

УДК 621.45.048, 629.7.036.5

**Экспериментальные исследования лазерного зажигания топлив
кислород-водород, кислород-метан в запальном устройстве с
использованием полупроводникового лазера**

Ребров С.Г.*, Голубев В.А., Голиков А.Н.***, Моргунов А.Е.******

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Онежская ул., 8, Москва, 125438, Россия

**e-mail: rebrov_sergey@mail.ru*

***e-mail: golubev.va@mail.ru*

****e-mail: andgolikov@mail.ru*

*****e-mail: morgunov.alex@inbox.ru*

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований лазерного зажигания топлив кислород-водород, кислород-метан в запальном устройстве от полупроводникового лазера с волоконным выводом излучения. Использование лазера такого типа в качестве источника энергии воспламенения топливных смесей в ракетной технике позволит снизить требования по обеспечению режимов тепло- и виброзащиты для системы лазерного зажигания на борту космического аппарата. По результатам проведенных экспериментов получены диапазоны рабочих характеристик запального устройства и поджигающего лазера, обеспечивающие стабильное воспламенение топливных смесей кислород-водород и кислород-метан.

Ключевые слова: лазерное зажигание, лазерный диод, оптическое волокно, полупроводниковый лазер, запальное устройство, кислород-водород, кислород-метан.

Введение

Лазерное зажигание является перспективным способом воспламенения топлив в двигателях и энергетических установках различного назначения, в том числе и в ракетной технике. Применение лазерного зажигания для запуска ракетных двигателей имеет ряд преимуществ, приведенных в работах [1-5], по сравнению с традиционно используемыми пиротехническим, химическим и электроискровым способами. Основным способом инициации горения топлива от источника лазерной энергии является организация оптического пробоя либо в объеме смеси, либо вблизи специально установленной мишени в области с оптимальным для воспламенения соотношением топливных компонентов. Оптический пробой происходит в области фокусировки лазерного импульса высокой мощности. При фокусировке коротких лазерных импульсов длительностью не более десятков наносекунд пороговая плотность мощности для запуска механизма инициации искры оптического пробоя составляет порядка 10^{11} Вт/см² при оптическом пробое в объеме и 10^9 Вт/см² при пробое вблизи поверхности мишени [6 - 8]. Для достижения таких уровней плотности мощности обычно используются импульсные твердотельные лазеры на основе активной среды YAG:Nd или YAG:Yb с ламповой или полупроводниковой накачкой [9 - 10], импульсы которых с энергией от единиц до сотен мДж фокусируются оптическими системами с суммарным фокусным

расстоянием до 20-30 мм. Особенностью использования данных лазеров является необходимость обеспечения теплового режима лазера в достаточно узком интервале температур. Для ламповых лазеров это выражается в ограничении времени одного цикла работы (не более нескольких секунд) и частоты следования импульсов (не более 10-20 Гц) без использования систем охлаждения. Для лазеров с полупроводниковой накачкой для организации стабильной работы в течение достаточно длительного времени (до нескольких минут) при частоте следования импульсов 30-50 Гц необходимо охлаждение системы накачки для обеспечения её стабильного спектра излучения, попадающего в полосу поглощения активного элемента излучателя. Данные особенности могут накладывать некоторые ограничения на внедрение лазерных систем зажигания с точки зрения массогабаритных характеристик всей системы и обеспечения нужного времени работы или частоты включений свечи лазерного зажигания.

На сегодняшний день с развитием лазерной техники созданы полупроводниковые лазеры (лазерные диоды), которые обычно применяются в качестве источников накачки, с длительностью импульса в сотни микросекунд и энергией не менее 100-200 мДж, выходное излучение которых может инициировать искру оптического пробоя вблизи мишени. В этом случае работает механизм инициации непрерывного оптического разряда, для создания которого около поверхности достаточно значения плотности мощности излучения порядка десятков МВт на см² [11]. Автономное использование лазерных диодов для системы зажигания с устранением отдельного лазерного излучателя в виде активного элемента с модулятором добротности позволяет существенно снизить требования на

обеспечение теплового режима источника лазерного излучения, так как отпадает необходимость в стабилизации спектральной полосы излучения.

В данной статье представлены результаты экспериментов по воспламенению топлив кислород-водород, кислород-метан в запальном устройстве от источника лазерного излучения в виде полупроводникового лазера. Работы, направленные на активное внедрение данных топливных пар в ракетную технику, на сегодняшний день ведутся как в отечественной ракетно-космической отрасли [12, 13], так и за рубежом [14].

Запальное устройство с лазерным зажиганием на основе полупроводникового лазера с волоконным выводом излучения

Для проведения исследований по определению возможности использования полупроводниковых лазеров, предназначенных для систем накачки твердотельных лазерных излучателей, в качестве источника энергии воспламенения топливных смесей кислород-водород, кислород-метан в запальном устройстве использовался модуль накачки с выводом излучения в оптическое волокно диаметром 800 мкм. Основные характеристики модуля накачки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Длительность единичного импульса	500 мкс
Мощность единичного импульса	до 400 Вт
Частота повторения импульсов	до 50 Гц
Длина волны	808 нм
Напряжение накачки	16В
Ток накачки	не более 70А

Использование оптического волокна для доставки энергии воспламенения от источника излучения при лазерном зажигании позволяет существенно упростить конструкцию системы зажигания. Это достигается за счет возможности удаленного от ракетного двигателя размещения лазерного источника в зоне с пониженными тепловыми и вибрационными нагрузками [15]. Исследования по возможности использования оптического волокна для транспортировки излучения в системах лазерного зажигания проводятся также и за рубежом [16, 17].

На рисунке 1 показан эскиз свечи лазерного зажигания для воспламенения топлива в запальном устройстве (ЗУ). При работе лазерной свечи расходящееся лазерное излучение от матрицы лазерных диодов на выходе из оптического волокна коллимируется линзой № 1, затем параллельный лазерный пучок фокусируется линзой № 2 вблизи поверхности мишени, расположенной в её задней фокальной плоскости, где происходит инициация искры оптического пробоя.

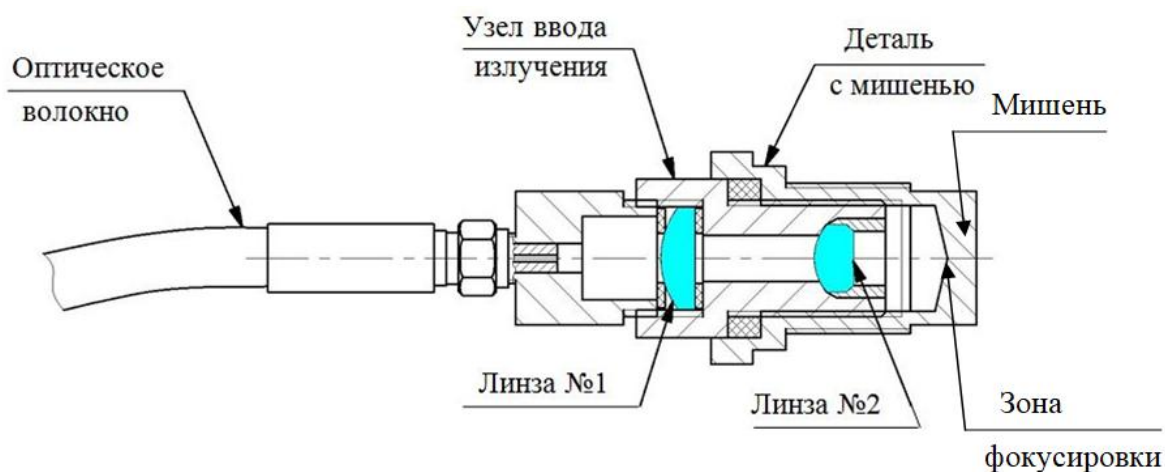


Рисунок 1 – Эскиз свечи лазерного зажигания

Для оценки плотности мощности лазерного импульса в зоне инициации искры оптического пробоя в свече лазерного зажигания воспользуемся формулой,

предложенной в работе [18], определения диаметра пятна фокусировки излучения, выходящего из оптического волокна и проходящего через двухлинзовую систему:

$$d_{min} = \frac{4M^2 f \lambda}{\pi d_{lens}}, \quad (1)$$

где M^2 – показатель качества лазерного луча, f – фокусное расстояние собирающей линзы двухлинзовой системы (линза 2 на рисунке 1), λ – длина волны излучения, d_{lens} – диаметр падающего на фокусирующую линзу лазерного луча.

Выражение для оценки показателя M^2 также приведено в работе [18]:

$$M^2 = \frac{d_c \Theta_d \pi}{4\lambda}, \quad (2)$$

где d_c – диаметр коллимированного луча, а Θ_d его расходимость. Для оптической системы свечи лазерного зажигания и используемого полупроводникового лазера имеем следующие значения: $d_c = 5$ мм, $\Theta_d = 0,005$ рад, $f = 12$ мм, $\lambda = 808$ нм, $d_{lens} = 5,1$ мм. Тогда $M^2 \approx 24$, и, подставляя значения в формулу (1), получим $d_{min} = 60$ мкм, что дает значение плотности мощности сфокусированного излучения от используемой линейки лазерных диодов равное 14 МВт/см². Данное значение плотности мощности позволяет инициировать непрерывный оптический разряд [11].

Исследуемое запальное устройство с установленной свечой лазерного зажигания показано на рисунке 2. Данная конструкция ЗУ использовалась ранее при исследованиях лазерного зажигания топлив кислород-водород и кислород-метан с использованием твердотельного лазера [19, 20].

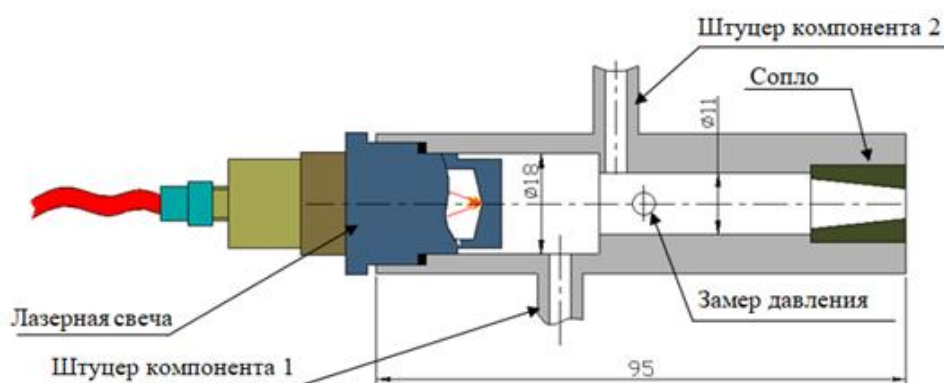


Рисунок 2 – Запальное устройство

При штатной подаче компонентов топлива в запальное устройство газообразное горючее подается в полость установки свечи через штуцер компонента 1, а газообразный окислитель в штуцер компонента 2. Выходной канал запального устройства имеет резьбу для установки сопел с различными критическими сечениями.

Результаты экспериментальных исследований на топливе кислород-водород

Первый цикл экспериментов проводился с использованием топливной пары кислород-водород, условия воспламенения которой по требуемой энергии воспламенения ниже, чем у топлива кислород-метан.

Было проведено несколько серий экспериментов. Целью первой серии было определение принципиальной возможности использования выбранного полупроводникового лазера для зажигания топлива в запальном устройстве, а так же получение данных о диапазоне рабочих параметров топливной смеси, в котором происходит стабильное воспламенение.

Эксперименты проводились при максимально возможной выходной импульсной мощности полупроводникового лазера, которая составляет 400 Вт, что соответствует энергии импульса 200 мДж при длительности импульса 500 мкс. Частота следования импульсов была выбрана равной 30 Гц. Запальное устройство работало в условиях атмосферного давления по штатной схеме подачи компонентов при значении коэффициента избытка окислителя $\alpha \approx 0,4$ и суммарном расходе компонентов $G_{\text{сум}} \approx 4$ г/с. В выходном канале запального устройства было установлено сопло с критическим сечением 2,8 мм.

Для определения последовательности подачи компонентов, обеспечивающей надежное зажигание, циклограмму запуска настраивали как на опережающую подачу водорода, так и кислорода. Опережающая подача окислителя на топливе с избытком горючего оказалась более предпочтительной. Это объясняется тем, что в момент воспламенения в зоне поджига образуется топливная смесь, параметры которой меняются от окислительного до восстановительного состава с переходом через стехиометрический, который определяет оптимальные условия для зажигания.

На рисунке 3 приведена диаграмма, отражающая результаты первой серии экспериментов.

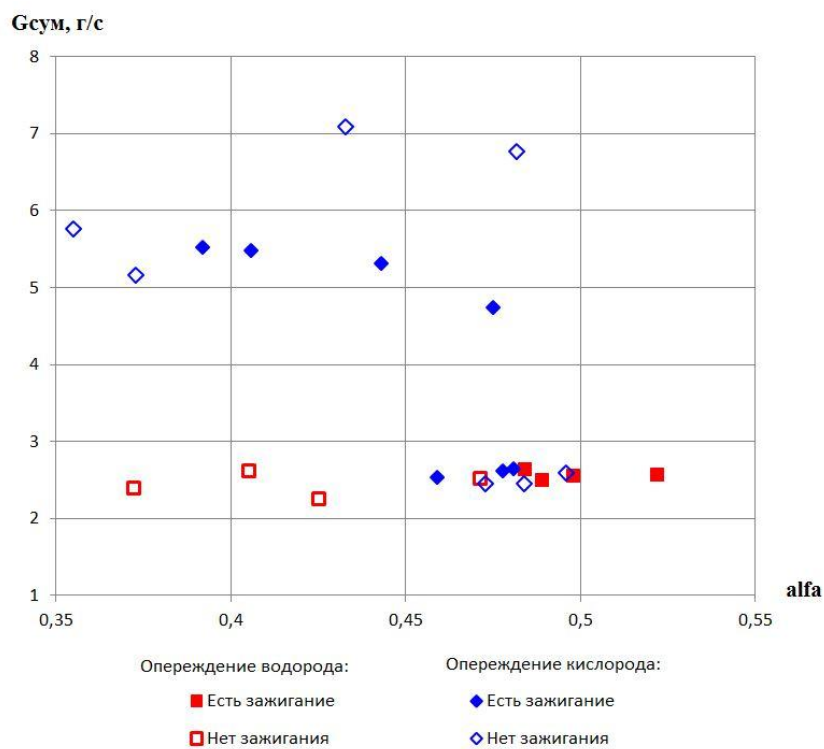


Рисунок 3 – Результаты первой серии экспериментов на компонентах кислород-водород

На рисунке 4 приведены характерные графики изменения параметров ЗУ в ходе экспериментов первой серии при опережающей подаче окислителя. Показания температуры продуктов сгорания носят индикативный характер, так как в целях обеспечения сохранности термопары она была установлена на некотором удалении от факела горения.

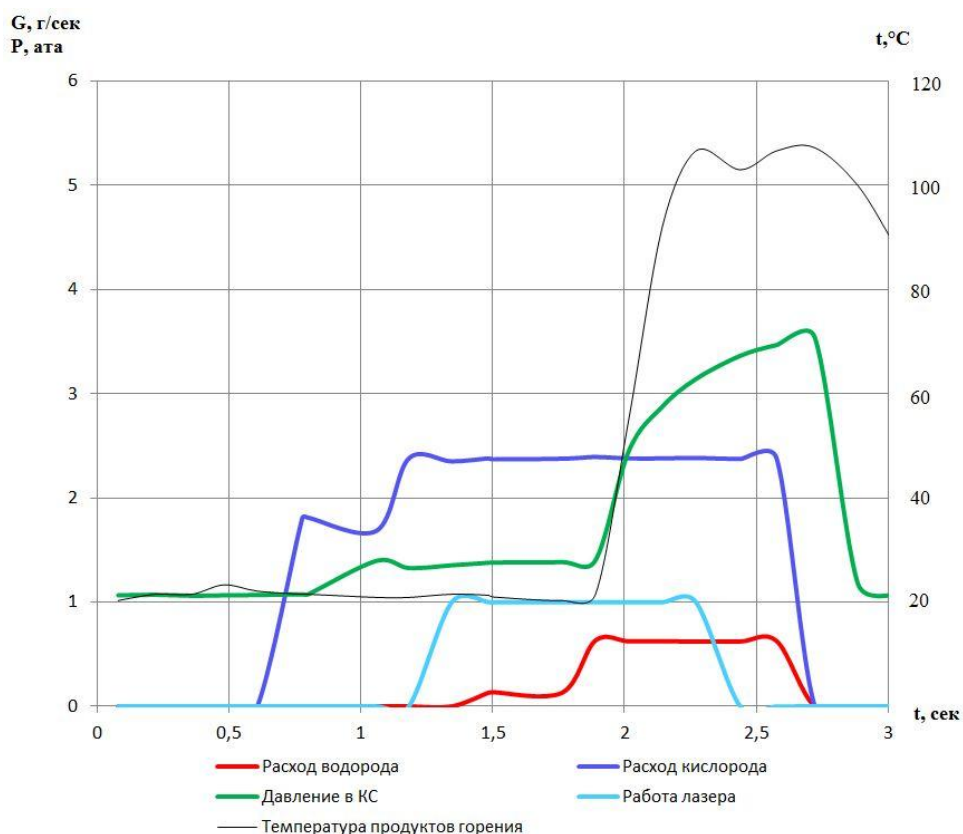


Рисунок 4 – Характерные графики изменения параметров работы запального устройства на компонентах кислород-водород с лазерным зажиганием

По результатам первой серии была продемонстрирована принципиальная возможность использования полупроводникового лазера для воспламенения топлива кислород-водород в запальном устройстве. Было получено зажигание при следующих рабочих параметрах:

- в пусках с опережением подачи горючего: при $\alpha \approx 0,48 - 0,52$, $G_{\text{сум}} \approx 2,7$ г/с;
- в пусках с опережением подачи окислителя: при $\alpha \approx 0,4 \dots 0,48$, $G_{\text{сум}} \approx 2,7 \dots 5,52$ г/с.

Вторая серия экспериментов проводилась для определения рабочего диапазона полупроводникового лазера по выходной мощности излучения, обеспечивающего воспламенение топлива на оптимальном режиме работы запального устройства,

который был определен по результатам первой серии: опережающая подача окислителя, $\alpha \approx 0,4$, $G_{\text{сум}} \approx 2,7\text{г/с}$. Изменение выходной мощности излучения осуществлялось уменьшением тока накачки полупроводникового лазера, который прямо пропорционален энергии импульса лазера, начиная с максимального значения в 70 А. Как было указано выше, при токе накачки 70А выходная энергия импульса полупроводникового лазера составляет 200 мДж, а мощность 400 Вт. Частота работы лазера составляла 30 Гц.

По результатам второй серии было установлено, что воспламенение топлива кислород-водород наблюдается в диапазоне значений выходной импульсной мощности от 400 Вт до 60 Вт. Снижение требований по выходным энергетическим параметрам лазера, используемого для воспламенения топлива, позволит снизить как массогабаритные параметры, так и требования по энергообеспечению системы зажигания.

Таким образом, на компонентах кислород-водород было проведено две серии экспериментов ЗУ с лазерным зажиганием от полупроводникового лазера. По их результатам была определена принципиальная возможность использования лазера такого типа для воспламенения исследуемой топливной смеси, получены диапазоны рабочих параметров ЗУ и выходной мощности лазера, обеспечивающие стабильное зажигание.

Успешные результаты экспериментов на топливной паре кислород-водород позволили перейти к исследованиям возможности использования полупроводникового лазера для воспламенения смеси кислород-метан.

Результаты экспериментальных исследований на топливе кислород-метан

Второй цикл экспериментальных исследований проводился на топливной паре кислород-метан и включал в себя три серии экспериментов.

При проведении первой серии, как и при работе на топливе кислород-водород, определялась принципиальная возможность использования полупроводникового лазера для воспламенения топлива кислород-метан. Также в ходе первой серии исследовались границы диапазона рабочих параметров топливной смеси, при которых происходит устойчивое воспламенение топлива при максимальной выходной импульсной мощности лазера.

Эксперименты проводились в условиях атмосферного давления при штатной схеме подачи компонентов топлива в запальное устройство с использованием выходного сопла с критическими сечениями 2,8 мм. Последовательность подачи компонентов соответствовала циклограмме, выбранной по результатам экспериментов, проведенных на топливе кислород-водород.

Диаграмма результатов первой серии приведена на рисунке 5.

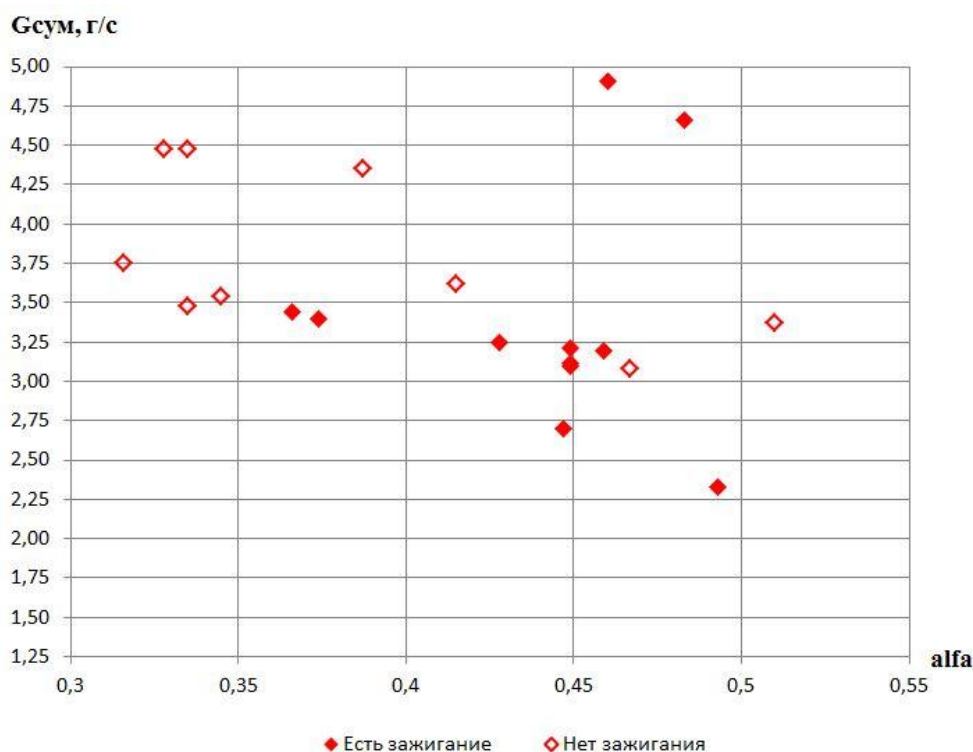
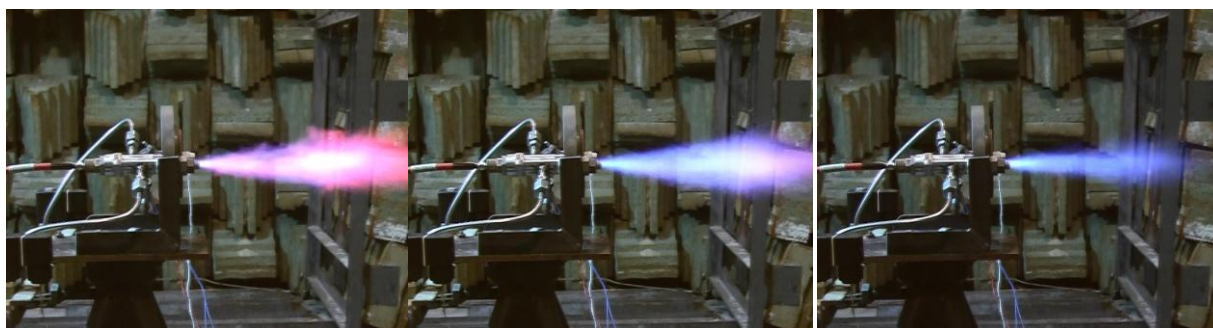


Рисунок 5 – Результаты первой серии экспериментов на компонентах кислород-метан

Первая серия второго цикла экспериментов продемонстрировала возможность лазерного воспламенения топлива кислород-метан. Стабильное воспламенение при максимальной выходной импульсной мощности было получено в следующем диапазоне рабочих параметров смеси: $\alpha = 0,27-0,49$; $G_{сум} = 2,33-4,91$ г/с. На рисунке 6 приведены фотографии различных моментов работы экспериментальной установки в момент огневых испытаний ЗУ второго цикла исследований.



а) момент воспламенения

б) стационарное горение

в) стадия останова

Рисунок 6 – Огневые испытания запального устройства при работе на компонентах кислород-метан

Вторая серия второго цикла экспериментальных исследований проводилась с целью определения влияния частоты подачи лазерных импульсов на возможность воспламенения. В ходе их проведения лазер работал при максимальной выходной мощности излучения с понижением частоты следования импульсов от 30 Гц. Рабочие параметры топливной смеси варьировались вблизи режима, обеспечивающего стабильное воспламенение и полученного по результатам первой серии экспериментов: $\alpha \approx 0,45$, $G_{\text{сум}} = 3$ г/с. Циклограмма подачи компонентов и другие параметры работы ЗУ не изменялись.

По результатам второй серии экспериментов было показано, что при снижении частоты следования импульсов ниже 20 Гц зажигание не происходит, при большей частоте было получено воспламенение для следующего диапазона рабочих параметров топлива: $\alpha = 0,34-0,46$, $G_{\text{сум}} = 2-3,48$ г/с.

В третьей серии исследовались границы диапазона по мощности лазерных импульсов, в котором наблюдается стабильное зажигание топлива кислород-метан при том же режиме работы ЗУ, что и в предыдущих двух сериях, и параметрах топливной смеси близких к $\alpha \approx 0,45$, $G_{\text{сум}} = 3$ г/с. Частота следования импульсов при работе лазера составляла 30 Гц, изменение выходной мощности осуществлялось аналогично второй серии первого цикла экспериментов, начиная с максимального значения 400 Вт.

Было установлено, что для топлива кислород-метан в диапазоне рабочих параметров смеси $\alpha = 0,45-0,85$, $G_{\text{сум}} = 1,83 - 4,65$ г/с стабильное воспламенение достигается при снижении мощности лазерных импульсов до 230 Вт. Это значение практически в 4 раза выше нижней границы соответствующего диапазона для пары

кислород-водород, что соответствует более высоким требованиям к энергетическим параметрам источника воспламенения для топлива кислород-метан.

По результатам второго цикла исследований была показана реализуемость лазерного зажигания топлива кислород-метан от полупроводникового лазера. Также были определены диапазоны рабочих параметров топливной смеси и характеристик лазера по мощности и частоте следования импульсов, при которых наблюдается стабильное воспламенение.

Заключение

1. Продемонстрирована принципиальная возможность осуществления лазерного зажигания топлив кислород-водород, кислород-метан от источника лазерного излучения в виде полупроводникового лазера с волоконным выводом излучения, использование которого позволяет снизить требования по термостабилизации и облегчает виброизоляцию системы зажигания при размещении на борту космического аппарата.

2. Исследованы параметры топливной смеси, при которых наблюдается стабильное зажигание топливных пар кислород-водород, кислород-метан в запальном устройстве при атмосферных условиях. Получены данные по влиянию рабочих характеристик полупроводникового лазера на возможность воспламенения топлива, а также определены диапазоны рабочих значений данных параметров, обеспечивающих стабильное воспламенение.

3. Внедрение лазерного зажигания в систему зажигания ракетных двигателей позволит снизить вес системы зажигания ракетных двигателей и упростит их запуск.

Система с лазерным зажиганием обладает повышенной надежностью и позволяет проводить многократные включения двигателя.

Библиографический список

1. Ребров С.Г., Голиков А.Н., Голубев В.А. Лазерное воспламенение ракетных топлив в модельной камере сгорания // Труды МАИ. 2012. № 53. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29491>
2. Ребров С.Г., Голиков А.Н., Голубев В.А., Шестаков А.В., Романюк В.Н. Воспламенение ракетных топлив с использованием микрочип-лазера // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=31098>
3. Phuoc T.X. Laser-induced spark ignition fundamental and applications // Optics and Lasers in Engineering, 2006, no. 44, pp. 351 - 397.
4. Wintner E. Laser Ignition of Engines: Technology, Benefits and Challenges. OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper LFP.1, available at: <https://doi.org/10.1364/LAOP.2014.LFP.1>
5. Wintner E., Kofler H., Agarwal A.K., Deneva M.A., Nenchev M.N. Laser Ignition of Engines – A Contribution to Environmental Protection and a Challenge to Laser Technology // Annual Journal of electronics, 2014, available at: http://ecad.tu-sofia.bg/et/2014/ET2014/AJE_2014/001-E_Wintner.pdf
6. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1989. - 280 с.
7. C.L.M. Ireland and C.G. Morgan. Gas breakdown by a short laser pulse // Journal of Physics D: Applied Physics, 1973, no. 6(6), pp. 720 - 729.

8. Morgan C.G. Laser-induced breakdown of gases // Reports on Progress in Physics, 1975, no. 38 (5), pp. 621 – 665.
9. Искандаров М.О., Никитичев А.А., Свердлов М.А., Тер-Мартirosян А.Л. Твердотельные лазеры ближнего ИК - диапазона с диодной накачкой // Научное приборостроение. 2015. Т. 25. № 4. С. 67 – 70.
10. Koechner W. Solid-State Laser Engineering. 6th Ed., Springer Series in Optical Sciences, New York, Springer, 2006, 764 p.
11. Райзер Ю.П. Непрерывный оптический разряд-поддержание и генерация плотной низкотемпературной плазмы лазерным излучением // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 3. С. 87 – 94.
12. Коватова Ю.С., Богачева Д.Ю. Оценка теплового состояния камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей малой тяги, работающего на экологически чистых компонентах топлива // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40191>
13. Галеев А.В. Оптимизация схем и режимов заправки вытеснительной системы подачи компонентов ракетного топлива для испытаний камеры сгорания ЖРД // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67814>
14. Belluscio A.G. ITS Propulsion – The evolution of the SpaceX Raptor engine, 2016, available at: <https://www.nasaspaceflight.com/2016/10/its-propulsion-evolution-raptor-engine>
15. Ребров С.Г., Голубев В.А., Голиков А.Н. Лазерное зажигание топлива кислород-керосин в ракетной технике: от запальных устройств к маршевым ракетным

<http://trudymai.ru/published.php?ID=84458>

16. Yalin A.P. High power fiber delivery for laser ignition applications // Optics Express, 2013, vol. 21, iIssue S6, pp. A1102 - A1112.

17. Mullett J.D., Dearden G., Dodd R., Shenton A.T., Triantos G., Watkins K.G. A comparative study of optical fibre types for application in a laser-induced ignition system // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, no. 11(5), available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1464-4258/11/5/054007/pdf>

18. Griffiths J., Dowding C., Riley M.J.W., Bickerton R. Gas Turbine Laser Ignition via Solid Core Optical Fiber? A Photon Flux Density Approach // Laser ignition conference, 27 – 30 April 2015, California, USA, available at: <https://www.osapublishing.org/ViewMedia.cfm?uri=LIC-2015-Th3A.3&seq=0&guid=3a3de6ab-b00f-a962-f7e3-8d4193e6dd19>

19. Иванов А.В., Ребров С.Г., Пономарев Н.Б., Голиков А.Н., Моталин Г.А., Плетнев Н.В., Архипов А.Б., Жигарев Л.Ф., Беляев В.С., Юлдашев Э.М., Рачук В.С., Гутерман В.Ю. Способ воспламенения компонентов топлива в камере сгорания ракетного двигателя и устройство для его осуществления (варианты). Патент РФ № 2326263, 2008. Бюлл. № 16, 10.06.2008.

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