

УДК 629.7.036.3:658.562-614

Н.А. ГАЧЕГОВ, А.А. ЛОПАТИН, А.О. КОСТЕНКО, В.Т. ШЕПЕЛЬ

ОАО «НПО «Сатурн», Пермь – Рыбинск, Россия

## СЕРТИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ АВИАЦИОННОГО ГТД НА ТРЕБОВАНИЯ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ

*Изложены особенности сертификации оборудования, агрегатов и других компонентов авиационного ГТД с помощью математического моделирования на основе построения модели первого уровня с ее верификацией на основе инженерных испытаний, проведенных для самых консервативных условий, и последующим уточнением граничных условий для модели второго уровня. Подробно рассмотрена методика установления соответствия требованиям пожаробезопасности на примере сертификации сигнализатора засорения масляного фильтра. Представленная методика учитывает требования АП-33, CS-E, FAR-33.*

**Ключевые слова:** сертификация, пожаробезопасность, сигнализатор засорения масляного фильтра, расчетный анализ, тепловая модель.

### Введение

Сертификация авиационного двигателя является системой обеспечения безопасности, регламентируемой национальными, в частности, Российскими, Европейскими и Американскими нормами летной годности АП-33, CS-E, FAR-33 [1 – 3]. К эксплуатации допускаются двигатели, отвечающие государственным требованиям к летной годности и охраны окружающей среды. Одним из важных требований норм летной годности авиационного двигателя является требования в части пожаробезопасности.

Сертификация оборудования предусматривает его соответствие требованиям противопожарной защиты, изложенным в пунктах АП 33.17, CS-E 130 и FAR 33.17 норм летной годности и документе [4], распространяющимся на оборудование. Указанные нормы и стандарт требуют минимизировать вероятность возникновения и распространения пожара.

Естественно, основным методом установления соответствия требованиям противопожарной защиты являются сертификационные огневые испытания на огнестойкость и огнестойкость [5], однако они являются дорогостоящими и длительными по времени. Перспективным для установления соответствия требованиям пожаробезопасности, является метод, базирующийся на расчетном анализе.

Целью данной статьи является разработка методики демонстрации соответствия требованиям пожаробезопасности оборудования авиационного ГТД расчетным анализом на примере сертификации сигнализатора засорения масляного фильтра.

### 1. Экспериментальная часть

Решение поставленной задачи возможно на основе построения тепловой модели первого уровня с последующей верификацией на основе инженерных испытаний, проведенных для самых консервативных условий, и последующим уточнением граничных условий по теплообмену для модели второго уровня, используемой далее для установления соответствия в процессе сертификации.

Для построения модели теплового состояния первого уровня использовались результаты инженерных испытаний сборки, «сигнализатор засорения - имитатор маслоагрегата». Инженерным огневым испытаниям подвергался серийный сигнализатор засорения маслофильтра, устанавливаемый не на маслоагрегате, а на технологический блок (имитатор, рис. 1). Имитатор маслоагрегата представлял собой стальной цилиндр, к которому подводилось масло с заданным перепадом давления. На рис. 1 представлена схема препарации сигнализатора засорения маслофильтра и имитатора 11-ю хромель-алюмелевыми термопарами КТХА (4 термопары на сигнализаторе засорения и 7 - на имитаторе маслоагрегата). Дополнительно температура сигнализатора и имитатора регистрировалась с помощью термоиндикаторной краски. Испытания проводились по требованиям ISO 2685:1998 [4] на стенде Г17-Ц3 ЦИАМ.

При испытаниях сборка подвергалась пятиминутному тепловому воздействию для условий, характерных максимальному перепаду давлений на маслофильтре на режиме максимальной мощности,

и десятиминутному с минимальным перепадом давлений на маслофилт্রে на режиме авторотации.

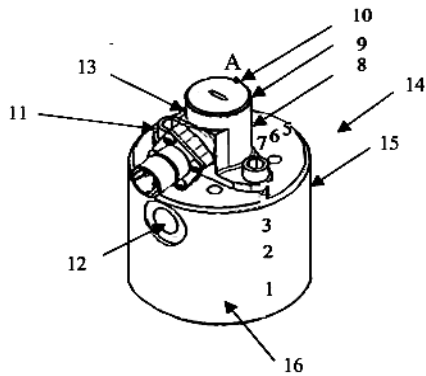


Рис. 1. Подготовка сигнализатора и имитатора: 1 - 11 – термопары; 12, 15 – подвод масла под высоким и низким давлением, соответственно; 13 – сигнализатор засорения маслофилт্রে; 14 – направление пламени; 16 – имитатор маслоагрегата

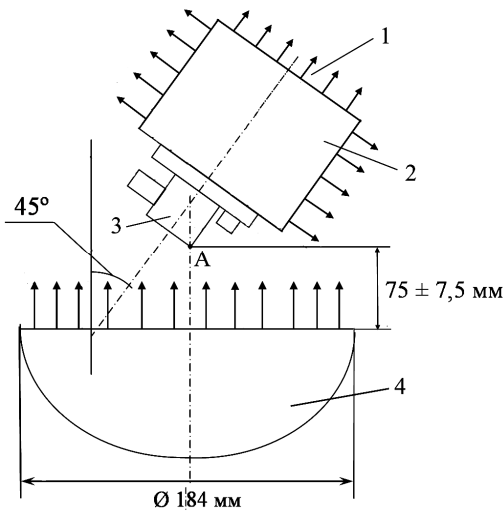


Рис. 2. Расчетная схема для тепловой модели первого уровня «сигнализатор – имитатор маслоагрегата»:

- 1 – рассеивание тепла от имитатора в окружающую среду; 2 - имитатор; 3 – сигнализатор засорения; 4 – горелка

## 2. Построение математической модели

Тепловое состояние деталей сборки определялось конвективным и контактным теплообменом по методу конечных элементов в пространственной (3D) постановке. На поверхности теплообмена задавались граничные условия 3-го рода - температура среды и коэффициенты теплоотдачи среды  $\alpha$  (в данном случае со стороны пламени), характеризующие интенсивность конвективного теплообмена.

Коэффициенты теплоотдачи от потока горячего газа к наружным элементам поверхности сборки

«сигнализатор-имитатор» определялись по уравнению [6]:

$$\alpha_{\Gamma} = c \cdot \frac{\lambda_{\Gamma} \cdot Pr_{\Gamma}^{0,35}}{d_{\text{экв}}^m} \left( \frac{w_{\Gamma}}{\nu_{\Gamma}} \right)^{1-m}, \quad (1)$$

где  $c$ ,  $m$  - коэффициенты, зависящие от формы обтекаемого тела и критерия Рейнольдса соответственно;  $\lambda_{\Gamma}$  - коэффициент теплопроводности газа;  $Pr_{\Gamma}$  - критерий Прандтля;  $d_{\text{экв}}$  - эквивалентный диаметр обтекаемого тела;  $w_{\Gamma}$  - скорость потока пламени;  $\nu_{\Gamma}$  - кинематическая вязкость пламени.

3D конечно-элементная модель испытательной сборки, представленная на рис. 3, построена в программном комплексе ANSYS 11.0. Для построения конечно-элементной модели используются элементы типа SOLID70, SOLID90. Контакты между деталями моделируются с помощью элементов CONTA174, TARGET170. Количество узлов сетки – 90375, количество элементов – 73419.

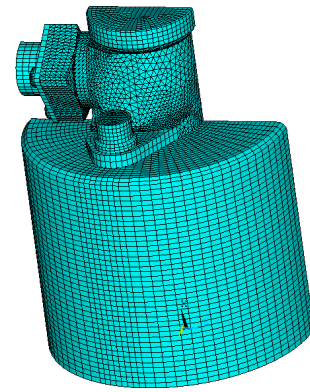


Рис. 3. Конечно-элементная модель сборки «сигнализатор-имитатор» испытательной установки

Создание расчетной модели для проведения теплового расчета заключается в приложении граничных условий к компонентам в ANSYS. Компоненты, представляют собой, поверхности к которым прикладываются граничные условия теплообмена для решения тепловой задачи. Компоненты задаются в виде узлов.

Тепловой расчет проводился в 3D нестационарной постановке, в интерактивном режиме, с использованием программного комплекса ANSYS 11.0. Расчет выполнен в следующей постановке: прогрев из холодного стационарного состояния в течение 15 минут при мгновенном приложении граничных условий теплообмена.

Исходные данные для расчета:

Расход масла - 0 л/ч. Диаметр горелки – 184 мм. Расстояние от горелки до наиболее критической точки сигнализатора А (рис. 2) - 75 мм. Температура пламени - 1180°C, плотность теплового потока - 126 кВт/м<sup>2</sup>.

Идентификация расчетной модели осуществлялась путем корректировки коэффициентов теплоотдачи среды.

Расчетное тепловое состояние сигнализатора засорения маслофильтра представлено на рис. 4.

В табл. 1 проведено сравнение эксперимен-

тальных и расчетных значений для каждой из термопар и диапазон температур, регистрируемых термоиндикаторной краской. Как видно из табл. 1, расчетные значения температур удовлетворительно согласуются с экспериментально замеренными значениями.

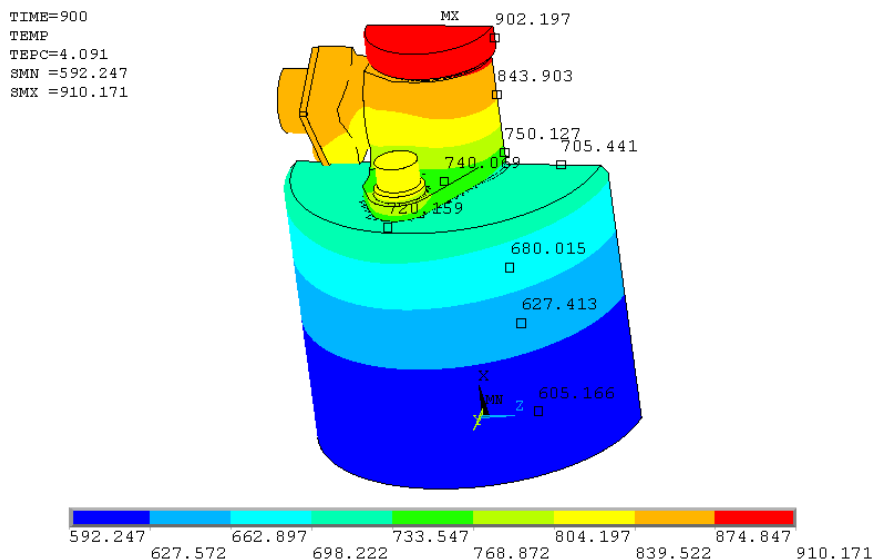


Рис. 4. Расчетная температура сборки «сигнализатор - имитатор»

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и расчетных значений

Номер термопары	Диапазон температур по показаниям термоиндикаторной краски, °C	Экспериментальные значения температуры, °C	Расчетные значения температуры, °C
1	(558-583)	620	605
2	(558-583)	635	627
3	(583-681)	675	680
4	(583-681)	720	720
5	(583-681)	700	708
6	(583-681)	700	705
7	(583-681)	700	707
8	(683-753)	750	750
9	(753-888)	850	844
10	(753-888)	900	902
11	(753-888)	725	740

При инженерных огневых испытаниях сборки «сигнализатор - имитатор» максимальная температура достигает 902 °C в точке А (рис. 1, термопара 10, табл. 1), максимальная температура стыка фланца сигнализатора с имитатором достигает 720 °C (термопара 4, табл. 1).

При сертификации сигнализатора использовалась более сложная модель второго уровня для определения теплового состояния сборки «сигнализатор – элемент маслоагрегата». Расчетная схема для

данного случая представлена на рис. 5. В этом случае можно ожидать более низкую температуру в районе контакта «металл - металл» (фланец с маслоагрегатом), обеспечивающего герметичность, что является требованием пункта CS-E 130 (с), поскольку маслоагрегат охлаждается циркулирующим маслом в процессе огневого воздействия.

Для данного случая конечно-элементная модель сборки «сигнализатор – маслоагрегат», представленная на рис. 6 (количество узлов сетки –

109287, количество элементов – 79576), создана на базе модели имитатора маслоагрегата путем среза части имитатора до толщины 4 мм для моделирования минимальной толщины корпуса маслоагрегата и заменой свойств материала корпуса маслоагрегата со стали на алюминиевый сплав. Такое допущение приемлемо, поскольку не меняет граничных условий со стороны пламени. В тепловой модели добавлены узловые компоненты для приложения граничных условий со стороны охлаждающей среды (масла).

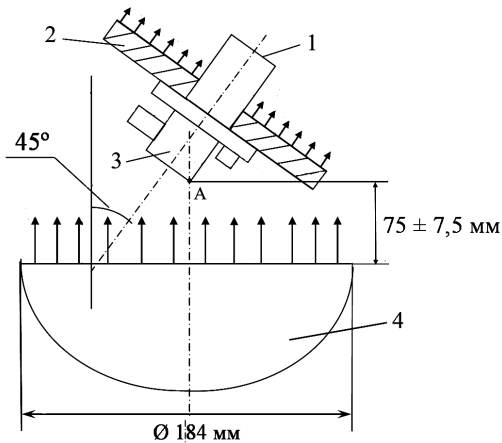


Рис. 5. Расчетная схема «сигнализатор – маслоагрегат»:  
1 - охлаждение маслом;  
2 – элемент корпуса маслоагрегата;  
3 – сигнализатор; 4 – горелка

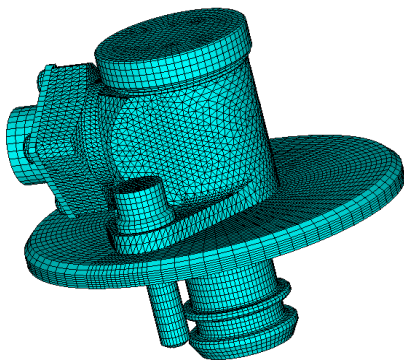


Рис. 6. Конечно-элементная модель сборки «сигнализатор – маслоагрегат»

Граничные условия теплообмена для определения теплового состояния сигнализатора, установленного на маслоагрегате, со стороны пламени соответствуют принятым на сборке «сигнализатор – имитатор». Коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности корпуса маслоагрегата к маслу определялась по критериальным зависимостям [6]:

– на режиме полетного малого газа

$$Nu_{cp} = 0,035 \cdot Pr^{0,33} \cdot Re^{0,8}, \quad (2)$$

– на режиме авторотации

$$Nu_{cp} = 0,67 \cdot Pr^{0,33} \cdot Re^{0,5}, \quad (3)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта;  $Pr$  – критерий Прандтля;  $Re$  – критерий Рейнольдса.

Граничные условия со стороны масла прикладываются только к внутренней стороне выделенного элемента маслоагрегата. К винтам граничные условия со стороны масла не прикладывались. Температура циркулирующего масла принималась равной 150 °С.

В отличие от модели имитатора граничные условия несколько видоизменялись. В данном случае вместо режима максимальной мощности, соответствующей максимальному давлению, использовался режим полетного малого газа, поскольку доминирующим фактором в данном случае являлся расход циркулирующего через маслоагрегат масла. Этот случай соответствует консервативному выбору режимов испытаний.

Расчет выполнялся для нестационарного теплового состояния стыка: прогрев из холодного состояния в течение 5 минут с параметрами характерными для режима полетный малый газ и 10 минут с параметрами режима авторотации. Результаты расчета представлены на рис. 7.

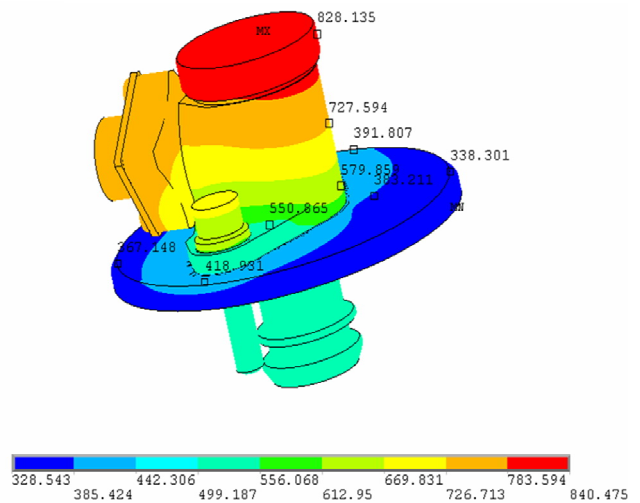


Рис. 7. Расчетная температура сборки «сигнализатор – маслоагрегат»

## Заключение

При огневых испытаниях маслоагрегата в сходных условиях с циркуляцией масла максимальная температура корпуса в районе фланца крепления сигнализатора засорения маслофильтра не превышала 530 °С. Данная температура достаточно хорошо согласуется с расчетной температурой корпуса маслоагрегата в зоне болтового соединения, которая не превышает 500 °С, что демонстрирует удовле-

творительную корректность построенной тепловой модели.

Тепловое состояние для расчета сохранения герметичности схемы «сигнализатор - имитатор» является более консервативным по сравнению с расчетом схемы «сигнализатор – маслоагрегат», поскольку температура в зоне стыка в первом случае превышает 700 °С, а во втором случае – не выше 500 °С.

Таким образом, представленная методика оценки соответствия требованиям пожаробезопасности, охватывающая требования АП-33, CS-E и FAR-33, успешно использована в практике сертификации сигнализатора засорения масляного фильтра SaM 146.

## Литература

1. *Авиационные правила, часть 33 (АП-33). Нормы летной годности двигателей воздушных судов. – Межгосударственный авиационный комитет (МАК). – 2004.*
2. *Certification Specifications for Engines (CS-E). European Aviation Safety Agency (EASA), 2007.*
3. *Federal Airworthiness Regulations (FAR-33). – 2007.*
4. *EUROCAE ED-14D/RTCA DO-160D, 2007.*
5. *ISO 2685:1998 Aircraft – Environmental test procedure for airborne equipment – Resistance to fire in designated fire zones, 1998.*
6. *Кутателадзе С.С. Справочник по теплотеплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боршианский. – Л.-М.: Госэнергоиздат, 1959. – 423 с.*

Поступила в редакцию 12.05.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. кафедры «Сопротивление материалов» С.А. Букатый, Рыбинская государственная авиационная технологическая академия, Рыбинск, Россия.

## СЕРТИФІКАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ АВІАЦІЙНОГО ГТД НА ВИМОГИ ПОЖЕЖОБЕЗПЕКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОВИХ МОДЕЛІВ

*М.А. Гачегов, А.А. Лопатін, Г.О. Костенко, В.Т. Шепель*

Викладено особливості сертифікації обладнання, агрегатів та інших складових авіаційних ГТД за допомогою математичного моделювання на основі будівництва моделі першого рівня з її верифікацією на основі інженерних випробувань, здійснених для найбільш консервативних умов та наступним уточненням крайових умов для моделей другого рівня. Докладно роздивляється методика встановлення відповідності вимогам пожежобезпеки на прикладі сертифікації сигналізатора засмічення масляного фільтру. Подана методика ураховує вимочи АП-33, CS-E та FAR-33.

**Ключеві слова:** сертифікація, пожежобезпека, сигналізатор засмічення масляного фільтру, розрахунковий аналіз, теплова модель.

## CERTIFICATION OF THE EQUIPMENT AVIATIONS ENGINES ON REQUIREMENTS FIRE SAFETY WITH USE OF THERMALS MODELS

*N.A. Gachegov, A.A. Lopatin, A.O. Kostenko, V.T. Shepel*

Features of equipment, units and other aviation engine components certification by means of mathematical model which based on first level model construction with its verification on engineering tests basis which have been performed with the most conservative conditions and which the following boundary conditions correction for second level model are presented in the article. Conformity determination method to fire safety requirements based in example of Sensor Oil Clogging certification presented in the article in details. Presented method takes into account AP-33, CS-E and FAR-33.

**Key words:** certification, fire safety, sensor oil clogging, calculation analysis, thermal model.

**Гачегов Николай Андреевич** – ведущий инженер-конструктор ИЦ ОАО «НПО «Сатурн», Пермь, Россия, e-mail: dushko@pern.npo-saturn.ru.

**Лопатин Андрей Анатольевич** – ведущий инженер ИЦ ОАО «НПО «Сатурн», Пермь, Россия, e-mail: andrey\_lopatin@mail.ru.

**Костенко Анна Олеговна** - инженер-конструктор КО «Исследований и надежности» ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия, e-mail: kostenko.ao@yandex.ru.

**Шепель Вячеслав Тимофеевич** - начальник КО «Сертификация авиационных ГТД и промышленных ГТУ» ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия. e-mail: sshepel@yandex.ru.