

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 4. С. 174–184
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 174–184

Научная статья
УДК 536.248.2; 621.45.034
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-4-174-184

Экспериментальные исследования стойкости оптических узлов различного исполнения при воздействии тепловых потоков, характерных для работы камеры сгорания ЖРД

С.Г. Ребров¹, В.А. Голубев^{1✉}, А.Н. Голиков¹, И.А. Федоров¹, А.Е. Моргунов¹

¹ Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва, Россия

✉ golubev.va@mail.ru

Аннотация. Проведены испытания по определению стойкости узлов, содержащих оптически прозрачное окно, при воздействии тепловых потоков, характерных для работы камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя. Опробованы варианты исполнения узлов с закреплением оптического окна с помощью пайки или запрессовкой окна металлической втулкой. Исследовано влияние использования защитных элементов различного конструктивного исполнения на повышение стойкости оптических узлов к воздействию высоких тепловых потоков. По результатам проведенных испытаний выбраны конструкции оптического узла и защитного элемента, обеспечивающие стойкость оптического окна при воздействии теплового потока уровня 6 МВт/м².

Ключевые слова: тепловой поток, оптическое окно, камера сгорания, жидкостный ракетный двигатель, датчик теплового потока, лазерное зажигание

Для цитирования. Ребров С.Г., Голубев В.А., Голиков А.Н., Федоров И.А., Моргунов А.Е. Экспериментальные исследования стойкости оптических узлов различного исполнения при воздействии тепловых потоков, характерных для работы камеры сгорания ЖРД // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 4. С. 174–184. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-4-174-184

Original article

Experimental studies of resistance of optical subassemblies of various design under the impact of heat flows characteristic to the combustion chamber operation of the liquid-propellant jet engine

S.G. Rebrov¹, V.A. Golubev¹, A.N. Golikov¹, I.A. Fedorov¹, A.E. Morgunov¹

¹ State Scientific Center of the Russian Federation “Keldysh Research Center”, Moscow, Russia

✉ golubev.va@mail.ru

Abstract. The tests on the resistance determining of subassemblies containing transparent windows under the impact of heat flows characteristic for the combustion chamber operation of the liquid-propellant rocket engine. The options of the subassemblies implementing with the optical window by either soldering or the

window pressing-in by the metal hub are tried. The effect of protective elements of various structural design applying on enhancing optical subassemblies resistance to the high heat flows impact was studied. The results of the tests allowed selecting the optical subassembly structures and protective element ensuring the optical window resistance under the impact of the heat flow of the 6 MW/m² level.

Keywords: heat flow, optical window, combustion chamber, liquid propellant rocket engine, heat flow sensor, laser ignition

For citation. Rebrov S.G., Golubev V.A., Golikov A.N., Fedorov I.A., Morgunov A.E. Experimental studies of resistance of optical subassemblies of various design under the impact of heat flows characteristic to the combustion chamber operation of the liquid-propellant jet engine. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 174–184. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-4-174-184

Введение

Включение узлов, содержащих оптические окна, в состав конструкций камер сгорания жидкостного ракетного двигателя (КС ЖРД), а также энергетических установок различного назначения, в которых используются высокотемпературные камеры, необходимо для выполнения широкого круга задач. Например, прозрачное окно на поверхности реакционной полости может обеспечить более полный контроль над процессами в ней путем применения оптических методов диагностики. Оптическое окно также может быть использовано для ввода лазерного излучения в камеру с целью воспламенения топливных смесей, что позволяет улучшить рабочие характеристики различных типов энергетических установок, использующих такой тип запуска. Это могут быть как жидкостные ракетные двигатели и газогенераторы, применяемые в ракетно-космической отрасли, так и двигатели внутреннего сгорания, газотурбинные установки. Лазерное зажигание позволяет обеспечивать надежное воспламенение топливной смеси в более широком диапазоне рабочих параметров по давлению и соотношению компонентов топлива по сравнению с электроискровым, что подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями [1–4]. При этом повышается КПД и мощность двигателя. Также при лазерном зажигании улучшаются экологические показатели работы двигателя за счет более полного сгорания горючего [5]. Этим объясняется высокий интерес к внедрению лазерного зажигания для различных типов двигателей и энергетических установок как в России, так и за рубежом. В то же время прогресс в развитии лазерной техники за последние годы, в первую очередь создание компактных и энергетически эффективных

полупроводниковых и волоконных лазеров с малогабаритными источниками питания, обеспечивает наличие необходимой элементной базы для создания систем лазерного зажигания [6].

Размещение узла, содержащего прозрачное окно, непосредственно на стенке реакционной полости (камеры сгорания) как для оптической диагностики, так и для ввода лазерного излучения приводит к тому, что конструктивные элементы оптического узла подвергаются повышенным тепловым нагрузкам и термическим деформациям. При этом температура в камере может значительно различаться в зависимости от типа и назначения двигателя. Например, в камере ЖРД рабочая температура может достигать 4000 К, в то время как в газогенераторе ракетного двигателя это значение составляет до 1200 К при восстановительном составе газа и до 700 К при окислительном [7]. Высокие значения температуры и скорости течения рабочего газа в камере сгорания, а также большие давления в ней приводят к сильным тепловым потокам к стенкам камеры, в том числе в зоне возможной установки оптического узла. Так, на боковой стенке КС ЖРД вдали от сопла (ближе к форсуночной головке), где располагается область наиболее удобного расположения прозрачного окна, характерный уровень удельного теплового потока составляет около 5...5,2 МВт/м², а температура продуктов сгорания до 3000 К [8]. Воздействие температуры и больших тепловых потоков вызывает сильный нагрев внутренней поверхности камеры и большие температурные градиенты в ее стенках. Это сильно осложняет создание оптических окон для камер сгорания, особенно с учетом непрерывного условия, что оптическое окно не должно снижать надежности камеры. В этом плане опасность представляют нарушение герметичности

установки окна в корпусе и разрушение самого окна под воздействием термического напряжения, возникающего за счет разницы в температурных коэффициентах линейного расширения материалов окна и его оправы.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований, проводимых с целью определения стойкости оптических узлов различного конструктивного исполнения при воздействии тепловых потоков, характерных для работы КС ЖРД. Данные эксперименты проводились в ГИЦ «Центр Келдыша» на модельной установке, включающей в себя плазмотрон «Звезда» мегаваттного уровня мощности, на выходе которого установлена камера со сменными оптическими окнами. Предварительно рассчитывались параметры газового потока в данной камере на различных режимах работы плазмотрона и соответствующие им тепловые потоки в стенке. Для измерения уровней тепловых потоков в испытательной камере использовался датчик теплового потока специальной конструкции.

Описание экспериментальной установки и методики измерений

Установка, на которой проводились эксперименты, показана на рис. 1 и включает в себя плазмотрон «Звезда» и испытательную камеру. Рабочие параметры плазмотрона «Звезда» представлены в табл. 1 [9].

Таблица 1. Рабочие параметры плазмотрона «Звезда»

Параметр	Значение параметра
Источник электропитания	Трехфазная сеть 10 кВ
Дуговая мощность	до 4 МВт
Температура в камере	до 5000 К
Давление в камере	До 4 МПа
Рабочая среда	Воздух, азот, аргон и др.
Расход газа	От 0,05 до 1 кг/с
Максимальный тепловой КПД	До 80%

Из рис. 1 видно, что на испытательной камере симметрично относительно оси потока расположены посадочные места для установки испытуемого образца и датчика теплового потока, что гарантирует одинаковое значение тепловых потоков в зонах размещения данных элементов.

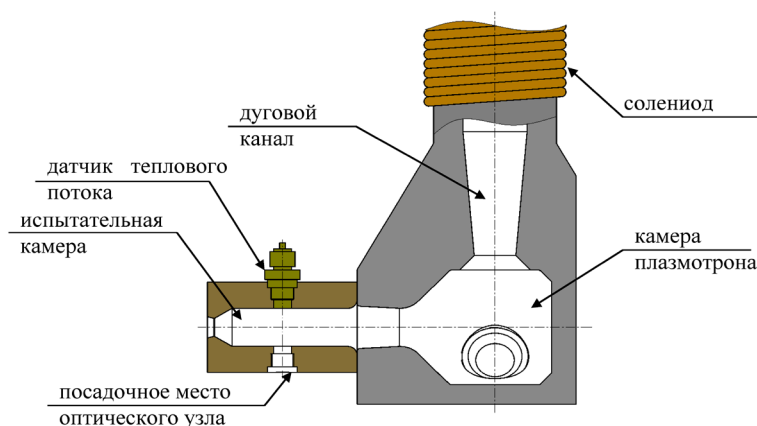


Рис. 1. Схема модельной установки

Для измерения теплового потока в стенку испытательной камеры от потока плазмы, выходящего из плазмотрона «Звезда», был использован изготовленный в ГИЦ «Центр Келдыша» датчик, схема которого показана на рис. 2 [10].

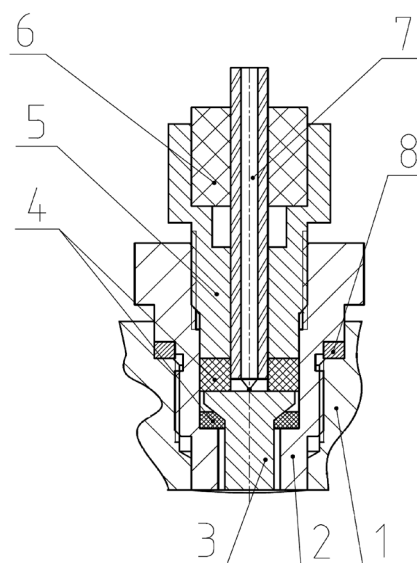


Рис. 2. Схема датчика измерения теплового потока: 1 – стенка испытательной камеры; 2 – корпус датчика измерения теплового потока; 3 – калориметрическое тело; 4 – теплоизолирующие прокладки, прижимной штуцер; 5 – прижимной штуцер; 6 – центрирующая муфта; 7 – термопара хромель-алюмель в керамической оправе; 8 – уплотняющие прокладки

Как видно из рис. 2, корпус датчика теплового потока 2 герметично устанавливается на посадочное место на стенке испытательной камеры 1 через уплотняющую прокладку 8. При проведении испытаний плазменный поток, выходящий из плазмотрона и проходящий через полость испытательной камеры, нагревает ка-

калориметрическое тело 3, выполненное из меди, являющейся материалом с высокой теплопроводностью, с заделанным в него спаем проводов термопары хромель-алюмель 7. При этом калориметрическое тело 3 термически развязано с корпусом датчика теплового потока 1 с помощью теплоизолирующих прокладок 4, которые обеспечивают расположение калориметрического тела без его прямого соприкосновения с корпусом. Также прокладки 4 за счет своей эластичности и давления создаваемого прижимным штуцером 5 обеспечивают герметичную установку калориметрического тела 3 внутри корпуса датчика 2. Для ровного расположения термопары хромель-алюмель 7 в прижимном штуцере 5 используется центрирующая втулка 6. При этом термопара 7 термически развязана со всеми узлами датчика теплового потока кроме калориметрического тела 3 за счет своей керамической оправы.

Измерение теплового потока происходит следующим образом. Измеряемый тепловой поток воздействует на тепловоспринимающую поверхность калориметрического тела, разогревая ее, при этом термопара регистрирует изменение температуры калориметрического тела во времени. Полученная в результате эксперимента зависимость температуры от времени служит исходной информацией для определения теплового потока.

Величина интервала времени $\Delta\tau$, в течение которого возможно проведение корректных измерений, а также допустимый диапазон измеряемых тепловых потоков зависят от геометрических параметров калориметрического тела и теплофизических свойств материала, из которого оно изготовлено. На регулярном режиме нагрева в одномерной постановке тепловой задачи, которая справедлива для рассматриваемой конструкции калориметрического тела, профиль температуры по толщине калориметрического тела δ будет линейным, и перепад температур между приемной поверхностью калориметрического тела и его тыльной стороной ΔT_x зависит от коэффициента теплопроводности материала λ и теплового потока q :

$$\Delta T_x = \frac{q\delta}{\lambda}. \quad (1)$$

С другой стороны, тепловой поток q однозначно связан с ростом средней температуры мишени ΔT по времени:

$$q = \rho\delta c \frac{\Delta T}{\Delta\tau}, \quad (2)$$

где ρ и c – плотность и теплоемкость материала калориметрического тела.

Если T_w – допустимая температура поверхности, на которую воздействует плазменный поток (T_w должна быть меньше температуры плавления и существенно меньше температуры плазмы), то средняя температура калориметрического тела не может превышать величины:

$$\Delta T_{\max} = T_w - \frac{\Delta T_x}{2} = T_w - \frac{q\delta}{2\lambda}. \quad (3)$$

Тогда, подставляя значение ΔT_{\max} в формулу (2), получим выражение для определения максимального значения теплового потока, которое можно измерять с помощью калориметрического тела с заданными характеристиками:

$$q_{\max} = \frac{\rho\delta c T_w}{\Delta\tau + \frac{\rho c \delta^2}{2\lambda}}. \quad (4)$$

Соответственно, если задан диапазон, в котором надо измерять тепловые потоки, то максимальное время работы калориметрического тела определяется по следующей формуле:

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{\rho\delta c T_w}{q_{\max}} - \frac{\rho c \delta^2}{2\lambda}. \quad (5)$$

Время работы имеет также минимальное возможное значение, которое определяется временем установления регулярного теплового режима. Это время можно определить по значению числа Фурье:

$$F_o = \frac{a\tau}{\delta^2} \geq 0,4, \quad (6)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – температуропроводность материала калориметрического тела.

Параметры изготовленного калориметрического тела для описанного выше датчика приведены в табл. 2, где m_s – масса калориметрического тела, c – удельная теплоемкость материала калориметрического тела, λ – его теплопроводность, а S – площадь приемной поверхности.

Таблица 2. Параметры калориметрического тела датчика теплового потока

Параметр	Значение параметра
m_s , кг	$4,47 \cdot 10^{-3}$
c , кДж/кг·К	0,39
λ , Вт/м·К	385
S , м ²	$2,826 \cdot 10^{-5}$
δ , мм	12

Если ΔT_{xa} – величина изменения температуры калориметрического тела за время Δt на квазистационарном режиме нагрева, то для параметров калориметрического тела описываемого датчика тепловой поток можно рассчитать из следующего соотношения:

$$q_w = 0,617 \cdot 10^5 \cdot \frac{\Delta T_{xa}}{\Delta t}. \quad (7)$$

При уровне теплового потока 10^7 Вт/м² допустимое время работы датчика составляет около 5 с, а перепад температур по длине датчика составляет $\Delta T_x = 310$ К.

Необходимо отметить, что измеряемый тепловой поток зависит от температуры приемной (обращенной в камеру) поверхности датчика. Более корректно характеризует условия в камере тепловой поток в холодную стенку q_{wc} . Данный тепловой поток связан с измеряемым тепловым потоком соотношением:

$$q_{wc} = q_w \frac{T_{ch} - T_{wc}}{T_{ch} - T_h}, \quad (8)$$

где T_{ch} – температура в камере, T_h – температура приемной поверхности калориметрического тела, T_{wc} – температура холодной стенки.

Описание экспериментальных образцов

Для обеспечения надежной работы оптического узла необходимо, чтобы прозрачное окно было выполнено из материала, который способен выдерживать высокое давление со стороны работающей камеры, которое в момент запуска может достигать пиковых значений в несколько десятков МПа. Исходя из требований прочности и оптической прозрачности, в качестве материала для окон оптических узлов, разрабатываемых в ГНЦ «Центр Келдыша», был выбран лейкосапфир. Выбор данного материала обусловлен тем, что он имеет высокую температуру плавления (более 2300 К), оптически прозрачен в широком диапазоне длин волн

(от 0,2 до 6 мкм), а по прочностным характеристикам уступает только алмазу. Сточки зрения уменьшения термических напряжений важна также сравнительно высокая теплопроводность сапфира – 23–25 Вт/м·К.

Также для сохранения работоспособности оптического узла и высокотемпературной камеры в целом критически важным является обеспечение герметичности прозрачного окна в течение всего цикла работы энергетической установки. Учитывая, что температура в зоне установки оптического узла на КС ЖРД (на охлаждаемой стенке) может превышать 1000 К, использование уплотнительных материалов для обеспечения герметичности прозрачного окна весьма затруднительно. Это связано с тем, что максимальная температура, которую могут выдерживать уплотнительные прокладки, сохраняя работоспособность, составляет не более 770 К в случае использования паронита марки ПМБ, а для фторопласта Ф4 или силиконовой термостойкой резины это значение не превышает 550 К.

Для обеспечения герметичности установки прозрачного окна без использования уплотнительных материалов в корпусе оптического узла в данной работе было опробовано два конструктивных решения, показанных на рис. 3. Первое решение – это пайка сапфирового окна

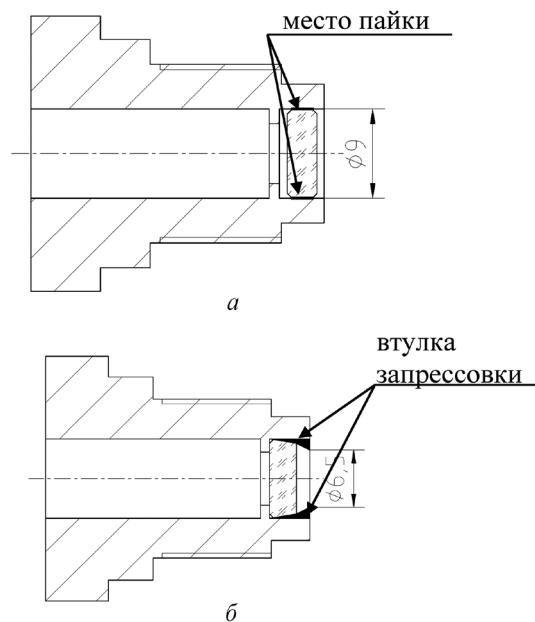


Рис. 3. Эскизы конструктивных исполнений оптических узлов: а – с впаивным выходным оптическим элементом; б – с запрессованным выходным оптическим элементом

к корпусу из титанового сплава марки ВТ-16 припоем ПСр 72 [11]. Второе решение – запрессовка сапфирового окна в корпус узла из стали 12Х18Н10Т с помощью втулки из того же материала. Выбор конструкционных материалов для изготовления корпуса оптических узлов обусловлен тем, что пайка сапфира может осуществляться только к следующим материалам: титановый сплав марки ВТ-16 и прецизионный сплав 29НК [11]. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) обоих материалов близок к сапфиру: $8,2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ для ВТ-16, $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ для 29НК и $5,6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ для сапфира. Однако технологический процесс пайки сапфира к сплаву 29НК гораздо более трудоемкий по сравнению с выполнением той же операции для титанового сплава [11]. Именно поэтому в случае изготовления узла с впаянным окном в качестве материала корпуса был выбран материал ВТ-16. При изготовлении узла с запрессованным окном был выбран один из наиболее распространенных конструкционных материалов – сталь 12Х18Н10Т. Данный материал, несмотря на существенное различие в ТКЛР с сапфиром, был выбран исходя из соображений уменьшения производственных затрат.

Результаты экспериментов

Проведено пять серий экспериментов. Первый цикл был посвящен определению зависимости температуры в испытательной камере и теплового потока в стенку от рабочих параметров плазмотрона. Режимы работы плазмотрона «Звезда» и значения измеряемых параметров,

полученные в ходе первой серии испытаний, приведены в табл. 3.

W – мощность работы плазмотрона, P_{ch} – давление в камере плазмотрона, T_{ch} – температура плазменного потока в камере, G_g – расход рабочего газа через плазмотрон, q_w – значение теплового потока, рассчитанное по формуле (7) на основе данных с датчика измерения теплового потока, q_{wc} – тепловой поток в холодную стенку, рассчитанный по формуле (8).

По результатам первой серии экспериментов была построена аппроксимационная зависимость теплового потока q_{wc} от мощности плазмотрона W :

$$q_{wc} = 0,54W^{0,756}. \quad (11)$$

Измеренные тепловые потоки достаточно хорошо коррелируют с результатами предварительно сделанных расчетов. Для расчетов тепловых потоков в стенки камеры в программном комплексе «Логос-Препост» сначала моделировалось течение газа в ней: находились распределения скоростей, температур и плотностей газа. Затем по классической формуле для турбулентного теплообмена рассчитывались коэффициенты теплоотдачи между газом и стенкой. Здесь необходимо отметить, что для получения корректных результатов важно правильно задавать значения теплофизических свойств газа, которые независимо определялись по результатам равновесных термодинамических расчетов. В табл. 4 приведены расчетные значения коэффициентов теплоотдачи α ($\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$) и q_{wc} для трех вариантов режима работы плазмотрона.

Табл. 3. Режимы испытаний первой серии экспериментов

Номер испытания	W , кВт	P_{ch} , МПа	T_{ch} , К	G_g , г/с	q_w , МВт/м ²	q_{wc} , МВт/м ²
1	726	0,676	4197	78	4,06	4,34
2	836	0,837	3978	99	4,79	5,20
3	946	0,855	4240	97	4,81	5,22
4	1031	0,998	4311	112	5,50	5,99
5	1780	2,082	3714	259	6,80	8,01
6	1537	1,774	3857	216	5,73	6,93

Таблица 4. Результаты расчетов параметров теплообмена в модельной камере для трех режимов работы плазмотрона

Номер режима	P_{ch} , МПа	T_{ch} , К	G_g , г/с	α , Вт/ м ² К	q_{wc} , МВт/м ²
1	0,72	4158	83	1311,4	5,059
2	1,15	4070	135	1885,4	7,108
3	1,88	3738	233	2540,2	8,733

Расчеты, как и результаты непосредственных измерений тепловых потоков, подтвердили, что экспериментальная установка на базе плазмотрона мегаваттного класса типа «Звезда» позволяет моделировать условия в КС ЖРД.

Для проведения дальнейших экспериментов с исследованием стойкости оптических узлов были выбраны три режима работы плазмотрона, для которых значения температуры газа и теплового потока соответствуют и превосходят соответствующие значения для крупноразмерных ЖРД:

- первый режим при $W = 836$ кВт, $T_{ch} = 3978$ К, $q_{wc} = 5,2$ МВт/м²;
- второй режим при $W = 1031$ кВт, $T_{ch} = 4311$ К, $q_{wc} = 5,99$ МВт/м²;
- третий режим при $W = 1537$ кВт, $T_{ch} = 3857$ К, $q_{wc} = 6,93$ МВт/м².

Во второй и третьей сериях экспериментов для дополнительной защиты окна оптического узла между торцом узла и полостью испытательной камеры на посадочное место устанавливалась медная защитная деталь в виде диафрагмы, как это показано на рис. 4 на примере установки узла с впаянным окном. Стоит отметить, что диаметр апертуры защитной диафрагмы, равный 5 мм, меньше диаметра открытой части окна, который составляет 9 мм для узла с впаянной оптической деталью и 6,5 мм для узла с запрессованным окном.

По результатам осмотра по завершении третьего испытания на прозрачном окне была обнаружена трещина и следы сажи, это произошло после работы установки при температуре плазмы $T_{ch} = 3770$ К и значении теплового потока в холодную стенку $q_{wc} = 7,62$ МВт/м². Однако, несмотря на трещину сапфирового окна, оптический узел сохранил герметичность, что было подтверждено в ходе опрессовки воздухом при давлении 1 МПа.

Во второй серии экспериментов испытывался образец оптического узла с впаянным сапфировым окном. Использование защитной детали в данной серии экспериментов предполагало, что за счет того, что апертура диафрагмы

меньше диаметра выходного окна, будет обеспечена защита зоны пайки от непосредственного теплового воздействия плазменного потока.

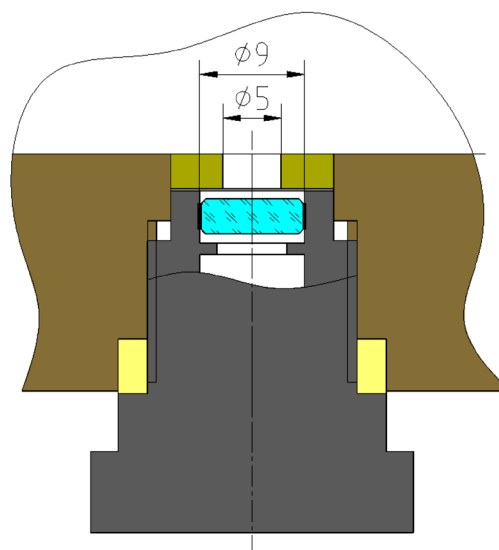


Рис. 4. Эскиз установки защитной диафрагмы между оптическим узлом и полостью камеры

В ходе второй серии было проведено три испытания, параметры и результаты которых приведены в табл. 5. На рис. 5 приведена фотография работающей экспериментальной установки.



Рис. 5. Фотография работающей экспериментальной установки

Таблица 5. Результаты второй серии испытаний

W , кВт	P_{ch} , МПа	T_{ch} , К	G_g , г/с	q_w , МВт/м ²	q_{wc} , МВт/м ²	Примечание
831	0,720	4159	83	3,98	4,43	Образец успешно прошел испытания
1137	1,154	4071	135	5,38	6,11	Образец успешно прошел испытания
1619	1,881	3770	233	6,50	7,62	Разрушение оптического элемента

В третьей серии экспериментов проводились испытания с использованием оптического узла с выходным оптическим элементом, установленным с помощью запрессовки. В ходе данных испытаний между испытуемым образцом и камерой насадка так же, как и во второй серии испытаний, устанавливалась защитная деталь с апертурой диаметром 5 мм, как это показано на рис. 4. Было проведено два испытания, результаты которых приведены в табл. 6.

Результаты третьей серии испытаний показали, что при использовании оптического узла, в котором герметичная установка прозрачного окна в корпус обеспечивается запрессовкой, разрушение оптического элемента происходит при работе установки на втором выбранном режиме плазмотрона. При этом конструктивно установка оптического узла не отличалась от той, что была реализована во второй серии испытаний с использованием образца с впаянным выходным окном. Большую стойкость впаянного оптического элемента по сравнению с запрессованным при сохранении остальных условий испытаний можно объяснить возникновением дополнительных внутренних напряжений при закреплении окна с помощью запрессовки. Изначальное наличие внутренних напряжений, дополненное термическими напряжениями при воздействии высоких тепловых потоков, по всей видимости, приводит к более раннему разрушению выходного окна.

Четвертая и пятая серии испытаний проводились с целью определения влияния наличия защитной диафрагмы и ее геометрических размеров на стойкость оптического узла.

В четвертом цикле экспериментов использовался второй, идентичный задействованному в третьей серии испытаний образец оптического узла с запрессованным выходным окном. В ходе данной серии между оптическим узлом и полостью испытательной камеры была установлена защитная деталь с апертурой диаметром 7,5 мм, что было больше диаметра открытой части окна испытуемого образца.

В четвертой серии было проведено одно испытание со следующими параметрами:

$W = 840$ кВт, $P_{ch} = 0,73$ МПа, $T_{ch} = 4231$ К, $G_g = 83$ г/с, $q_w = 4,74$ МВт/м², $q_{wc} = 5,15$ МВт/м².

После первого же испытания четвертой серии на выходном окне испытуемого узла появились трещины. Результат данной серии говорит о том, что увеличение апертуры защитной диафрагмы существенно снижает стойкость оптического узла к воздействию температуры и теплового потока со стороны горячего газа.

Пятая серия испытаний проводилась с целью оценки стойкости оптического узла при полном отсутствии защитной диафрагмы. При проведении данных экспериментов был задействован ранее не использовавшийся образец с впаянным оптическим элементом.

По результатам второй и третьей серий испытаний образец с впаянным окном показал стойкость к воздействию тепловых потоков больших уровней по сравнению с образцом с запрессованным окном. Поэтому перед проведением пятого цикла экспериментов было сделано предположение, что, возможно, оптический узел с впаянным окном сможет сохранить целостность конструкции без использования защитной детали, отделяющей испытуемый образец от плазменного потока в полости испытательной камеры.

В ходе пятой серии было проведено одно испытание при следующих рабочих параметрах установки: $W = 848$ кВт, $P_{ch} = 0,74$ МПа, $T_{ch} = 4312$ К, $G_g = 83$ г/с, $q_w = 4,77$ МВт/м², $q_{wc} = 5,18$ МВт/м². После проведения данного эксперимента при осмотре оптического узла было установлено, что произошло полное разрушение испытуемого образца с выгоранием сапфирового окна.

На рис. 6 приведены фотографии состояния выходных окон оптических узлов после проведения циклов испытаний.

По результатам четырех серий испытаний стойкости оптических узлов различного конструктивного исполнения к воздействию температуры и тепловых потоков, характерных для работы КС ЖРД, были сделаны следующие выводы:

Таблица 6. Результаты третьей серии испытаний

W , кВт	P_0 , МПа	T_0 , К	G_g , г/с	q_w , МВт/м ²	q_{wc} , МВт/м ²	Примечание
827	0,711	4212	81	4,30	4,83	Образец успешно прошел испытания
1111	1,140	3992	135	5,30	5,93	Разрушение оптического элемента

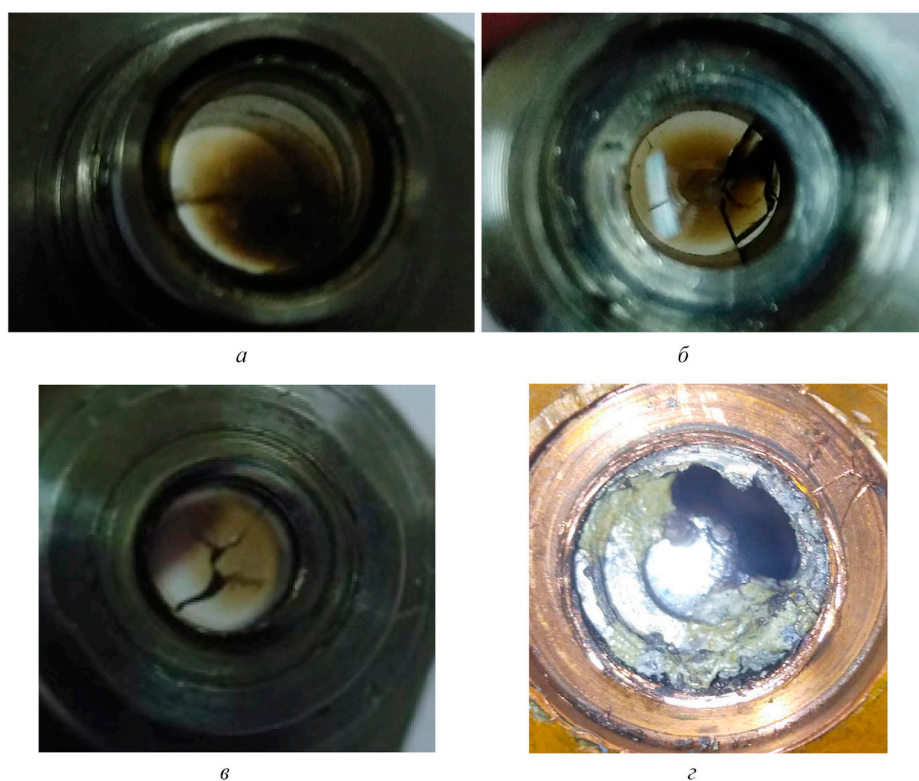


Рис. 6. Состояние оптических узлов после проведения циклов испытаний: *а* – окно оптического узла с впаянным стеклом после второй серии испытаний; *б* – окно оптического узла с запрессованным стеклом после третьей серии испытаний; *в* – окно оптического узла с запрессованным стеклом после четвертой серии испытаний; *г* – разрушенный оптический узел с впаянным стеклом на посадочном месте испытательной камеры после пятой серии испытаний

– для обеспечения стойкости оптического узла как с впаянным, так и с запрессованным выходным окном между торцом узла и полостью камеры необходимо устанавливать защитную деталь в виде диафрагмы, апертура которой имеет диаметр меньший, чем диаметр открытой части выходного оптического окна;

– при использовании защитной диафрагмы оптический узел с впаянным окном сохраняет работоспособность при воздействии больших тепловых потоков, чем узел с запрессованным окном;

– при использовании защитной диафрагмы с апертурой большей, чем открытая часть окна, происходит частичное разрушение оптического элемента, с сохранением целостности оправы, что может говорить о том, что при меньших тепловых потоках может быть использован защитный элемент, не ограничивающий апертуру оптического узла;

– без использования защитной детали при воздействии температуры и теплового потока, характерных для работы крупногабаритной камеры ЖРД, происходит полное разрушение оптического узла.

Заключение

На модельной установке ГНЦ «Центр Келдыша», включающей в себя плазмотрон «Звезда» и испытательную камеру, были проведены испытания по определению стойкости оптических узлов различного конструктивного исполнения к воздействию температуры и теплового потока, характерных для работы крупногабаритной камеры ЖРД. Для измерения теплового потока в стенку испытательной камеры использовался разработанный и изготовленный в ГНЦ «Центр Келдыша» датчик теплового потока.

По результатам испытаний было установлено, что для обеспечения надежной работы оптического узла в исследуемых условиях необходимо использовать защитную диафрагму, апертура которой имеет диаметр меньший, чем диаметр открытой части выходного оптического окна. При этом защитная деталь устанавливается на посадочное место оптического узла между его торцом и полостью камеры. Выяснилось, что при одинаковой установке оптический узел с впаянным окном сохраняет работоспособность при воздействии теплового потока

больших значений по сравнению с узлом с запрессованным оптическим элементом.

Создание надежных оптических окон для камер сгорания открывает путь внедрения эффективных методов оптической диагностики и систем лазерного зажигания топливных смесей.

Список источников

1. **Голиков А.Н., Голубев В.А., Ребров С.Г.** Экспериментальные исследования лазерного зажигания несамовоспламеняющихся топлив в ракетном двигателе малой тяги // *Космонавтика и ракетостроение*. 2010. № 3 (60). С. 92–99.
2. **Ребров С.Г., Голиков А.Н., Голубев В.А., Носач С.М., Молчанов А.М.** Лазерное воспламенение кислородно-водородной смеси в цилиндрическом канале // *Тепловые процессы в технике*. 2012. Т. 4. № 2. С. 82–89.
3. **Ребров С.Г., Голиков А.Н., Голубев В.А., Шестаков А.В., Романюк В.А.** Лазерное воспламенение топлив в запальном устройстве с использованием микрочип-лазера // *Труды МАИ*. 2012. № 57. С. 13. URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/08d/lazernoe-voisplamnenie-topliv-v-zapalnom-ustroystve-s-ispolzovaniem-mikrochip-lazera.pdf?lang=ru&issue=57>
4. **Wintner E.** Laser Ignition of Engines: Technology, Benefits and Challenges. OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper LFP.1. URL: <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. URL: http://ecad.tu-sofia.bg/et/2014/ET2014/AJE_2014/001-E_Wintner.pdf
6. **Голиков А.Н., Голубев В.А., Ребров С.Г.** Экспериментальные исследования лазерного зажигания в ракетном двигателе малой тяги с использованием полупроводникового лазера // *Космонавтика и ракетостроение*. 2020. № 1 (112). С. 108–120.
7. **Гуртовой А.А., Иванов А.В., Скоморохов Г.И., Шматов Д.П.** Расчет и конструирование агрегатов ЖРД: учебное пособие. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2016. 167 с.
8. **Безменова Н.В., Борисов В.А., Тисарев А.Ю., Шустов С.А.** Сопряженное моделирование тепловых, гидродинамических и прочностных процессов в системе охлаждения камеры ЖРД: электронное учебное пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, 2013. 130 с.
9. **Кошляков В.В., Ребров С.Г., Голиков А.Н., Федоров И.А., Морозов А.Г., Ильюша А.В.** О возможности использования мощных плазмотронов переменного тока «Звезда» для газификации водоугольных суспензий // *Тепловые процессы в технике*. 2020. Т. 12. № 8. С. 374–384. DOI: 10.34759/tpt-2020-12-8-374-384
10. Устройство для измерения теплового потока в камере сгорания и способ его установки: пат. Российская Федерация / Пономарев Н.Б., Архипов А.Б., Максимов В.А., Агаларов Ш.У. – № 2586089, заявл. 21.04.2015, опубл. 10.06.2016. Бюл. № 16.
11. **Петрунин И.Е.** Справочник по пайке. Москва: Машиностроение-1, 2003. 480 с.

References

1. **Golikov A.N., Golubev V.A., Rebrov S.G.** 2010. Eksperimental'nyye issledovaniya lazernogo zzhiganiya nesamovosplamenyayushchikhsya topliv v raketnom dvigatele maloy tyagi [Experimental studies of laser ignition of thruster non-hypergolic propellants]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2010, no. 3(60), pp. 92–99. (In Russ.)
2. **Rebrov S.G., Golikov A.N., Golubev V.A., Nosach S.M., Molchanov A.M.** Lazernoye vosplamneniye kislorodno-vodorodnoy smesi v tsilindricheskom kanale [Laser ignition of an oxygen-hydrogen mixture in a cylindrical channel]. *Thermal processes in engineering*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 82–89. (In Russ.)
3. **Rebrov S.G., Golikov A.N., Golubev V.A., Shestakov A.V., Romanuk V.A.** Lazernoye vosplamneniye topliv v zapal'nom ustroystve s ispol'zovaniyem mikrochip-lazera [Laser ignition of fuels in an ignition device using a microchip laser]. *Trudy MAI*, 2012, no. 57. (In Russ.) URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/08d/lazernoe-voisplamnenie-topliv-v-zapalnom-ustroystve-s-ispolzovaniem-mikrochip-lazera.pdf?lang=ru&issue=57>
4. **Wintner E.** Laser Ignition of Engines: Technology, Benefits and Challenges. OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper LFP.1. URL: <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. URL: http://ecad.tu-sofia.bg/et/2014/ET2014/AJE_2014/001-E_Wintner.pdf
6. **Golikov A.N., Golubev V.A., Rebrov S.G.** Eksperimental'nyye issledovaniya lazernogo zzhiganiya v raketnom dvigatele maloy tyagi s ispol'zovaniyem poluprovodnikovogo lazera [Experimental studies of laser ignition in low-thrust rocket engine using a semiconductor laser]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2020, no. 1(112), pp. 108–120. (In Russ.)
7. **Gurtovoy A.A., Ivanov A.V., Skomorokhov G.I., Shmatov D.P.** Raschet i konstruirovaniye agregatov ZHRD: nobnoye posobiye [Calculation and design of liquid-propellant rocket engines: a handy guide]. Voronezh, Voronezh State Technical University, 2016, 167 p. (In Russ.)
8. **Bezmenova N.V., Borisov V.A., Tisarev A.Yu., Shustov S.A.** Sopryazhennoye modelirovaniye teplovykh, gidrodinamicheskikh i prochnostnykh protsessov v sisteme okhlazhdeniya kamery ZHRD [Conjugated modeling of thermal, hydrodynamic and strength processes in the cooling system of the LRE chamber: electronic textbook]. Samara, Samara State Aerospace University S.P. Koroleva, 2013, 130 p. (In Russ.)
9. **Koshlakov V.V., Rebrov S.G., Golikov A.N., Fedorov I.A., Morozov A.G., Il'yusha A.V.** Te possibility of using powerful AC plasmatrons Zvezda for gasification of water-coal suspensions. *Thermal processes in engineering*, 2020, vol. 12, no. 8, pp. 374–384. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2020-12-8-374-384
10. **Ponomarev N.B., Arkhipov A.B., Maksimov V.A., Agalarov Sh.U.** Ustroistvo dlya izmereniya teplovogo potoka v kamere sgoraniya i sposob ego ustanovki [Device for measuring heat flow in the combustion chamber and method of its

installation]. Patent Rossiiskaya Federatsiya no. 2586089 (2016). 11. **Petrinin I.Ye.** Spravochnik po payke [Soldering guide]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2003, 480 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 10.02.2023; одобрена после рецензирования 31.03.2023; принята к публикации 03.04.2023.

The article was submitted on 10.02.2023; approved after reviewing on 31.03.2023; accepted for publication on 03.04.2023.