

## ОЦЕНКА ОТКЛОНЕНИЯ СВЕТОВОГО ЛУЧА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОСАДКИ САМОЛЕТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА

В. С. Теличкань, С. У. Увайсов, И. А. Иванов, С. М. Лышов

Одним из наиболее сложных маневров, с которым сталкивается любой пилот самолета, является посадка на взлетно-посадочную полосу (ВПП). Необходимо учитывать одновременно множество динамических факторов. Такая операция требует от пилота особенной концентрации внимания и мгновенного принятия решений.

Задача существенно усложняется, если самолет необходимо посадить на палубу авианесущего крейсера, поскольку корабль находится постоянно в движении. К дополнительным трудностям этого маневра добавляются турбулентные потоки воздуха, возникающие за кормой корабля, а также относительно небольшая длина ВПП, которая составляет около 200 метров. Совершить приземление при минимальной скорости самолета 240 км/ч на такой маленький участок невозможно без вспомогательных устройств.

В настоящее время одним из таких устройств является установка, называемая аэрофинишером (рис. 1) [1]. Данная установка замедляет движение самолета и полностью его останавливает после зацепления гаком самолета за трос аэрофинишера. Для увеличения вероятности зацепления за трос на корабле размещаются четыре таких аэрофинишера, каждый из которых разнесен на несколько метров друг от друга. Таким образом, шансы благополучно сесть на палубу возрастают в четыре раза.



Рис. 1. Зацепление гаком самолета за трос аэрофинишера

Однако даже такое количество тросов не гарантирует успешной посадки на корабль. В соответствии с международной практикой угол приземления самолета на ВПП должен составлять  $3^\circ$ . На этот угол пилоту необходимо вывести самолет заблаговременно. Вертикальная проекция полета под этим углом называется глиссадой [2].

Такой же угол посадки применяется и для палубной авиации. Однако при посадке самолета на корабль придерживаться выбранной траектории крайне сложно из-за непрерывной качки в различных направлениях, а также движения судна. Вывести летательный аппарат на глиссаду в таких сложных условиях пилоту помогает оптическая система посадки (ОСП) (рис. 2) [3].



Рис. 2. Оптическая система посадки

Современные ОСП, как правило, состоят из пяти блоков-фонарей с линзами, которые расположены под углом 10 угловых минут относительно друг друга. При этом отклонение угла наклона не должно превышать одной угловой минуты. Каждый фонарь светит собственной индикацией под определенным углом. При заходе на глиссаду пилот ориентируется на центральный фонарь, который светит зеленым. Боковые сигнальные огни служат дополнительным ориентиром для пилота и находятся на одной линии с зеленым фонарем. В случае отклонения от глиссадного курса пилот увидит индикацию другого цвета соседнего фонаря, которая будет находиться выше или ниже уровня сигнальных огней.

ОСП не подвержена раскачиванию при бортовой и килевой качке корабля. Она находится на собственной платформе, которая удерживает всю систему в постоянном горизонтальном положении. Однако погрешность позиционирования существующей системы может достигать до 5 угловых минут [4].

Для устранения существующих недостатков в работе предлагается новая конструкция ОСП. Она имеет 12 фонарей для большей информативности пилота. Для увеличения дальности свечения в каждом фонаре применяются светодиодные источники света. Такое решение имеет более длительный срок службы источников света и лишено проблемы запотевания линз в корпусе фонаря.

Среди особенностей разрабатываемой конструкции ОСП можно выделить меньшую массу и применение более современных приводных систем. Предлагаемое решение поможет снизить погрешность позиционирования ОСП более чем в 2 раза.

В различных погодных условиях оптическая система посадки подвергается воздействию дополнительных внешних возмущающих факторов, влияющих на ее работу. Так, например, необходимо учитывать влияние электронных компонентов самой системы, в результате работы которых возникает дополнительный нагрев конструкции ОСП [5].

Влияние температурного воздействия приводит к деформации конструкции, что вносит дополнительные погрешности в работу ОСП. В соответствии с условиями эксплуатации конструкция оптической системы работает на открытом воздухе и должна обеспечивать работоспособность в широком диапазоне температур от  $-40$  до  $70$  °C и оставаться в пределах допуска отклонений. Светодиодные модули, температура которых может достигать до  $150$  °C, оказывают ощутимое влияние на температурные характеристики системы.

Для обеспечения устойчивости к воздействию температурных факторов необходимо определить характер влияния внешних сред и светодиодных модулей на конструкцию.

Если рассматривать конструкцию ОСП как гетерогенную анизотропную систему, то задача математического моделирования сводится к решению системы дифференциальных уравнений равновесия относительно компонента вектора перемещения [6]:

$$\nabla \cdot ({}^4C(r) \cdot \nabla u) + f_v = 0,$$

где  $r = x_k e_k = x_1 e_1 + x_2 e_2 + x_3 e_3$  – радиус-вектор рассматриваемой точки;  $u = u_k e_k$  – вектор перемещения;  $\nabla = e_k \frac{\partial}{\partial x_k}$  – набла-оператор Гамильтона;  ${}^4C(r) = C_{ijkl} e_i e_j e_k e_l$  – тензор упругих моделей;

$f = f_{vk} e_k$  – вектор объемных сил; символ « $\cdot$ » обозначает операцию свертки.

Одним из основных факторов, учитываемых при описании уравнений равновесия, является тензор деформаций, вызванных изменением температуры:

$$e_{ij}^T = \alpha_{ij} \Delta T,$$

где  $\Delta T$  – изменение температуры в точке;  $\alpha_{ij}$  – тензор коэффициентов линейного теплового расширения. Таким образом, изменение температуры сказывается на деформации конструкции и подчиняется закону линейного расширения.

В твердом теле основным механизмом расширения и других тепловых эффектов является увеличение амплитуды колебаний кристаллической решетки. Очевидно, что при различных температурных воздействиях на конструкцию, будет меняться угол наклона световых лучей ОСП. Из технического задания следует, что угол между соседними фонарями должен составлять 10 угловых минут. Погрешность установки каждого из них не должна превышать одной угловой минуты. Такое позиционирование достигается путем точной юстировки [7].

Для формирования светового луча группа светодиодных модулей устанавливается на задней стенке фонаря. Каждая группа состоит из 18 светодиодов. В рабочем режиме свечения каждый светодиод потребляет 1 Вт. КПД светодиода составляет 20%, что составляет 0,2 Вт потребляемой энергии. Оставшиеся 0,8 Вт расходуется на нагрев светодиода. Для более эффективной работы светодиодов и увеличения их ресурса необходимо применить соответствующую систему охлаждения. Отвод тепла от кристаллов светодиодов обеспечивается специально разработанным радиатором [8].

Методика проектирования конструкции ОСП, устойчивой к деформации в результате теплового влияния внутренних модулей, представлена на рис. 3.

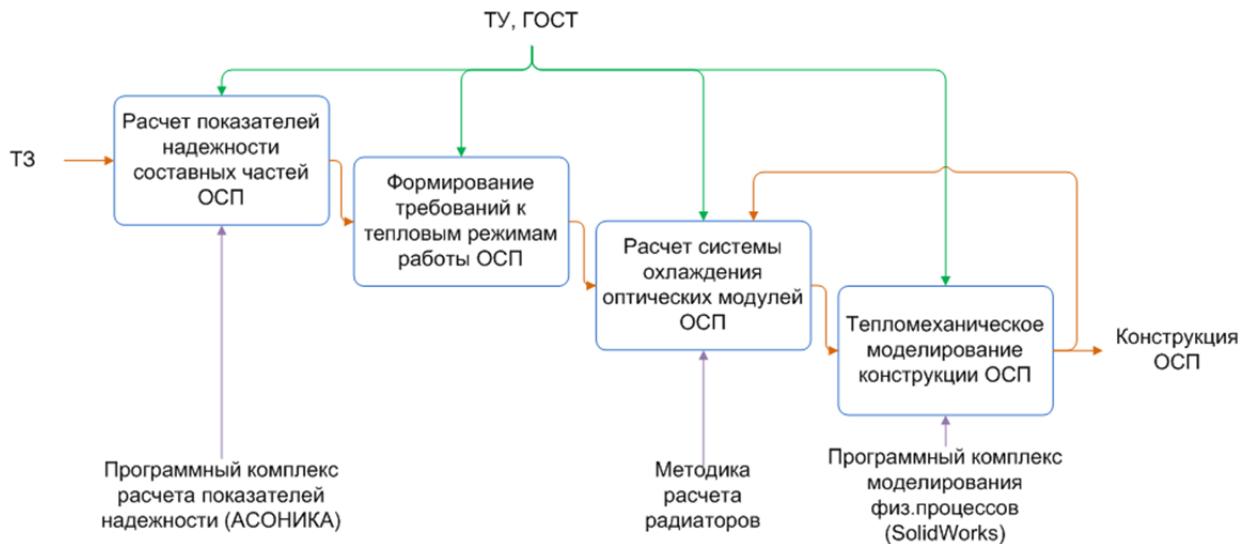


Рис. 3. Методика проектирования конструкции ОСП с учетом теплового воздействия

Представленная методика учитывает необходимость проектирования системы охлаждения, обеспечивающей заданный в техническом задании ресурс в различных температурных условиях. С учетом спроектированной системы охлаждения (радиаторов), обладающей определенными массогабаритными и теплофизическими параметрами, осуществляется компьютерное математическое моделирование влияния нагрева элементов на деформацию конструкции. При этом для минимизации углов отклонения световых лучей от заданных требований, исследуются различные варианты построения конструкции.

Приведенные в работе расчеты показали, что температура задней стенки для данного варианта конструкции и выбранных радиаторов при температуре окружающей среды равной  $-40$  и  $70$  °C составляет  $-22$  и  $94$  °C соответственно.

Воздействие температуры окружающей среды будет приходиться на всю поверхность конструкции, в то время как отводимое тепло от радиаторов светодиодных модулей оказывает влияние лишь на заднюю стенку ОСП. Очевидно, что из-за большего нагрева задней стенки конструкции световые лучи будут менять свой угол наклона в сторону центрального луча, поскольку конструкция ОСП крепится к основанию в центральной своей части.

С целью оценки устойчивости к заданному воздействию необходимо для каждого светового модуля назначить две контрольные точки, привязанные к конструкции ОСП, так, чтобы через них можно было провести линию, соответствующую направлению светового луча (рис. 4).

В результате температурного воздействия в стойке ОСП наблюдается перемещение  $H$ , которое приводит к смещению светового луча.

Угол отклонения светового луча (синяя линия на рис. 4) рассчитаем как

$$\alpha = \arctg \frac{H}{L} \text{ и, соответственно: } \alpha' = \alpha * 60.$$



Рис. 4. Смещение светового луча в результате деформации конструкции

При разработке конструкции ОСП необходимо учитывать высокие требования по надежности, которые предъявляются к работе всей системы. Очевидно, что более массивная конструкция будет иметь большую инерционную составляющую. Для устранения этого эффекта и более быстрого выравнивания ОСП в горизонтальное положение во время качки требуется применение мощных и высокоточных приводных систем. Это в свою очередь приводит к большому потреблению энергии, что в условиях дальнего плавания весьма критично.

Учитывая вышеописанную ситуацию, необходимо минимизировать массу конструкции, что позволит применить менее мощные приводные системы. В связи с этим первая итерация анализа конструктивного исполнения проведена для исходного варианта стойки, выполненной из стандартных алюминиевых уголков и профилей (рис. 5).

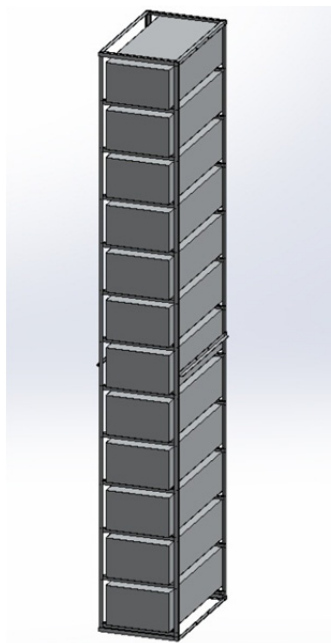


Рис. 5. Конструкция исходного варианта стойки ОСП

Анализ несущей стойки оптической системы с использованием программного комплекса SolidWorks позволил выявить отклонения. Наибольшие значения получились для верхнего и нижнего фонаря при минимальной температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , которые составили 2,31 угл. мин и 2,07 соответственно (рис. 6,а). При температуре  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  отклонения угла наклона для верхнего и нижнего фонаря получились 1,65 и 1,47 соответственно (рис. 6,б).

Анализ результатов моделирования позволил определить температурные режимы, которым соответствуют максимальные перемещения при различных видах воздействий, наблюдаемые для верхнего светового модуля. Значения температур, соответствующие им перемещения и рассчитанные отклонения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Угол отклонения светового луча для исходной конструкции ОСП

| Температура среды, $^{\circ}\text{C}$ | Температура радиатора, $^{\circ}\text{C}$ | Перемещение, мм | Отклонение, угл. мин, $\alpha'$ |
|---------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------|---------------------------------|
| -40                                   | -22                                       | 0,273           | 2,31                            |
| 70                                    | 94                                        | 0,218           | 1,65                            |

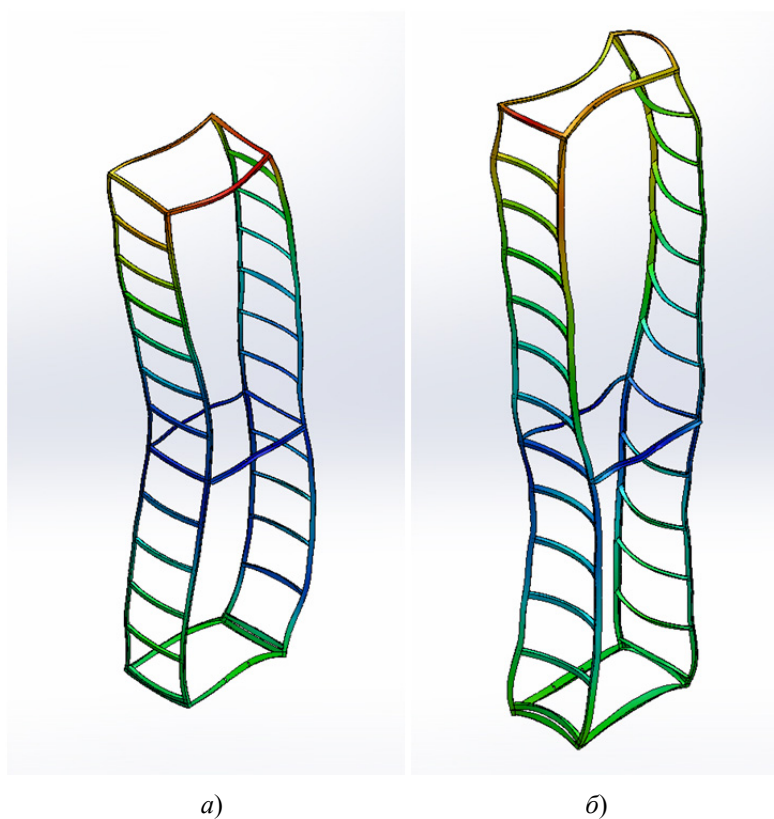


Рис. 6. Деформация исходной конструкции ОСП под воздействием температур:  
а –  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б –  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Как видно на рис. 6 и табл. 1, рассматриваемая конструкция при воздействии максимально низких и высоких температур приводит к отклонению светового луча фонаря в обоих случаях. Отклонение луча должно составлять не более одной угловой минуты. Отклонения, полученные при  $-40$  и  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , превышают допустимое значение на 1,31 и 0,65 угл. мин соответственно (табл. 1). Отсюда следует, что предложенный вариант не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к конструкции.

С целью повышения устойчивости были проведены дополнительные доработки конструкции, в результате которых получен вариант со стальным профилем для задней стенки конструкции ОСП.

Для данного варианта конструкции также были получены отклонения при температурах  $-40$  и  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Результаты расчета максимального угла отклонений светового луча для двух типов воздействий приведены в табл. 2.

Таблица 2

Угол отклонения светового луча для конструкции ОСП со сплошными стенками

| Температура среды, °С | Температура радиатора, °С | Перемещение, мм | Отклонение, угл. мин, $\alpha'$ |
|-----------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------------|
| –40                   | –22                       | 0,084           | 0,81                            |
| 70                    | 94                        | 0,071           | 0,77                            |

Таким образом, в результате проведенных численных исследований методами математического моделирования было предложено конструктивное исполнение стойки оптической системы посадки. Максимальный угол отклонения светового луча при термическом воздействии при температуре радиаторов 95 °С составляет 0,81 и 0,77 угл. мин для –40 и 70 °С соответственно. Полученные отклонения удовлетворяют требованиям, предъявляемым к работе данной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00414).

### Список литературы

1. Шолков, Е. О том, что превращает палубу в ВПП. Взлетно-посадочные системы авианосцев / Е. Шолков, В. Друшляков // Авианорама. – 2016. – № 1. – С. 25–32.
2. Оптическая Система посадки. – URL: [http://ru.encydia.com/en/Оптическая\\_Система\\_посадки/](http://ru.encydia.com/en/Оптическая_Система_посадки/)
3. Температурный коэффициент линейного расширения. – URL: <http://temperatures.ru/>
4. Зубченко, А. С. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – С. 585–784.
5. Новости Военно-Промышленного Комплекса России и других стран мира. – URL: <http://vpk.name>
6. Aviation Explorer. – URL: <http://www.aex.ru/>
7. Юрков, Н. К. Риски отказов сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1(5). – С. 18–24.
8. Белова, В. В. Моделирование надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата на этапе электрических испытаний / В. В. Белова // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 31–40.

#### Теличкань Виталий Сергеевич

аспирант,  
Сургутский государственный университет  
(628412, Россия, г. Сургут, проспект Ленина, 1)  
E-mail: [katulev@mail.ru](mailto:katulev@mail.ru)

#### Увайсов Сайгид Увайсович

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой радиоэлектроники  
и телекоммуникаций,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
«Высшая школа экономики»  
(123458, Россия, г. Москва, ул. Таллинская, 34)  
E-mail: [uvaysov@yandex.ru](mailto:uvaysov@yandex.ru)

#### Иванов Илья Александрович

кандидат технических наук, старший преподаватель,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»  
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, 20)  
E-mail: [i.ivanov@hse.ru](mailto:i.ivanov@hse.ru)

#### Лышов Сергей Максимович

аспирант,  
Сургутский государственный университет  
(628412, Россия, г. Сургут, проспект Ленина, 1)  
E-mail: [dmx\\_101@mail.ru](mailto:dmx_101@mail.ru)

#### Telichkan' Vitalij Sergeevich

postgraduate student,  
Surgut State University  
(628412, 1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

#### Uvaysov Saygid Uvaysovich

doctor of technical sciences, professor,  
head of department of radioelectronics  
and telecommunications,  
Moscow State Institute of Electronics and Mathematics  
of National Research University  
"High School of Economics"  
(123458, 34 Tallinskaya street, Moscow, Russia)

#### Ivanov Il'ya Aleksandrovich

candidate of technical sciences, senior lecturer,  
National Research University  
"High School of Economics"  
(101000, 20 Myasnitskaya street, Moscow, Russia)

#### Lyshov Sergey Maksimovich

postgraduate student,  
Surgut State University  
(628412, 1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию влияния температурных факторов на работу оптической системы посадки самолета на палубу корабля. Определены температурные режимы работы конструкции системы и особенности их воздействия. Рассчитаны параметры отклонения конструкции в заданном диапазоне температур. Проведено компьютерное моделирование различных вариантов конструкции с использованием программного комплекса Solid Works. На основе численных экспериментов предложен вариант конструктивного исполнения оптической системы посадки, удовлетворяющий требованиям условий эксплуатации.

**Ключевые слова:** воздействие температуры на конструкцию, деформация конструкции, методика проектирования.

**Abstract.** The work deals with the influence of temperature factors to work optical landing system on the deck of the ship. Temperature regimes of construction system and features impact of are identified. Effects of sound pressure characteristics are calculated in a predetermined range. A computer simulation of various construction options are conducted with using software Solid Works. On the basis of numerical experiments proposed variant of constructional fulfillment of optical landing system that meets the requirements of operating conditions.

**Key words:** effect of temperature on construct, deformation of construct, design methodology.

**УДК 628.931**

**Оценка отклонения светового луча оптической системы посадки самолета под воздействием температурного фактора** / В. С. Теличань, С. У. Увайсов, И. А. Иванов, С. М. Лышов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 15–21. DOI 10.21685/2307-4205-2016-3-3.