808C, серийно выпускаемого НПО «Полюс» (г. Москва) с целью определения основных режимов эксплуатации и излучательных характеристик. Указанный лазерный диод имеет квантоворазмерную структуру на основе тройной системы AlGaAs, что позволяет обеспечить высокую стабильность диаграммы направленности. Установлено, что отличительными особенностями лазерного диода IDL 1000 M 808C являются узкие диапазоны рабочих значений тока и напряжения на р-п переходе, что связано с высоким значением дифференциальной эффективности (угла наклона ватт-амперной характеристики). Это обеспечивает высокую стабильность заданной величины выходной мощности лазерного излучения. Недостатками данного лазерного диода являются отсутствие возможности регулирования мощности, степени когерентности и модового состава излучения, которые определяют уровень потерь при распространении излучения в оптическом волокне и ограничивают область применения лазерного диода [5].

Приведен расчет параметров использования волоконной оптики, исключающей попадание другого направленного излучения, сравнимого по мощности с командным. Малая апертура применяемых оптических волокон не позволяет проходить случайным световым сигналам. Важным преимуществом такой системы является возможность проконтролировать и измерить время срабатывания взрывной и пиротехнической автоматики. Величина внешней помехи радиочастотного диапазона ограничена температурой оптических волокон при внутреннем нагреве. Необходимо отметить технологичность систем инициирования горения и детонации ВВ, так как не требуется строгого выравнивания торцев оптических волокон и плоскости заряда пиропатрона.

В расчетах параметров инициирования горения и детонации ВВ учитывается, что эффективность ввода излучения в волокно определяется следующими факторами: тип лазера (модовый состав излучения, диаметр пятна, расходимость излучения, диаграмма направленности, астигматизм), состояние поверхности волокна, числовая апертура волокна, диаметр сердцевин, согласование числовых апертур и волновых фронтов источника излучения и волокна, точность совмещения осей источника лазерного излучения и волокна, вид устройства согласования.

Рассмотрена задача о нагреве полуограниченного тела постоянным потоком мощного лазерного излучения. Здесь полуограниченное тело, имеющее равномерную начальную температуру  $T_0$ , нагревается с ограничивающей поверхности постоянным потоком лазерного излучения  $q_c$ . Профиль температуры тела в любой момент времени определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 < x < \infty, \\ T(x,0) &= T_0 = const, \\ q(x,t) &= -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}. \end{aligned} \quad (1)$$

Вопрос об очаговом воспламенении возникает в связи с проблемой чувствительности взрывчатых веществ к механическим воздействиям и лазерному

излучению. При механических воздействиях во взрывчатом веществе возникают очаги разогрева. В определенных условиях ВВ в местах этих очагов разогрева может воспламениться и вызвать воспламенение всей массы ВВ. В задаче об очаговом воспламенении пути и механизмы образования очагов разогрева не рассматриваются, а рассматривается готовый единичный очаг разогрева идеальной П-образной формы [9,10].

Температура очага воспламенения  $T_0$ , его размер  $2r$ , температура окружающей среды  $T_\infty$  определяются критическими условиями и периодом индукции лазерного воспламенения. Так как размеры очагов разогрева обычно намного меньше размера массы ВВ, то окружающая очаг холодная масса ВВ принимается бесконечной. Тепловое воспламенение при воздействии мощных лазерных потоков на ВВ применительно к задаче об очаговом воспламенении для реакции нулевого порядка в безразмерном виде описывается уравнением

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \exp \frac{\theta}{1 + \beta \theta} + \frac{1}{Fk} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{n}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right), \quad (2)$$

$$\theta(\xi, 0) = \begin{cases} 0 & \text{при } \xi \leq 1, \\ -\theta_0 & \text{при } \xi > 1. \end{cases}$$

Безразмерные переменные:

$$\theta = \frac{E}{RT_0^2} (T - T_0), \quad \xi = \frac{x}{r},$$

$$\tau = t \frac{Qk_0}{c} \frac{E}{RT_0^2} \exp \left( -\frac{E}{RT_0} \right). \quad (3)$$

Безразмерные параметры:

$$Fk = \frac{Q\rho k_0}{\lambda} \frac{E}{RT_0^2} \exp \left( -\frac{E}{RT_0} \right),$$

$$\theta_0 = \frac{E}{RT_0^2} (T_0 - T_\infty), \quad \beta = \frac{RT_0}{E}. \quad (4)$$

Здесь введены обозначения:  $Q$  – удельная энергия взрыва,  $k_0$  – показатель адиабаты,  $Fk$  – параметр Франк-Каменецкого.

Наиболее корректное решение задачи об очаговом воспламенении получено путем численного счета на ЭВМ. Развитие воспламенения удобнее всего наблюдать по изменению во времени температуры в

центре очага. При небольших значениях  $Fk$  происходит быстрое остывание очага без разогрева. При большем значении  $Fk$  температура в очаге сначала растет, затем уменьшается. При очень больших значениях  $Fk$  температура растет взрывным образом. Условие воспламенения при лазерном инициировании выполняется для значений  $Fk$ , превышающих некоторое критическое значение  $Fk$ .

С другой стороны параметр  $\theta_0$  характеризует температурный напор очага разогрева. Его величина выбирается в интервале  $4 < \theta_0 < 25$ . Температуру очага  $\theta_0 < 4$  нельзя рассматривать из условия, что реакция в окружающей массе вещества становится соизмеримой с реакцией в очаге. Зависимость  $\theta_0(T_0)$  имеет максимум, который для типичных значений  $E$  не может быть больше 25 для возможных значений температуры  $T_0$  [7,8].

Численное решение очаговой задачи в процессе взаимодействия потоков мощного лазерного излучения с ВВ с уравнением химической кинетики показало, что при малых значениях параметра  $\gamma = \frac{c}{Q} \frac{RT_0^2}{E}$  выгорание практически не влияет на характеристики процесса. Химическая реакция в окружающей массе также не оказывает никакого влияния на закономерности очагового воспламенения. Если вместо очага разогрева рассматривать ВВ с начальной температурой  $T_0$  в термостатированном сосуде, где поверхность поддерживается при постоянной температуре  $T_\infty$ , то и в данном случае характеристики воспламенения практически не отличаются от рассмотренных выше.

Отметим, что вышеизложенные результаты относятся к задаче о воспламенении вещества лазерным излучением только в очаге разогрева. Распространение воспламенения из очага разогрева в окружающую холодную массу ВВ здесь не рассматривается. Но знание закономерностей такого распространения имеет важное значение. Очаг может воспламениться, выгореть, но не воспламенить окружающую массу. Приближенное условие распространения горения за пределы

воспламенившегося очага разогрева имеет вид [10]

$$r \geq (n+1) \frac{a}{u} \frac{Q}{c(T_0 - T_\infty)}, \quad (5)$$

где  $u$  — линейная скорость горения.

При построении лазерных систем инициирования с использованием оптоволоконной потери энергии лазерного излучения к веществу определяются следующими факторами: тип излучателя, модовый состав излучения, диаметр пятна, расходимость излучения, диаграмма направленности, астигматизм; состояние поверхности волокна, числовая апертура волокна, диаметр сердцевины); согласование числовых апертур и волновых фронтов источника излучения и волокна; вид устройства согласования. Эффективность ввода падает с понижением диаметра волокна. При построении лазерных детонаторов целесообразно использование полупроводниковых лазеров с мощностью излучения не менее 1 Вт при непрерывном режиме работы со встроенным отрезком оптоволоконной. Для транспортировки лазерного излучения следует использовать оптические шнуры, изготовленные на основе оптоволоконной с диаметром сердцевины не менее 50 мкм. В этом случае достигаются потери мощности в системе на уровне 1 дБ.

### Библиографический список

1. Ципилев, В.П. Стенд для исследования кинетики взрывного разложения конденсированных сред при воздействии импульсов лазерного излучения [Текст] / В.П. Ципилев // Изв. Томс. политехн. ун-та. - 2003. - Т. 306.- №4. - С. 99-103.
2. Мартынов, В.Н. Полупроводниковая оптоэлектроника. [Текст] / В.Н. Мартынов, Г.И. Кольцов - М.: МИСИС, 1999. – 399 с.
3. Грузевич, Ю.К. Волоконная и интегральная оптика [Текст] учеб. пособие / Ю.К. Грузевич, В.А. Солдатенков. - М.: МГТУ, 1999.- Ч.2. – 61 с.
4. Таржанов, В.И. Предвзрывные явления при быстром инициировании бризантных взрывчатых веществ [Текст] // Физика горения и взрыва. - 2003.- Т.39.-№6.- С.3-11.
5. Бутусов, М.М. Волоконная оптика и приборостроение[Текст] / М.М. Бутусов [и др.]; под общ. ред. М.М. Бутусова. - Л.:

Машиностроение, Ленинградское отд., 1987. – 328 с.

6. Окося, Т. Волоконно-оптические датчики [Текст] / Т. Окося, К. Окамото, М.Оцу, [и др.]; под ред. Т. Окося. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1990. – 256 с.

7. Калашников, В.В. Иницирование излучением полупроводникового лазера горения и детонации высокоэнергетических веществ [Текст] / В.В. Калашников, Н.И. Лаптев, В.И. Мордасов [и др.]. - Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, - 2006. – 112 с.

8. Таржанов, В.И. Быстрое иницирование высокоэнергетических веществ. Особые режимы детонирования [Текст] / В.И. Таржанов. Ядерный центр РФ/ВНИИТФ. - Снежинск, 1988. – 166 с.

9. Андреев, К.К. Теория взрывчатых веществ [Текст] / К.К. Андреев, А.Ф. Беляев [и др.]; под ред. К.К. Андреева. - М.: Оборонгиз, 1963. – 578 с.

#### References

1. Tsipilev, V.P. The installation for investigation of condensing medium explosive destruction at the laser radiation pulses action [Text]/V.P. Tsipilev//Tomsk: Issue of Tomsk polytechnical university. – 2003. – V. 306. – №4. – P. 99-103.

2. Martynov, V.N. Semiconductor optoelectronics. [Text]/V.N., Martynov, G.I. Koltsov: //Moscow: MISIS, 1999. – 399 p.

3. Gruzevich, U.K. Fiber and integrated optics [Text]/ U.K. Gruzevich, U.K.

Soldatenkov: Educational book//Moscow: Moscow State technical University, 1999. – Chapter.2 – 61 p.

4. Tarzhanov, V.I. Preliminary explosive phenomenon at high speed initiation of explosive materials [Text]/ V.I. Tarzhanov//Physics of combustion and explosion. –2003. – V.39. –№6. – p.3-11.

5. Butusov, M.M. Fiber optics and instruments construction [Text] /M.M. Butusov, S.L.Galkin, S.P.Orobinsky [and others]. Under M.M. Butusov redaction. Leningrad: Mashinostroenye, Leningr.dep., 1987. – 328 p.

6. Okosy, T. Fiber-optics detectors [Text]/T. Okosy, K. Okamoto, M.Otsuy, H. Nisihara [and others]; under T. Okosy redaction. Leningrad: Energoatomizdat, Leningrad dep.. 1990 – 256 p.

7. Kalashnikov, V.V. High energy materials combustion and detonation priming by semiconductor laser radiation [Text]/ Kalashnikov V.V., Laptev N.I., Mordasov [and others]. Samara: Samara state technical university. – 2006. – 112 p.

8. Tarzhanov, V.I.. High speed priming of high energy materials. Special conditions of detonating [Text]/Tarzhanov V.I. // Snezhinsk :Nuclear center, Russia /VNIITF.– 1988. – 166 p.

9. Andreev, K.K. Theory of explosive materials [Text]/K.K. Andreev, A.F. Belyaev A.F., A.I.Golbinder [and others]; under K.K. Andreev redaction. Moscow: “Oborongiz”.– 1963. – 578 p.

## THE LASER PRIMING OF HIGH ENERGY MATERIALS IGNITION

© 2009 V. I. Mordasov<sup>1</sup>, N. A. Sazonnikova<sup>1</sup>, E. G. Ivanova<sup>1</sup>, N. I. Laptev<sup>2</sup>, V. V. Poylov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>Samara State Technical University

By using relatively high laser power densities, it is possible to quickly heat this small portion of the explosive to the critical temperature. The application of lasers to initiate explosives is advantageous because it allows the researcher to closely control and measure how much energy is delivered to the explosive and the rate at which that energy is delivered. The researcher has some degree of control over how much of the explosive material is heated by the laser. This is accomplished primarily by varying the spot size produced by the laser, as control over the penetration depth of the laser light into the explosive is much more limited and difficult to measure.

*Optical fiber, semiconductor laser, detonation priming*

### Информация об авторах

**Мордасов Василий Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры Автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 267-46-65. Область научных интересов: лазерные информационно-измерительные системы, исследование взаимодействия высокоэнергетических потоков излучения с твердыми веществами.

**Сазонникова Надежда Александровна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры Автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел.: (846) 267-46-65. E-mail: [nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru). Область научных интересов: лазерные информационно-измерительные системы диагностики состояния поверхности конструкционных материалов.

**Иванова Елена Георгиевна**, аспирант кафедры Автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел.: (846) 267-46-65. Область научных интересов: исследование процессов горения и детонации высокоэнергетических веществ.

**Лаптев Николай Илларионович**, доктор технических наук, профессор, директор научно-исследовательского института Проблем конверсии и высоких технологий Самарского государственного технического университета. Тел. (846) 337-06 28. Область научных интересов: исследование процессов горения и детонации высокоэнергетических веществ.

**Пойлов Вениамин Валентинович**, доцент, заведующий отделом научно-исследовательского института Проблем конверсии и высоких технологий Самарского государственного технического университета. Тел. (846) 337-03-53. Область научных интересов: исследование процессов горения и детонации высокоэнергетических веществ.

**Mordasov Vasily Ivanovich**, the doctor of technical sciences, professor of Automatic systems of energy devices department of Samara state aerospace university. Phone: (846) 267-46-65. Area of research: laser measurement systems and laser and high energy materials interaction.

**Sazonnikova Nadezhda Aleksandrovna**, candidate of technical sciences, the older science worker of Automatic systems of energy devices department of Samara state aerospace university. Phone: (846) 267-46-65. E-mail: [nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru). Area of research: laser measurement systems.

**Ivanova Elena Georgievna**, the postgraduate of Automatic systems of energy devices department of Samara state aerospace university. Phone: (846) 267-46-65. Area of research: laser measurement systems.

**Laptev Nikolay Illarionovich**, the doctor of technical sciences, professor, the head of Conversion and high technologies institute of Samara state technical university. Phone: (846) 337-06 28. Area of research: investigation of combustion and detonation processes in high energy materials.

**Poylov Veniamin Valentinovich**, candidate of technical sciences, the head of department of Conversion and high technologies institute of Samara state technical university. Phone: (846) 337-03-53. Area of research: investigation of combustion and detonation processes in high energy materials.