

---

УДК 621.45.048, 629.7.036.5

## **Лазерное воспламенение топлив в запальном устройстве с использованием микрочип-лазера**

С.Г.Ребров, А.Н.Голиков, В.А.Голубев, А.В.Шестаков, В.А.Романюк

### **Аннотация**

Проведены экспериментальные исследования по лазерному воспламенению топливных пар кислород-метан, кислород-этанол, кислород-керосин в лазерном запальном устройстве с использованием микрочип-лазера. Воспламенение осуществлялось путем инициации оптического пробоя лазерным излучением, сфокусированным вблизи поверхности металлической мишени. Эксперименты проведены в широком диапазоне изменения соотношения компонентов с варьированием циклограмм пуска, опережения подачи компонентов, момента включения лазера.

### **Ключевые слова:**

лазерное воспламенение, микрочип-лазер, запальное устройство, оптический пробой, ракетный двигатель

### **Введение**

Использование лазерного воспламенения в качестве перспективного способа запуска ракетных двигателей (РД), работающих на несамовоспламеняющихся компонентах топлива, имеет ряд преимуществ перед традиционными способами, основные из которых приведены в работе [1]. В частности, современное развитие лазерной техники уже сейчас позволяет добиться снижения массогабаритных характеристик лазерных систем зажигания по сравнению с электроискровыми, что определяет интерес к лазерному зажиганию РД как в России [1-8], так и за рубежом [9-11]. Эти преимущества актуальны не только для РД, но и для двигателей внутреннего сгорания, что объясняется высокими темпами развития лазерных технологий, в частности миниатюризацией лазерных систем.

В ранее опубликованных работах авторов данной статьи [1-8] представлены результаты исследований по лазерному воспламенению ракетных топливных пар в

запальных устройствах, двигателях малой тяги, а также в модельной камере сгорания достаточно большого размера с использованием различных лазеров, включая малогабаритные твердотельные лазеры с ламповой накачкой.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по воспламенению топливных пар кислород-метан, кислород-этанол, кислород-керосин, полученные с использованием микрочип-лазера с диодной накачкой, разработанного и изготовленного НПЦ «ЭЛС-94».

Микрочип-лазеры представляют собой твердотельные лазерные системы миллиметрового размера, использующие в качестве источника накачки эффективные и компактные диодные лазеры. Несмотря на малые размеры микрочип-лазеров, их выходное излучение может достигать высоких интенсивностей, что делает их привлекательными для использования в различных областях науки и техники. Микрочип-лазеры с пассивной модуляцией добротности - активно развивающееся семейство монолитных твердотельных лазеров [12], в которых малые размеры резонатора обеспечивают получение нано - и пикосекундных импульсов с высокой (1 МВт и выше) пиковой мощностью. Современный микрочип-лазер состоит из активной среды YAG:Nd или YAG:Yb и фототропной среды YAG:Cr<sup>+4</sup> или YAG:V<sup>+3</sup>, соединенных между собой методом диффузионного сращивания. В настоящее время для микрочип-лазеров широко внедряются и другие кристаллы, а также прозрачная кристаллическая керамика, созданная на базе материалов, активированных ионами редких земель и переходных элементов [12].

Наиболее широкое использование микрочип-лазеров, как элементов систем зажигания, достигнуто в исследовательских лабораториях, занимающихся двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Так, в [13] сообщается об использовании для воспламенения воздушно-метановой смеси YAG:Nd/YAG:Cr микрочип-лазера, работающего в пачечном режиме, состоящем из 4-х импульсов, с частотой следования пачек 10 Гц и энергией в моноимпульсе 2,7 мДж. Качество луча ( $M^2=1,2$ ) позволяло, используя линзы с фокусным расстоянием 10 мм, обеспечивать оптический пробой смеси в объеме и её воспламенение. В [14] представлены результаты разработки керамического YAG:Nd/YAG:Cr микрочип-лазера, который генерирует одновременно три точки оптического пробоя, разнесенных друг от друга на некоторое расстояние.

Для устройств, не требующих для воспламенения значительного энергозатрата, как это происходит в случае ДВС, оптический пробой можно инициировать вблизи поверхности мишени. Так, в работах [2,4] представлены экспериментальные результаты по воспламенению различных топливных пар в запальных устройствах и РДМТ с

использованием волоконного лазера, обеспечивающего плотность потока излучения  $W_s$  после прохождения линзовой системы до  $50 \text{ МВт/см}^2$  вблизи поверхности стальной мишени. В соответствии с данными [15], это значение примерно в два раза превышает пороговое значение для лазерного пробоя атмосферного воздуха вблизи стальной мишени с образованием дозвукового потока плазмы. В настоящей работе также использовался механизм фокусировки излучения на поверхность, но с использованием микрочип-лазера, стыкуемого непосредственно к запальному устройству.

### Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились на стенде 5СТ-04 Центра Келдыша, предназначенном для испытания лазерных запальных устройств (ЛЗУ), камер сгорания и двигателей, оснащенных системами подачи как газообразных (кислород, метан), так и жидких компонентов топлива (керосин, этанол). Подробное описание стенда и его пневмогидравлической и измерительной систем приведено в [2]. Компьютерная система управления и измерения параметров позволяет варьировать временные параметры пусков, основные из которых:

- $\tau_s$  – общая длительность пуска;
- $\tau_O$  – время от начала пуска до открытия клапана окислителя;
- $\tau_F$  – время от начала пуска до открытия клапана горючего;
- $\Delta\tau_O$  – время опережения подачи окислителя:  $\Delta\tau_O = \tau_F - \tau_O$ ;
- $\Delta\tau_F$  – время опережения подачи горючего:  $\Delta\tau_F = \tau_O - \tau_F$ ;
- $\tau_l$  – время от начала пуска до включения лазера (первого лазерного импульса).

Все испытания проводились в атмосферных условиях. На рис. 1 приведена конструкция запального устройства [3]. Устройство состоит из двух корпусов 1, 2, имеющих фланцевое соединение. Корпус 1 служит для стыковки с микрочип-лазером, а также содержит фокусирующую и защитную оптику. В корпусе 2 находится канал выхода продуктов сгорания с выходной сменной втулкой 3, используемой для повышения давления в нем, а также узлы подачи топлива 4,5. Лазерное излучение 9 фокусируется на специальную металлическую мишень 6, закрепленную на втулке 7. Защитное стекло 8, установленное герметично в корпусе 1, защищает микрочип-лазер и фокусирующую линзу 10 от реакционной полости.

Путем варьирования одновременности подачи компонентов топлива в ЛЗУ, в начальный момент его работы обеспечивается переменность состава компонентов топлива в области фокусировки лазерной энергии. Так, например, кислород сразу после его подачи через канал 5 заполняет все каналы устройства, а после подачи второго компонента – метана

через канал 4, начинается вытеснение кислорода из магистрали метана. При этом в области фокусировки по истечении некоторого времени образуется смесь компонентов топлива с соотношением, оптимальным для воспламенения лазерным излучением, после чего происходит воспламенение смеси в канале с образованием стационарного факела.

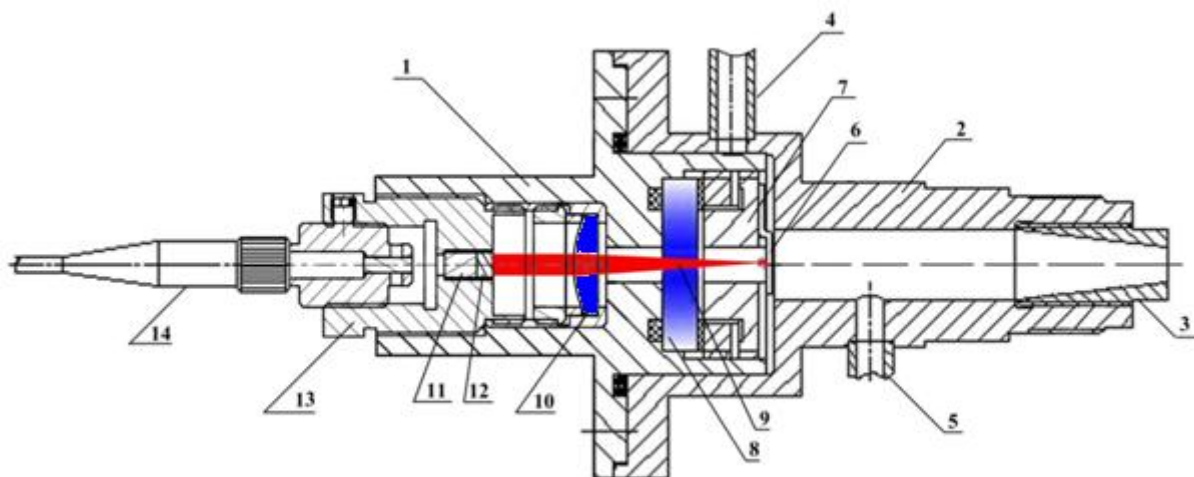


Рис. 1. Схема запального устройства с микрочип-лазером. 1 – корпус; 2 – корпус с каналом; 3 – молибденовая втулка; 4 – канал подачи компонента 1; 5 – канал подачи компонента 2; 6 – мишень; 7 – втулка; 8 – стекло; 9 – лазерный луч; 10 – линза; 11 – активный элемент микрочип-лазера; 12 – затвор микрочип-лазера; 13 - штуцер; 14 – оптический разъем.

Использовавшийся в работе твердотельный лазер RL-1,0Q, разработанный и изготовленный в НПЦ «ЭЛС-94», представляет собой миниатюрный твердотельный излучатель - микрочип-лазер, основными элементами которого являются блок питания и накачки с диодной линейкой, оптическое волокно и излучатель. Оптическое волокно стыкуется к микрочип-лазеру (рис. 1) через стандартный оптический разъем 14.

Блок питания и накачки служит для питания и управления рабочими параметрами лазерной линейки, осуществляющей накачку активного элемента излучателя. Оптическое волокно осуществляет передачу оптического излучения накачки от диодной линейки к активному элементу излучателя лазера, микрочип-лазер преобразует излучение накачки в лазерное излучение с длиной волны 1064 нм.

Излучатель работает в режиме модуляции добротности резонатора. Он состоит из активной среды (YAG:Nd) и пассивного затвора (YAG:Cr) (поз. 11 и 12 на рис. 1), объединенных в монолитный кристаллический блок. Излучение накачки поступает в

активный элемент генератора через оптическое волокно и фокусируется специальной короткофокусной оптической системой. Блок питания, оптоволокну и излучатель размещены в виде отдельных элементов.

Ввиду малости размеров элементов микрочип-лазера (рис. 2), он смонтирован в штанцер с внешней резьбой M16x1, вворачиваемый непосредственно в корпус запального устройства (поз. 1 на рис. 1).



Рис. 2. Фотография микрочип-лазера, вмонтированного в штанцер.

Параметры работы лазера RL-1,0Q приведены в таблице 1.

Параметры лазера RL-1,0Q

Таблица 1

Параметр, ед. измерения	Значение
Энергия импульса	1 мДж
Длительность импульса	1 нс
Количество импульсов в единичном цуге	2
Частота следования импульсов в цуге, длительность единичного цуга	10 кГц, 100 мкс
Максимальная частота следования цугов, длительность интервала между цугами	100 Гц, 10 мс
Минимальная частота следования цугов	1 Гц
Вывод излучения осуществляется через оптическое волокно	Ø волокна 600 мкм
Модовый состав	многомодовое
Длина волны излучения	1,064 мкм
Вес блока накачки, питания и управления	1,5 кг
Вес лазерного излучателя	20 г

Вопрос о величине энергии, которую нужно выделить в топливной смеси для ее воспламенения достаточно широко исследовался безотносительно способа выделения этой энергии. Тем не менее, конкретные значения данной величины для определенной конструкции запального устройства и режима его работы могут быть определены только экспериментально, поскольку они зависят от большого числа факторов, часть из которых

неизвестна. К неизвестным факторам можно отнести, в частности, распределение тепловых потерь и распределение локальных коэффициентов избытка окислителя, скорости реагирующих компонентов, а также ряд других параметров. Теоретически для воспламенения топливной смеси оптимального состава в отсутствие тепловых потерь достаточно локального выделения энергии в ней на уровне долей мДж. Однако реальные эксперименты показывают, что практически в смеси требуется выделить значительно большую энергию.

Для оценки энергии импульса, необходимой для лазерного воспламенения компонентов топлива, широко используется тепловая теория вынужденного воспламенения, развитая в работах Зельдовича, Льюиса, Эльбе и ряда других авторов [16-19]. Данная теория апробирована в экспериментах с накаливаемыми телами, работах по искровому зажиганию, а также в экспериментах по лазерному воспламенению различных смесей [19]. Согласно данной теории, минимальная энергия  $E_{min}$  определяется исходя из баланса между энергией химической реакции и энергией, передающейся теплопроводностью к несгоревшим компонентам. Размер объема, достаточного для воспламенения, определяется из соотношения  $\delta \sim \sigma_L$ , где  $\sigma_L$  – толщина ламинарного фронта горения [17]. Это условие, определяющее размер минимального поджигающего объема, является достаточным, гарантирующим воспламенение. Исходя из равенства потоков энтальпий, можно записать:

$$\rho_0 U_L C_p (T_{ad} - T_0) A_f = A_f \frac{T_{ad} - T_0}{\delta} \bar{\lambda}, \quad (1)$$

где  $A_f$  - площадь поперечного сечения,  $U_L$  - скорость нормального горения,  $T_{ad}$  - адиабатная температура пламени,  $\bar{\lambda}$  - средняя теплопроводность.

Из (1) можно получить:

$$\delta = \frac{\bar{\lambda}}{\rho_0 C_p U_L} = \frac{\bar{\lambda} \alpha_0}{\lambda_0 U_L}, \quad (2)$$

где  $\alpha_0 \equiv \frac{\lambda_0}{\rho_0 C_p}$  - температуропроводность.

Приняв зависимость теплопроводности от температуры в виде  $\lambda \sim T^{0,75}$ , а также типичное соотношение для пламени  $T_{ad}/T_0 \sim 7$ , получим:

$$\delta \approx 4 \frac{\alpha_0}{U_L}, \quad (3)$$

Для энергии, содержащейся в данном воспламеняемом объеме, с учетом (3) можно записать [19]:

$$E_{min} = \frac{4\pi}{3} \delta^3 \bar{\rho} C_p (T_{ad} - T_0) \approx 34 \alpha_0^2 \frac{\lambda_0 (T_{ad} - T_0)}{U_L^3}, \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет выявить ряд закономерностей, характерных для рассматриваемого процесса. Так, наиболее реакционноспособные смеси – с высокой скоростью горения – должны иметь наиболее низкие значения  $E_{\min}$ . Так как температуропроводность  $\alpha \sim P^{-1}$ , где  $P$  – давление, для случая, когда  $U_L$  не зависит от давления,  $E_{\min} \sim P^{-2}$ . Эта тенденция подтверждается экспериментальными результатами [17], где, в частности, показано, что при увеличении давления в смеси метана с кислородом в области стехиометрии с 0,1 до 1 ата, значение  $E_{\min}$  уменьшается с 0,2 до 0,004 мДж. Близкая зависимость была получена в работе [19], в экспериментах с газообразными смесями  $O_2+H_2$ , где показано, что  $E_{\min} \sim P^{-2,3}$ .

Феноменологическая теория может давать как заниженные, так и завышенные значения  $E_{\min}$ . В связи с этим, для конкретных конструкций запальных устройств, значения  $E_{\min}$  необходимо определять экспериментально. В то же время, с использованием вышеприведенных зависимостей можно определять тенденции изменения  $E_{\min}$  при изменении определяющих параметров.

Для рассматриваемых пар имеются табличные данные по  $E_{\min}$ . Так, для пары  $O_2+CH_4$ , согласно [17],  $E_{\min}=0,004$  мДж. Для большинства видов горючего существуют данные по  $E_{\min}$  только в воздухе [20]. Так, для  $C_2H_5OH+воздух$   $E_{\min} = 0,246$  мДж, для керосин+воздух  $E_{\min} = 0,2$  мДж [20]. Для большинства топливных пар величины  $E_{\min}$  в кислороде на порядки меньше, чем в воздухе. Таким образом, энергия импульсов микрочип-лазера  $E_i = 1$  мДж, используемого в работе, достаточна для воспламенения всех трех используемых топливных пар.

Перед проведением экспериментов производилась визуальная проверка наличия оптического пробоя – искры вблизи фокусируемой поверхности – мишени (поз. 6 на рис. 1), что позволяло визуально оценить качество фокусировки излучения на мишень. На рис. 3 приведена фотография лазерной искры при отстыкованном корпусе запальника.

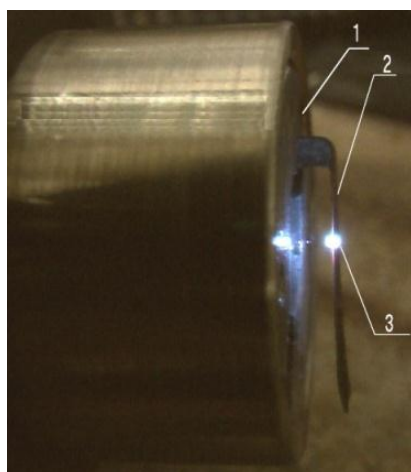


Рис. 3. Лазерная искра на поверхности мишени. 1 – втулка; 2 – мишень; 3 – лазерная искра.

### Результаты экспериментов и их анализ.

Рассмотрим последовательно результаты экспериментов, проводившихся с различными топливными парами. Основные задачи, которые решались в этих экспериментах:

- отработка конструкции ЛЗУ, выбор оптимальной зоны расположения мишени;
- отработка режимов подачи компонентов топлива в ЛЗУ, оптимизация времени опережения подачи одного из компонентов;
- экспериментальная отработка момента включения лазера относительно моментов начала поступления компонентов топлива в ЛЗУ.

При работе ЛЗУ на паре  $O_2+CH_4$  кислород подавался в канал 5 (рис. 1), а метан – в канал 4. В таблице 2 приведен диапазон изменения основных параметров в этих экспериментах.

Параметры экспериментов на топливной паре  $O_2+CH_4$

Таблица 2

№ п/п	Наименование параметра и обозначение	Размерность	Величина
1	Суммарный расход компонентов, $G_{\Sigma}$	г/с	5,76...7,55
2	Коэффициент избытка окислителя, $\alpha$	-	0,18...0,36
3	Диапазон рабочих частот лазера, обеспечивающих надежное воспламенение	Гц	25...100
4	Диапазон средних мощностей, обеспечивающих надежное воспламенение	Вт	0,05...0,2

Варьируемыми параметрами в экспериментах были:

- значение давления подачи  $CH_4$ , по которому включался лазер,  $P_L$ ;
- частота работы лазера.

Величина опережения подачи  $O_2$  не изменялась и составляла  $\Delta\tau_0 = 0,1$  с.

Во всем диапазоне параметров, указанных в табл. 2, было зафиксировано надежное воспламенение топлива. При значениях коэффициента избытка окислителя  $\alpha < 0,18$ , воспламенение не происходило. Хотя команду на включение лазера можно подать заранее – вместе с подачей  $O_2$ , было определено, что оптимальным является включение лазера уже после подачи метана, когда давление в канале подачи горючего возрастает до  $\sim 2$  ата.

В одной из серий экспериментов проверялось влияние частоты работы лазера на воспламенение. Было установлено, что надежное воспламенение компонентов  $O_2+CH_4$  имеет



место в диапазоне рабочих частот от 100 до 25 Гц. При меньшей частоте воспламенение не происходило. Таким образом, результаты экспериментов показали, что лазер RL-1,0Q обеспечивает надежное воспламенение компонентов  $O_2+CH_4$  даже при уменьшении средней мощности излучения до 0,05 Вт. Кроме этого, при работе с избытком горючего, не было обнаружено возможного отрицательного влияния сажеобразования на пропускание лазерного излучения защитным стеклом, работоспособность запального устройства сохранялась при многократных включениях. На рис. 4 в качестве примера приведена циклограмма одного из пусков с указанием моментов включения и выключения лазера.

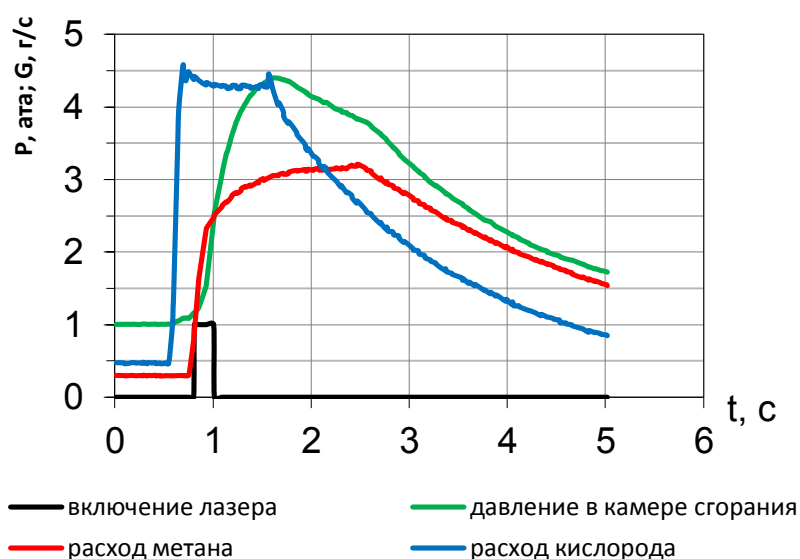


Рис. 4. Циклограмма пуска на компонентах  $O_2+CH_4$  при  $G_{\Sigma}=7,1$  г/с,  $\alpha=0,32$ ,  $\Delta\tau_0 = 0,1$  с,  $P_L=2$  ата.

При работе ЛЗУ на паре  $O_2+C_2H_5OH$  в канал 5 (рис. 1) через специальную струйно-центробежную форсунку с выходным диаметром 0,5 мм подавался спирт, а в штуцер 4 – кислород. Проливка форсунки при различных давлениях показала, что стабильный распыл начинается при давлении подачи более 5-6 ата, при этом полный угол распыла форсунки составляет  $\sim 45^\circ$ . В таблице 3 приведен диапазон изменения основных параметров в этих экспериментах.

Параметры экспериментов на топливной паре  $O_2+ C_2H_5OH$

Таблица 3

№ п/п	Наименование параметра и обозначение	Размерность	Величина
1	Суммарный расход компонентов, $G_{\Sigma}$	г/с	7...8,7
2	Коэффициент избытка окислителя, $\alpha$	-	0,38...0,65
3	Частота работы лазера, обеспечивающая надежное воспламенение	Гц	100
4	Средняя мощность излучения, обеспечивающая	Вт	0,2

надежное воспламенение		
------------------------	--	--

Варьируемыми параметрами в экспериментах были:

- время опережения подачи спирта относительно кислорода,  $\Delta\tau_F$ ;
- давление подачи спирта, по которому включался лазер,  $P_L$ ;
- частота работы лазера.

В ходе поиска оптимальных режимов надежного воспламенения было установлено, что при опережении подачи  $C_2H_5OH$  на величину  $\Delta\tau_F \geq 0,1$  с возможно забрызгивание защитного стекла (поз. 8 на рис. 1), что ведет к рассеиванию проходящего лазерного излучения и, соответственно, нарушает воспламенение смеси. Исходя из этого, подачу окислителя и горючего в дальнейшем осуществляли одновременно. Для уменьшения забрызгивания стекла и рассеивания луча в полость втулки 7 (рис. 1) была вставлена дополнительная стальная втулка с внутренним диаметром 3 мм, не перекрывающая апертуру прохождения лазерного излучения. Было также установлено, что без молибденовой втулки на срезе сопла воспламенение топлива не происходит. При наличии молибденовой втулки надежное воспламенение происходит в диапазоне давлений подачи кислорода  $P_{O_2} = 8 \dots 10$  ата. При  $P_{O_2} = 10$  ата имеет место 100%-е воспламенение, при снижении  $P_{O_2}$  до  $5 \dots 6$  ата смесь не воспламеняется. Также, в отличие от описанных выше результатов экспериментов на паре  $O_2 + CH_4$ , при уменьшении частоты работы лазера ниже 100 Гц воспламенение не происходило.

После определения области параметров, в которых имеет место надежное воспламенение пары  $O_2 + C_2H_5OH$ , была исследована возможность многоциклового работы ЛЗУ. На рис. 5 приведена циклограмма такого пуска, а на рис. 6 – фотография факела в момент выхода ЛЗУ на стационарный режим.

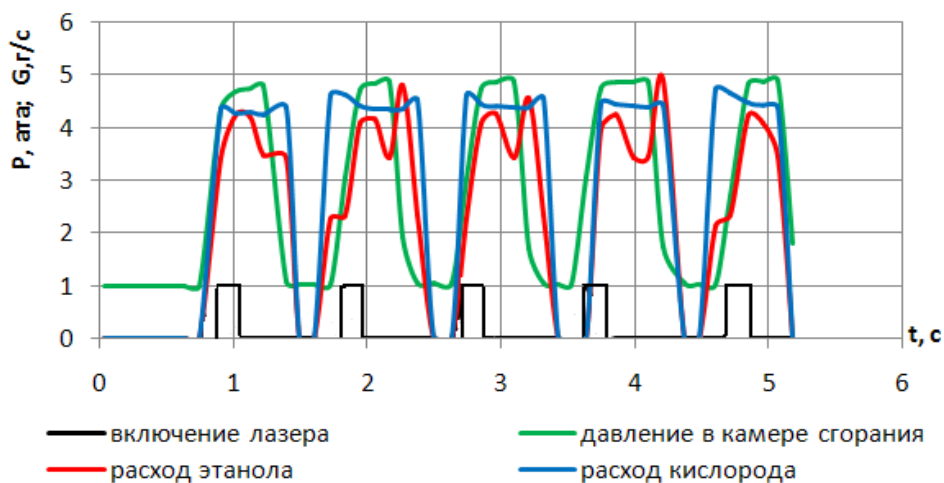


Рис. 5. Циклограмма многоимпульсного пуска на компонентах  $O_2+C_2H_5OH$  при  $G_{\Sigma}=7,8$  г/с,  $\alpha=0,64$ ,  $\Delta\tau_F = 0$ .



Рис. 6. Фотография факела при работе ЛЗУ на компонентах  $O_2+C_2H_5OH$  при  $G_{\Sigma}=7,8$  г/с,  $\alpha=0,64$ ,  $\Delta\tau_F = 0$ . 1- корпус запальника; 2 - оптический разъем подвода излучения накачки к микрочип-лазеру.

При работе ЛЗУ на паре  $O_2$ +керосин схема подачи компонентов была такой же, как и при работе на паре  $O_2+C_2H_5OH$ . Во всех экспериментах имело место опережение подачи керосина, либо он подавался одновременно с кислородом. В таблице 4 приведен диапазон изменения основных параметров в этих экспериментах.

Параметры экспериментов на топливной паре  $O_2$ + керосин

Таблица 4

№ п/п	Наименование параметра и обозначение	Размерность	Величина
1	Суммарный расход компонентов, $G_{\Sigma}$	г/с	9,1...14,3
2	Коэффициент избытка окислителя, $\alpha$	-	0,3...0,75
3	Частота работы лазера	Гц	100
4	Средняя мощность излучения	Вт	0,2

Варьируемыми параметрами в экспериментах были:

- время опережения подачи керосина относительно кислорода,  $\Delta\tau_F$ ;
- давление подачи керосина, по которому включался лазер,  $P_L$ ;

- частота работы лазера.

По результатам испытаний было установлено, что оптимальное время опережения подачи керосина составило  $\Delta\tau_F=0,1$  с, хотя в некоторых пусках успешное воспламенение имело место и при  $\Delta\tau_F = 0,05$  с.

На рис. 6 в качестве примера приведена циклограмма одного из пусков на паре  $O_2$ +керосин с указанием моментов включения и выключения лазера.

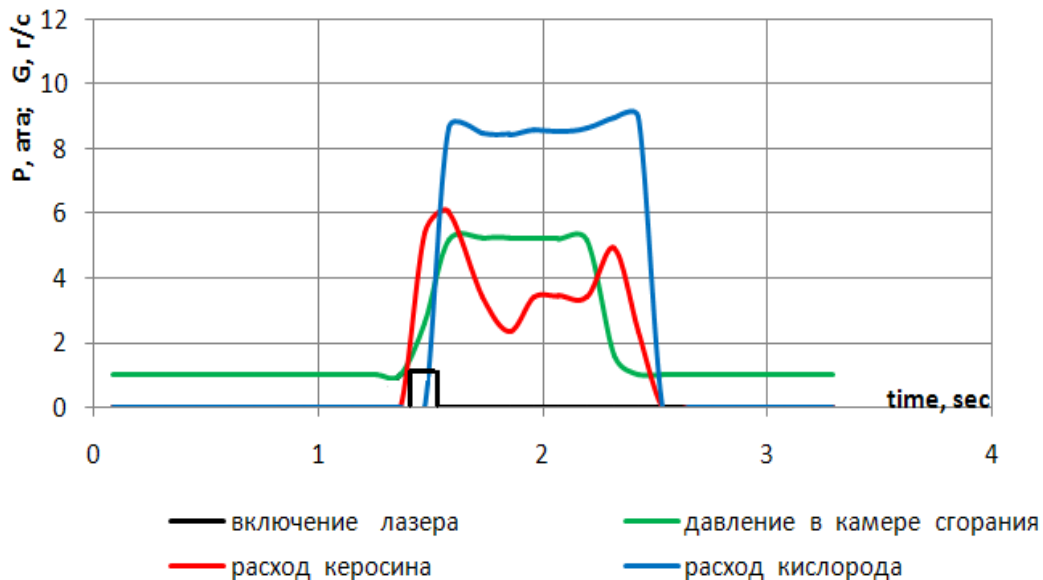


Рис. 6. Циклограмма пуска на компонентах  $O_2$ +керосин при  $G_2=12$  г/с,  $\alpha=0,74$ ,  $\Delta\tau_F = 0,1$  с.

Отметим также, что при многократных пусках на топливной паре  $O_2$ +керосин загрязнения или сажеобразования на защитном стекле не происходило и ЛЗУ включалось многократно без переборки.

## Заключение

1. Приведены результаты исследования лазерного воспламенения топливных пар:  $O_2+CH_4$ ,  $O_2+C_2H_5OH$ ,  $O_2$ +керосин в запальном устройстве с использованием малогабаритного микрочип-лазера. Исследования проведены в широком диапазоне изменения соотношения компонентов с варьированием циклограмм пуска, опережения подачи компонентов, моментов включения лазера. Лазерное воспламенение осуществлялось путем непосредственной фокусировки лазерной энергии в камеру смешения запального устройства на стальную мишень с инициацией оптического пробоя в зоне фокусировки.

2. Микрочип-лазер массой 20 г пристыковывался непосредственно к запальному устройству через резьбовое соединение. Накачка непосредственно микрочип-лазера

осуществлялась по оптическому волокну от диодной линейки с блоком питания и управления. Микрочип-лазер работает на длине волны 1064 нм в цуговом режиме: 2 импульса в цуге, время между цугами - 100 мкс, энергия моноимпульса 1 мДж, длительность 1 нс, частота следования цугов от 1 до 100 Гц.

3. Для каждой из топливных пар была экспериментально подтверждена возможность надежного лазерного воспламенения с использованием указанного лазера. Методика проведения испытаний предусматривала многократное повторение режимов запуска запального устройства без его переборки. При этом осаждение продуктов сгорания на защитном стекле не препятствовало воспламенению топлив.

4. Проведенные исследования показывают, что технологию лазерного воспламенения с использованием малогабаритных микрочип-лазеров вполне реально использовать на натуральных ракетных двигателях и газогенераторах различного назначения.

### **Библиографический список**

1. Ребров С.Г., Голиков А.Н., Голубев В.А. Лазерное воспламенение ракетных топлив в модельной камере сгорания. «Труды МАИ», № 53, 2012.

2. Иванов А.В., Ребров С.Г., Голиков А.Н., Гутерман В.Ю. Лазерное зажигание ракетных топлив кислород-водород, кислород-метан. «Авиакосмическая техника и технология», №2, 2008, стр. 47-54.

3. Патент РФ на изобретение №2326263 с приоритетом от 14.05.2007. Способ воспламенения компонентов топлива в камере сгорания ракетного двигателя и устройство для его осуществления (варианты). Авторы: Иванов А. В., Ребров С.Г., Пономарев Н.Б., Голиков А.Н. и др.

4. Ребров С.Г., Голиков А.Н., Голубев В.А. Воспламенение топлив кислород-этанол и кислород-керосин в беспредкамерном РДМТ с использованием малогабаритных лазеров. «Авиакосмическая техника и технология», №2, 2009, стр.18-23.

6. Голиков А.Н., Голубев В.А., Ребров С.Г. Экспериментальные исследования лазерного зажигания несамовоспламеняющихся топлив в ракетном двигателе малой тяги. «Космонавтика и ракетостроение», №3(60), 2010, стр. 92-100.

7. Патент РФ на изобретение №2400644 с приоритетом от 09.06.2009. Ракетный двигатель малой тяги, работающий на несамовоспламеняющемся газообразном окислителе и жидком горючем, и способ его запуска. Авторы: Ребров С.Г., Голиков А.Н., Голубев В.А., Кочанов А.В., Клименко А.Г.

8. Заявка о выдаче патента РФ на изобретение, рег. №2011144421 с приоритетом от 03.11.2011. Камера жидкостного ракетного двигателя или газогенератора с лазерным устройством воспламенения компонентов топлива и способ её запуска. Авторы: Ребров С.Г., Голиков А.Н., Голубев В.А.

9. K. Hagesava, K. Kusaka, A. Kumakawa, M.Saio, M. Tadano. Laser Ignition of GOX/GH<sub>2</sub> and GOX/GH<sub>4</sub> Propellants. AIAA, 2003.

10. Trinh H., Early J. W., Thomas M. E. Dual-Laser-Pulse Ignition. Marshall Space Flight Center. NASA Tech Briefs, 2006.

11. Manfletti C., Oschwald M. and Sender J., Theoretical and Experimental Discourse on Laser Ignition in Liquid Rocket Engines. Institute of Space Propulsion, German Aerospace Center (DLR), Lampoldshausen, Germany. 2009.

12. Шестаков А.В. Активные элементы твердотельных лазеров. «Фотоника», №5, 2007.

13. M. Tsunekane, T. Inohara, A. Ando, N. Kido, K. Kanehara, T. Taira. High peak power, passively Qswitched microlaser for ignition of engines, «IEEE J. Quantum Electron», №46(2), 2010, p.277–284.

14. Nicolaie Pavel, Masaki Tsunekane, and Takunori Taira. Composite, all-ceramics, high-peak power Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition. «OPTICS EXPRESS 9378», Vol. 19, No. 10, May 2011.

15. Michael C. Fower and David C. Smith. Ignition and maintains of subsonic plasma waves in atmospheric pressure air by CW CO<sub>2</sub> laser radiation and their effect on laser beam propagation. «Journal of Applied Physics», Vol. 46, No.1, January 1975.

16. Раушенбах Б.В., Белый А.А. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1964.

17. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968.

18. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. Изд-во МГУ, 1957.

19. Lim, E. H., McIlroy, A., Ronney, P. D., Syage, J. A.. Detailed Characterization of Minimum Ignition Energies of Combustible Gases Using Laser Ignition Sources. Proceedings of the 8th International Symposium on Transport Phenomena in Combustion, Taylor and Francis, 1996.

20. Баратов А. Н., Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства из тушения. Справочное издание, т.2. М., Химия, 1990.

### **Сведения об авторах**

Ребров Сергей Григорьевич, начальник отдела ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», д.т.н., e-mail: [rebrov\\_sergey@mail.ru](mailto:rebrov_sergey@mail.ru)

Голиков Андрей Николаевич, начальник сектора ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», д.т.н., e-mail: [andgolikov@mail.ru](mailto:andgolikov@mail.ru)

Голубев Виктор Александрович, инженер II категории ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», e-mail: [golubev.va@mail.ru](mailto:golubev.va@mail.ru)

Шестаков Александр Валентинович, генеральный директор НПЦ «ЭЛС-94», к.т.н., тел.:+7-495-334-8640.

Романюк Вячеслав Алексеевич, ведущий инженер НПЦ «ЭЛС-94», тел.:+7-495-334-8640.