

К. В. Качалин, А. О. Костенко, В. Т. Шепель

СЕРТИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ АВИАЦИОННОГО ГТД НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА

В статье рассматривается методика установления соответствия требованиям пожаробезопасности оборудования авиационного ГТД расчетным методом на примере сертификации сигнализатора засорения масляного фильтра. Анализ проведен на основе расчетов по оценке раскрытия стыков сборки «сигнализатор – имитатор», «сигнализатор-маслоагрегат», выполненных с помощью конечно-элементной модели в упругой постановке, при тепловом воздействии, представительном для условий пожара. Подтверждено успешное применение методики при сертификации. *Оборудование авиационного двигателя; сертификация; огневые испытания; сигнализатор засорения масляного фильтра*

Сертификация авиационного двигателя является системой обеспечения безопасности, регламентируемой национальными, в частности, Российскими, Европейскими и Американскими нормами летной годности AP-33, CS-E, FAR-33 [1–3] соответственно. Обеспечение безопасности достигается путем допуска в эксплуатацию двигателей, отвечающих государственным требованиям к летной годности и охраны окружающей среды. Одним из важных требований норм летной годности авиационного двигателя является требование в части пожаробезопасности, поскольку пожар классифицируется в соответствии с пунктами AP-33.75, CS-E 510, FAR 33.75 как отказ с опасными последствиями. Оборудование, агрегаты и другие компоненты двигателя должны удовлетворять требованиям противопожарной защиты, изложенным в пунктах AP 33.17, CS-E 130 и FAR 33.17 норм летной годности, которые дополняются специальным стандартом [4]. Указанные нормы и стандарт требуют минимизировать вероятность возникновения и распространения пожара даже при наличии других отказов двигателя.

Методы установления соответствия требованиям пожаробезопасности могут базироваться на сертификационных испытаниях:

- полноразмерного двигателя;
- систем двигателя;
- компонентов двигателя;
- оборудования;
- фрагментов конструкции, моделирующих наиболее уязвимые к пожару зоны двигателя;
- и / или на проведении;
- расчетного анализа;

- сравнительного анализа с конструкцией, которая ранее уже была сертифицирована.

Возможна любая комбинация выше перечисленного.

Естественно, что основным методом установления соответствия являются сертификационные огневые испытания на огнестойкость и огненепроницаемость [4]. Огнестойкость – это способность компонентов двигателя выдерживать пламя с температурой 1100 ± 80 °С при выполнении своих функций, как минимум, в течение 5 минут, а огненепроницаемость – способность при указанной температуре выдерживать пламя, как минимум, в течение 15 минут.

Перспективным для установления соответствия требованиям пожаробезопасности среди вышеперечисленных методов является метод, базирующийся на расчетном анализе. Целью данной статьи является разработка методики демонстрации соответствия требованиям пожаробезопасности оборудования авиационного ГТД расчетным методом на примере сертификации сигнализатора засорения масляного фильтра.

Если установление соответствия требованиям пожаробезопасности проводится путем расчетного анализа, то необходимо на основе инженерных испытаний показать адекватность модели, описывающей поведение объекта сертификации при тепловом воздействии, представительном для условий пожара. В ряде случаев такую модель можно построить по результатам инженерных испытаний, если объект должным образом препарирован.

Объектом сертификации являлся сигнализатор засорения маслофильтра (рис. 1, а).

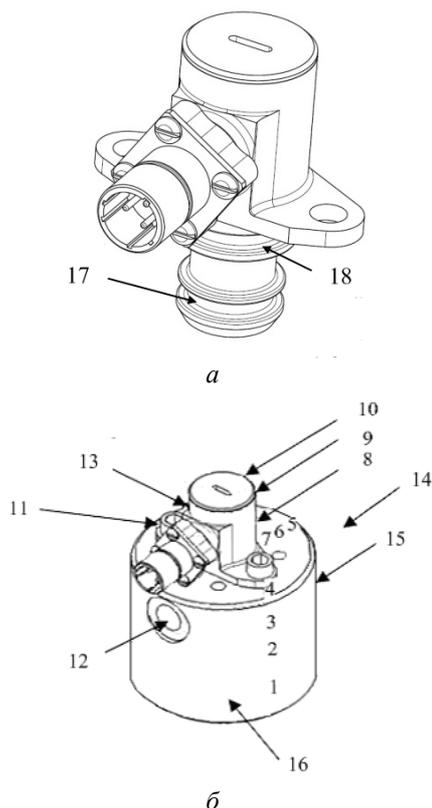


Рис. 1. Сигнализатор засорения маслофильтра (а), сборка «сигнализатор засорения – имитатор маслоагрегата» (б): 1–11 – термопары; 12 – подвод высокого давления; 13 – сигнализатор засорения маслофильтра; 14 – направление пламени; 15 – подвод низкого давления; 16 – имитатор маслоагрегата; 17 – канавка под нижнее уплотнительное кольцо; 18 – канавка под верхнее уплотнительное кольцо

Сигнализатор крепится к корпусу маслоагрегата двумя стальными болтами с затяжкой 13 Н·м. Нарушение требований пожаробезопасности по пункту CS-E 130(с) может произойти при одновременном выполнении двух событий: разрушение верхнего уплотнительного кольца и одновременное раскрытие стыка фланца корпуса сигнализатора и маслоагрегата. Разрушение нижнего уплотнительного кольца не может повлиять на результат, поскольку в этом случае магистраль высокого давления будет соединена с магистралью низкого давления. Таким образом, с помощью математической модели необходимо оценить, произойдет ли раскрытие стыка сигнализатора с маслоагрегатом. Для построения валидированной модели теплового состояния использовались инженерные испытания сборки «сигнализатор засорения – имитатор маслоагрегата» (рис. 1, б).

Для построения математической модели теплового состояния использовались результаты инженерных испытаний, выполненных на имитаторе маслоагрегата, представляющего собой стальной цилиндр (рис. 1, б), на котором устанавливался сигнализатор засорения, и подводилось давление масла с заданным перепадом. Огневые испытания проводились на стенде Г17-Ц3 ЦИАМ при выполнении всех требования ISO 2685 [4]. На рис. 1, б представлена схема подготовки сигнализатора засорения маслофильтра и имитатора 11-ю хромель-алюмелевыми термопарами КТХА (4 термопары на сигнализаторе засорения и 7 на имитаторе маслоагрегата) с погрешностью измерения равной $\pm 1\%$. Дополнительно, температура сигнализатора и имитатора регистрировалась с помощью термоиндикаторной краски. В табл. 1 проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений для каждой из термопар.

Для расчета теплового состояния использовался метод конечно-элементного анализа. Граничными условиями для определения теплового состояния стыков являются коэффициенты теплоотдачи α со стороны пламени и от имитатора в окружающую среду.

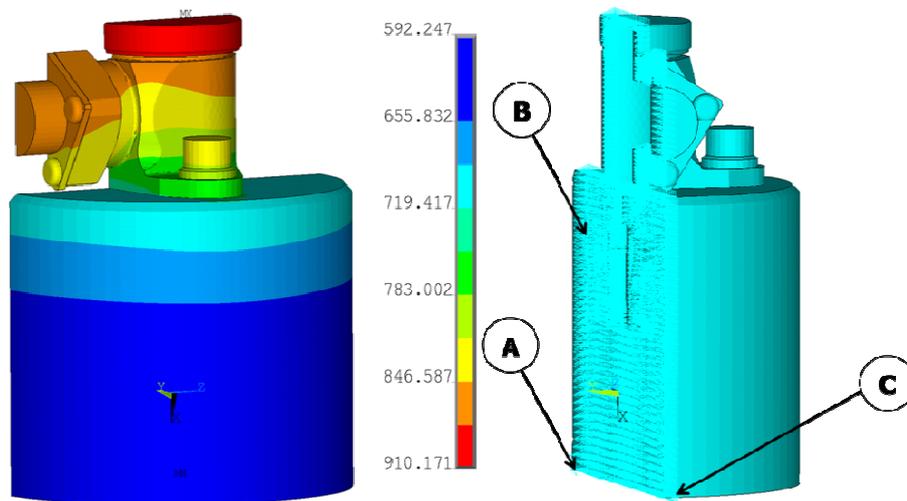
Суммарное время огневого воздействия на сборку «сигнализатор–имитатор» задавалось равным 15 минут, из которых 5 минут для условий максимального перепада давления, на режиме максимальной мощности и 10 минут при минимальном перепаде давления на режиме авторотации. К допущениям расчетной схемы можно принять, что подводимое к сигнализатору высокое (3.44 бар) и низкое (1.24 бар) давления не оказывают влияния на раскрытие стыка, и в расчете не использовались. Расход масла на обоих режимах – 0 л/ч.

Для приложения граничных условий конечно-элементные модели 3D стыков построены в ANSYS 11.0. При построении конечно-элементной модели использованы 8-узловые гексаэдрические элементы SOLID45, 20-узловые гексаэдрические элементы SOLID95 и 10-узловые тетраэдрические элементы SOLID92. Тетраэдрические элементы использованы в местах со сложной топологией, требующих высоких затрат при построении регулярной сетки.

Взаимодействие между деталями моделируется с помощью контактных элементов типа «поверхность – поверхность»: CONTA170 и TARGET174. Коэффициент трения между деталями задавался равным 0,15.

Таблица 1

Номер термомпары	Диапазон температур по показаниям термоиндикаторной краски, °С	Экспериментальные значения температуры, °С	Расчетные значения температуры, °С
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



A	Запрет на перемещения по всем направлениям в одном узле
B	Запрет на перемещения в окружном направлении
C	Запрет на перемещения вдоль оси X

*a**б*

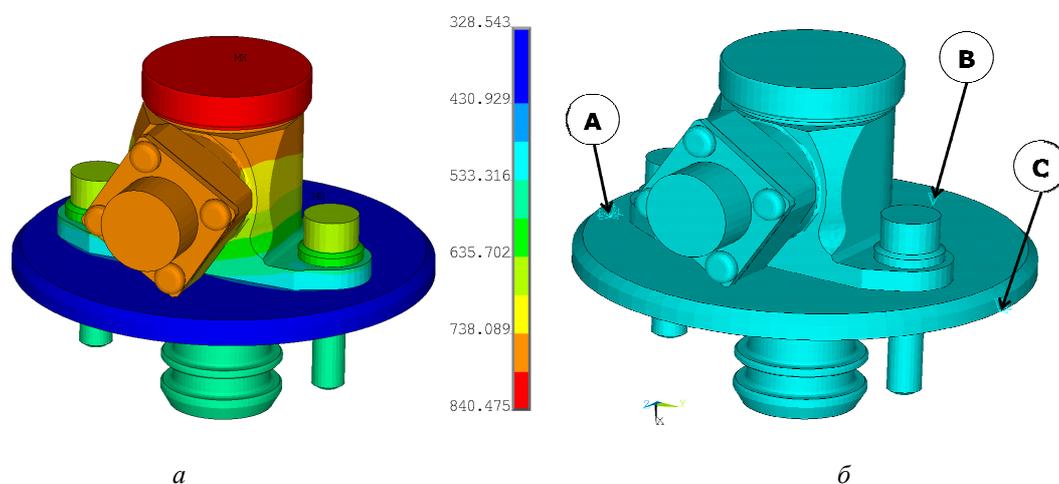
Рис. 2. Тепловое состояние в процессе огневых испытаний (*a*) и граничные условия в виде запрета на перемещения (*б*)

На рис. 2, *a* представлено тепловое состояние сборки «сигнализатор–имитатор» в процессе огневых испытаний и граничные условия для прочностной модели оценки герметичности, в виде запрета на перемещения по всем направлениям в одном узле и в окружном направлении (рис. 2, *б*). Тепловые расчеты проводились в 3D нестационарной постановке, в интерактивном режиме.

Результаты прочностных расчетов по оценке раскрытия стыков сборки «сигнализатор – имитатор маслоагрегата», выполненных с помощью конечно-элементной модели в упругой постановке, при тепловом воздействии, представительном для условий пожара, сведены в табл. 2. Расчеты, проводимые методом конечно-элементной модели, показали удовлетворительную сходимость.

Таблица 2

Осевое усилие затяжки	Состояние	Максимальные эквивалентные (по Мизесу) напряжения, МПа	Расчетные характеристики		
			Максимальные контактные давления, МПа	Контактные проникновения (отрицательные значения – зазора), мм	Суммарные осевые усилия, Н
Исх. вариант ($F = 10810,1$ Н)	Исх. состояние	328,09	219,01	0,001386	10811,66
	Условия пожара	334,26	217,07	0,001374	10841,90



A	Запрет перемещений по всем направлениям в одном узле
B	Запрет перемещений по оси x в одном узле
C	Запрет перемещений по оси X и Z

Рис. 3. Тепловое состояние сборки «сигнализатор-элемент маслоагрегата» (а) и схема с запретами на перемещения (б)

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что сигнализатор засорения маслофильтра соответствует требованиям АП 33.17 и CS-E 130, поскольку в случае пожара раскрытие стыка не происходит и, следовательно, герметичность сборки «сигнализатор-имитатор» обеспечивается.

Далее рассмотрим условия сохранения герметичности для сборки «сигнализатор-маслоагрегат» (рис. 3, а). В данном случае в качестве расчетной схемы использовался элемент корпуса, прилегающий к сигнализатору с условиями охлаждения, соответствующими охлаждению корпуса маслоагрегата циркулирующим потоком масла. На рис. 2, а представлено тепловое состояние для сборки «сигнализатор – элемент маслоагрегата» и схема с запретами на перемещения для расчета на герметичность (рис. 3, б).

Результаты расчетов по контактному проникновению (мм) и контактному давлению (МПа) для выделенного элемента маслоагрегата при полном цикле теплового воздействия представлены на рис. 4, а, б.

Деформированное состояние сборки «сигнализатор – элемент маслофильтра» представлено на рис. 5. Недеформированное состояние соединения маслофильтра с элементом корпуса маслоагрегата показано тонкими линиями. Масштаб перемещений равен 10. Результаты прочностных расчетов по оценке раскрытию стыков сборки «сигнализатор – элемент сборки маслоагрегата», выполненных с помощью конечно-элементной модели в упругой постановке, при тепловом воздействии, представителем для условий пожара, сведены в табл. 3.

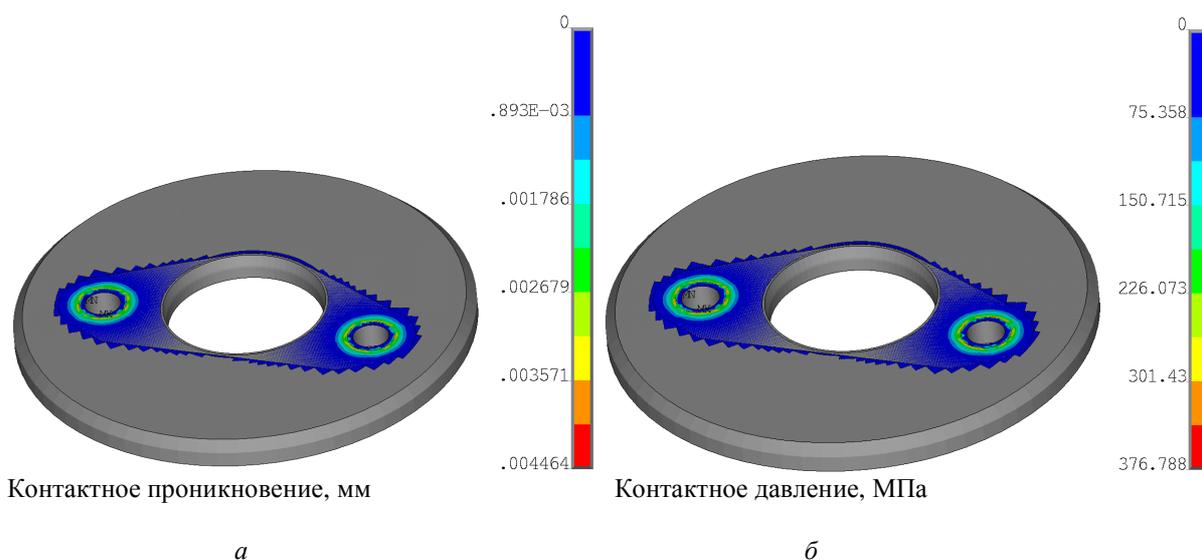


Рис. 4. Контактное проникновение (а) и контактное давление (б) на выделенном элементе маслоагрегата

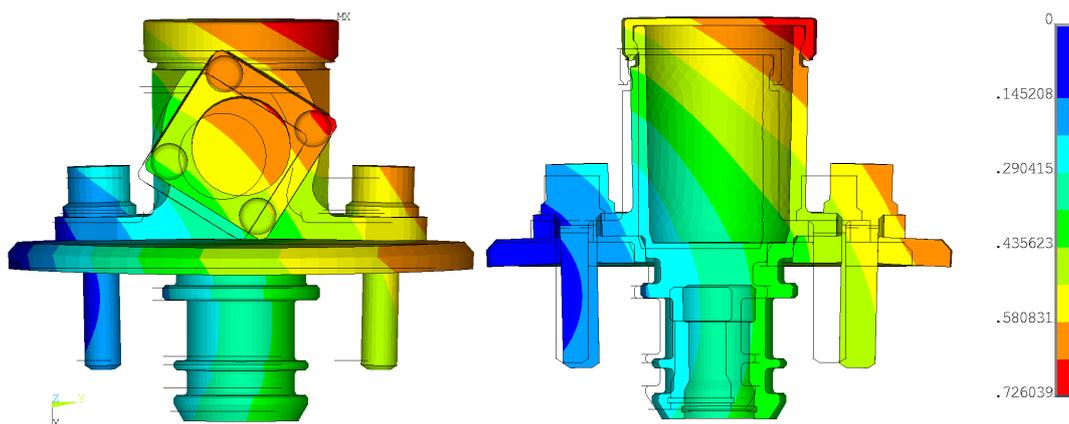


Рис. 5. Картины деформации сборки «сигнализатор – элемент корпуса маслоагрегата»

Таблица 3

Осевое усилие затяжки	Режим	Максимальные эквивалентные (по Мизесу) напряжения, МПа	Расчетные характеристики		
			Максимальные контактные давления, МПа	Контактные проникновения (отрицательные значения - зазора), мм	Суммарные осевые усилия, Н
Исх. вариант (F = 10810,1 Н)	Исх. состояние	405,50	405,53	0,004805	10809,16
	Условия пожара	417,71	376,79	0,004464	10456,14

Из проведенного расчетного анализа можно сделать вывод о том, что на заключительном этапе теплового воздействия представительного для условий пожара, раскрытие стыка фланца сигнализатора засорения маслофильтра с маслоагрегатом не произойдет и, следовательно, утечка воспламеняющейся жидкости в опасном количестве не возникнет, что обеспечивает соответствие пункту CS-E 130 (с). Адекватность расчетной схемы для сборки «сигнализатор – имитатор маслоагрегата» подтверждена инженерными испытаниями, при наиболее консервативных условиях проведения огневых испытаний. Полученные результаты позволят и для другого оборудования авиационного ГТД, количество которого достигает от 50 до 60 единиц, и переносащего воспламеняющие жидкости или к которому эти жидкости подводятся, корректно задавать граничные условия по теплообмену и прочностным расчетам для условий теплового воздействия, представительного для условий пожара. Данный метод позволил успешно сертифицировать сигнализатор засорения масляного фильтра двигателя SaM 146.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные правила. Ч. 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. **Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.** Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 417 с.

7. **Кутателадзе С. С., Боришанский В. М.** Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат.-Л.М., 1959. 423 с.

ОБ АВТОРАХ

Качалин Константин Викторович, инженер НПО «Сатурн». Дипл. инженер-механик (ППИ, 2009). Иссл. в обл. прочности в двигателестроении.

Костенко Анна Олеговна, инженер НПО «Сатурн». Дипл. инженер-механик (РГАТА, 2008). Иссл. в обл. надежности.

Шепель Вячеслав Тимофеевич, нач. КО «Серт. авиационных двигателей». Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1969). Д-р техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов. Иссл. в обл. летной годности, безопасности авиац. двигателей.