

УДК 629.7.063.017

Применение методов теории планирования эксперимента для оценки безотказности агрегатов топливной системы авиационного двигателя воздушного судна

Завялик И.И.*, Фетисов Е.В., Трофимчук М.В.*****

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия*

*e-mail: zavyalik26@yandex.ru

**e-mail: mr_907@mail.ru

***e-mail: trofim109@mail.ru

Аннотация

В статье с использованием компьютерного моделирования в среде MATLAB Simulink проведен полный факторный эксперимент процесса функционирования агрегата топливной системы авиационного двигателя, в ходе которого выполнена оценка влияния независимых параметров на безотказность агрегата топливной системы воздушного судна. В результате эксперимента получено уравнение регрессии и определены наиболее значимые факторы и их взаимные сочетания, влияющие на параметр отклика.

Ключевые слова: безотказность, авиационное топливо, агрегат, полный факторный эксперимент, топливная система.

Современный авиационный двигатель (АД) представляет собой сложную динамическую систему с взаимосвязанным влиянием механических, газодинамических, теплофизических и физико-химических процессов, протекающих в его элементах, узлах и агрегатах систем двигателя. Безотказность и технический ресурс топливной системы (ТС) является одной из главных составляющих надежности любого воздушного судна (ВС), так как эта система обеспечивает работу АД при любых возможных эволюциях и перегрузках самолета[1,2,3].

Вопросы, связанные с исследованием процесса функционирования ТС АД, состоят в решении двух основных взаимосвязанных задач – оценки (анализа) и обеспечения (синтеза) требуемого уровня безотказности ВС, что достигается с помощью соответствующих математических методов.

Решение данной задачи связано с большими трудностями, так как вероятность безотказной работы агрегатов ТС АД $P(t, \Delta)$ зависит от множества факторов, например: факторы рабочей среды (авиационное топливо), факторы загрязнителя (параметры частиц загрязнения), эксплуатационные факторы (регион и продолжительность эксплуатации ВС), конструктивные факторы (коэффициент эффективности очистки, фильтровооруженность ТС) и другие. Задача усложняется еще и тем, что влияние многих факторов на выходную функцию весьма неоднозначно, и вместе с тем, весьма существенное влияние оказывают их совместное воздействие, парные, тройные и т.п. корреляции.

Существующие способы решения не дают возможности провести точный расчет в аналитическом виде [4,5,6]. Однако если воспользоваться методами экстремального планирования эксперимента, т.е. представить исследуемый объект в качестве «черного ящика», можно с достаточной степенью точности получить зависимость вероятности безотказности работы агрегата ТС АД $P(t,\Delta)$ от воздействующих факторов. С этой целью в работе поставлен и проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ) по центральному композиционному рототабельному плану второго порядка, предложенный Боксом и Уилсоном [7,8]. Предварительно для уменьшения количества экспериментов по методу Плакетта-Бермана [9] было проведено отсеивание малозначимых факторов. Факторы варьировали на двух уровнях. Интервалы варьирования управляемых факторов и их значения в натуральном масштабе представлены в таблице 1.

Таблица 1. Уровни входных факторов и интервалы варьирования

Факторы	Интервал варьирования (Δx_i)	Уровни факторов		
		$x_i = -1$	x_{i0}	$x_i = 1$
Размер частиц загрязнений x_1 , мкм.	5	5	10	15
Коэффициент очистки x_2 .	0,1	0,5	0,6	0,7
Время эксплуатации ВС x_3 , ч.	45	10	55	100

Количество опытов N определяли по количеству факторов k в соответствии с выражением:

$$N = 2^k = 2^3 = 8, \quad (1)$$

При постановке эксперимента с исследованием взаимного влияния трех факторов понадобится проведение 8 экспериментов. При этом кроме парных, будут

учтены и все другие виды корреляций.

Функцией выхода y в данном ПФЭ является вероятность безотказной работы агрегата ТС АД $P(t, \Delta)$, учитывающая изменение качества авиационного топлива в процессе эксплуатации ВС [10]:

$$P(t, \Delta) = P_B(t) \cdot (1 - P_{II}(\Delta)), \quad (2)$$

где $P_B(t)$ – вероятность безотказной работы агрегата ТС АД в период эксплуатации с определенным значением средней наработки на отказ T_{cp} ; $P_{II}(\Delta)$ – вероятность проявления параметрических отказов агрегата ТС АД из-за того, что размер D_4 частиц микрозагрязнений, содержащихся в топливе, превысит размер зазора D_3 прецизионных пар агрегата.

Главным требованием к модели является способность предсказывать направление дальнейших опытов, причем предсказывать с требуемой точностью. При этом сам эксперимент может быть проведен как на реальном объекте, так и на его математической модели [11,12,13]. В теории планирования эксперимента сформулированы требования и условия, которые должны учитываться при выборе зависимых переменных (откликов, выходов, функций цели) и независимых переменных. Зависимая переменная должна быть единственной, однозначной, иметь ясный физический смысл, характеризоваться числом. Таким образом, необходимо с помощью эксперимента, который будет проводиться при неполном знании или незнании механизмов явлений, построить математическую модель, связывающую вероятность безотказной работы агрегатов ТС АД $P(t, \Delta)$ определяемую выражением (2), со всеми переменными (факторами), от которых она зависит.

В соответствии с выбранным планом было выполнено, рандомизировано во времени 8 опытов. Каждый опыт повторялся 3 раза, для этих целей была использована имитационная математическая модель функционирования агрегатов ТС АД с учетом изменения качества авиационного топлива, реализованная в программном продукте MATLAB Simulink [14,15,16].

Математическая модель после реализации опытов ПФЭ имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (3)$$

где y – функция выхода; x_i, x_j, \dots, x_n – управляющие факторы; b_i, b_j, \dots, b_n – коэффициенты регрессии.

Для расчета коэффициентов этой модели была построена расширенная матрица планирования и результатов эксперимента (табл. 2).

Таблица 2. Расширенная матрица плана 2^3 и результатов опыта

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия				Результаты опытов			Среднее результатов \bar{y}_j
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_1	y_2	y_3	
1	+	+	+	+	+	+	+	0,827	0,841	0,843	0,837
2	-	+	+	-	-	+	-	0,787	0,777	0,758	0,774
3	+	-	+	-	+	-	-	0,788	0,825	0,831	0,815
4	-	-	+	+	-	-	+	0,726	0,705	0,682	0,704
5	+	+	-	+	-	-	-	0,845	0,839	0,846	0,843
6	-	+	-	-	+	-	+	0,826	0,823	0,822	0,824
7	+	-	-	-	-	+	+	0,837	0,819	0,84	0,832
8	-	-	-	+	+	+	-	0,82	0,811	0,809	0,813

Впоследствии, изучая полученную полиномиальную модель (3), можно на основании некоторых математических критериев оценки, достаточно четко судить об их адекватности или неадекватности ее реально происходящим процессам.

Подобная модель позволяет говорить о том, сколь велико влияние отдельных факторов на систему, а также их взаимное влияние.

Коэффициенты регрессии рассчитывали по формуле:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j; \quad b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji} \bar{y}_j. \quad (4)$$

В результате реализации двухуровневой трехфакторной модели ПФЭ и определения статистической значимости каждого из 8 коэффициентов [17,18] уравнение регрессии (3) приняло вид:

$$y = 0,889 - 0,007x_1 - 0,113x_2 - 0,004x_3 + 0,014x_1x_2 + \\ + 0,0002x_1x_3 + 0,004x_2x_3 - 0,0002x_1x_2x_3, \quad (5)$$

Проверка воспроизводимости эксперимента определена при помощи критерия Кохрена, а степень значимости коэффициентов, проведенная по критерию Стьюдента с использованием параллельных опытов, показала значимость всех коэффициентов полученного уравнения [17]. При этом гипотеза об адекватности математической модели (5) по критерию Фишера [7] при 5%-ном уровне значимости не отвергается.

Далее получаем графические зависимости влияния варьируемых факторов на вероятность безотказной работы агрегата ТС АД ВС (рис.1).

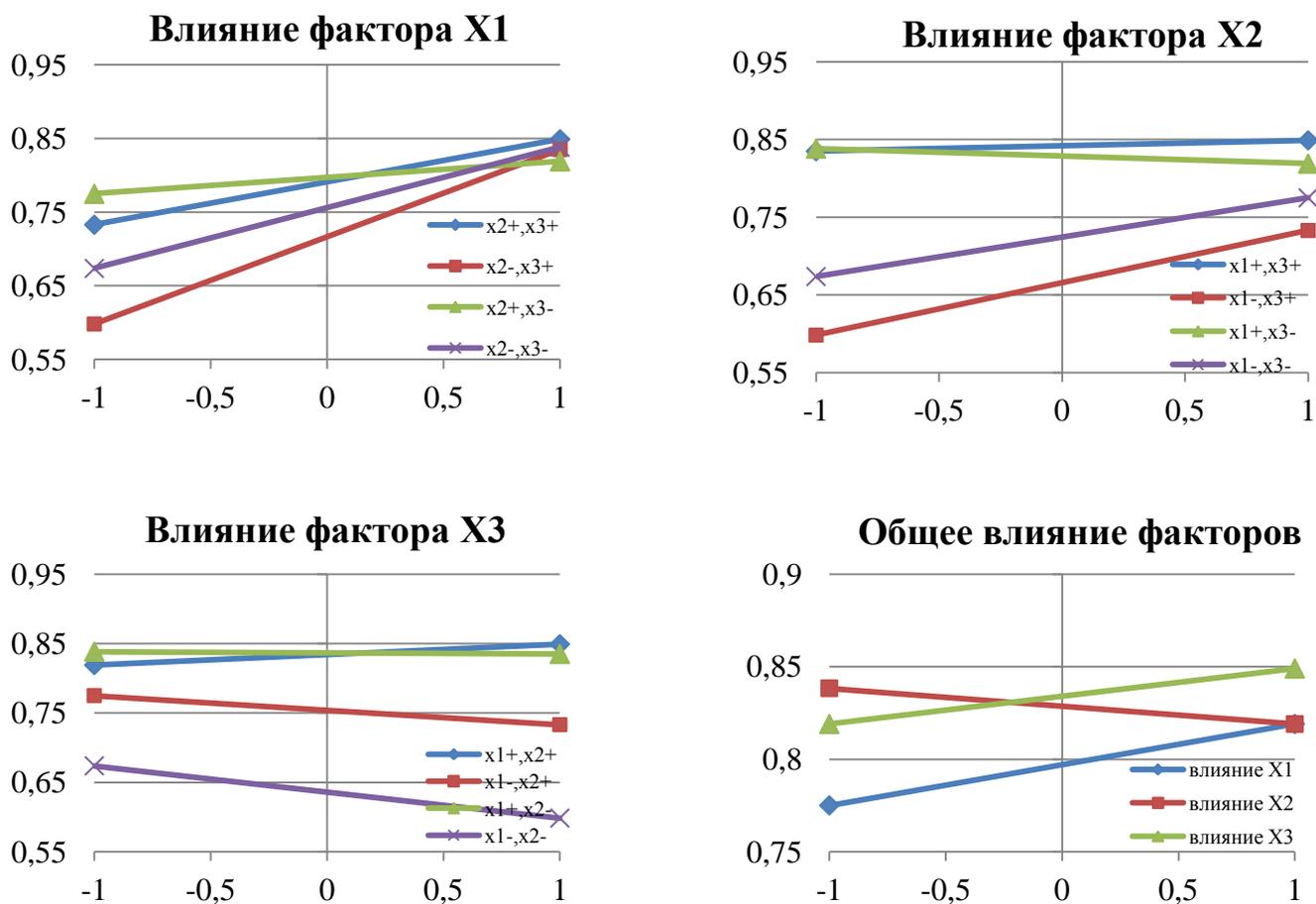


Рис. 1 – Графические зависимости влияния факторов на вероятность безотказной работы агрегата ТС АД ВС

Из представленных выше зависимостей видно, что вероятность безотказной работы агрегата ТС АД $P(t, \Delta)$ возрастает с увеличением размера частиц загрязнений (X_1) и коэффициента очистки авиационного топлива (X_2), что объясняется, во первых взаимодействием частиц загрязнений с поверхностями трущихся деталей прецизионных пар агрегатов топливной автоматики [19], а во вторых тонкостью фильтрации устройств очистки авиационного топлива, применяемых в ТС ВС [20].

В то же время при малых значениях фактора (X_3) вероятность безотказной работы $P(t, \Delta)$ агрегата ТС АД довольно высока, что наблюдается при любых сочетаниях прочих параметров.

Таким образом для повышения вероятности безотказной работы агрегатов и ТС АД в целом возможна разработка мероприятий конструктивного характера направленных на модернизацию подсистем очистки ТС ВС, а также эксплуатационного характера связанных с совершенствованием программы технической эксплуатации ВС [21] .

Библиографический список

1. Халфун Л.М., Попов В.Г., Силуянова М.В. Топливная аппаратура авиационных газотурбинных двигателей. - М.: МАТИ, 2002. - 360 с.
2. Литвинов Ю.А., Боровик В.О. Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных газотурбинных двигателей. - М.: Машиностроение, 1979. – 288 с.
3. Лозовский В.Н. Диагностика авиационных топливных и гидравлических агрегатов. - М.: Транспорт, 1974. – 295 с.
4. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента. – М.: Машиностроение, 1980. - 304 с.
5. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. - М.: Metallургия, 1969. – 287 с.
6. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. – М.: Metallургия, 1981. - 151 с.

7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 282 с.
8. Box G.E.P. Wilson K.B. On the experimental attainment of optimum conditions // Journal of the Royal Statistical Society, 1951, B13, pp. 1 - 38.
9. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов - М.: Мир, 1997. – 278 с.
10. Тимеркеев Р.Г., Сапожников В.М. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1986. - 152 с.
11. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1981. - 520 с.
12. Дмитриев А.К., Марков В.М., Городецкий В.И. Элементы теории испытаний контроля технических систем. - Л.: Энергия, 1978. – 192 с.
13. Клепиков Н.П., Соколов С.Н. Анализ и планирование экспериментов методом максимума подобия. - М.: Наука, 1964. - 164 с.
14. Завялик И.И., Фетисов Е.В., Верещагин Ю.О. Расчет рабочих параметров агрегатов топливной системы силовой установки летательного аппарата с учетом изменения качества авиационного топлива. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614253, 19.04.2016.
15. Завялик И.И., Фетисов Е.В., Самойленко В.М., Олешко В.С. Моделирование функционирования агрегатов топливной системы газотурбинного двигателя летательного аппарата с учетом изменения качества авиационного топлива // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 225 (3). С.49 – 54.

16. Завялик И.И., Фетисов Е.В., Верещагин Ю.О. Расчет рабочих параметров агрегатов топливной системы силовой установки летательного аппарата с учетом определения значений показателей качества авиационного топлива. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615419, 17.05.2017.
17. Соколовская И.Ю. Полный факторный эксперимент. Методические указания для самостоятельной работы студентов. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. - 36 с.
18. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента. - М.: Наука, 1976. - 223 с.
19. Мозговой В.И., Ковалёв В.Д., Сафин А.М. Обеспечение чистоты рабочих тел жидкостно-газовых систем: Учебное пособие. - Ставрополь: ФВАТУ, 1998. - 311 с.
20. Кровяков В.Б. Романов А.А., Коротеев А.Ю., Ялпаев А.А. Гидроимпульсная очистка и контроль загрязненности рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов воздушных судов // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75588>
21. Завялик И.И., Стукалов А.Н., Тютнев Е.С., Фетисов Е.В. Совершенствование методического аппарата по оценке надежности топливной системы воздушного судна военного назначения // 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2014». Тезисы докладов. (Москва, 17–21 ноября 2014). - СПб.: Мастерская печати, 2014. - С. 39 – 41.