

# ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТОПЛИВОРЕГУЛИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ

Е. В. Шендалева, Х. И. Халимов

Омский государственный технический университет,  
 Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В статье рассмотрены вопросы планирования экспериментов при испытаниях топливорегулирующей аппаратуры газотурбинных двигателей. Несомненна актуальность использования статистических методов и, в частности, планов экспериментов для повышения надёжности и безопасности авиационной техники. Целью статьи является разработка методологических аспектов оценки неопределённости измерения расхода топлива в условиях испытания на полунатурном моделирующем стенде. Предложено использование плана эксперимента для построения статистической модели топливорегулирующей аппаратуры и нахождения неопределённости измерения расхода топлива.

**Ключевые слова:** планирование экспериментов, топливорегулирующая аппаратура, газотурбинный двигатель, полунатурный испытательный стенд.

## Введение

Затраты на проведение экспериментального исследования топливорегулирующей аппаратуры (ТРА) газотурбинных двигателей (ГТД) весьма значительны (топливо, электроэнергия, сжатый воздух, фонд оплаты труда, амортизация оборудования). Существуют различные методы повышения эффективности экспериментального исследования ТРА, снижающие материальные затраты и трудоемкость испытаний. К ним можно отнести:

- применение более совершенного оборудования и измерительной техники;
- повышение информативности испытаний;
- автоматизацию проведения испытаний и обработки результатов;
- увеличение объёма испытаний;
- комплексирование программ испытаний;
- повышение точности и достоверности результатов испытаний.

Перечисленные методы достаточно эффективны при исследовании характеристик ТРА, но каждый из них влечёт увеличение затрат на

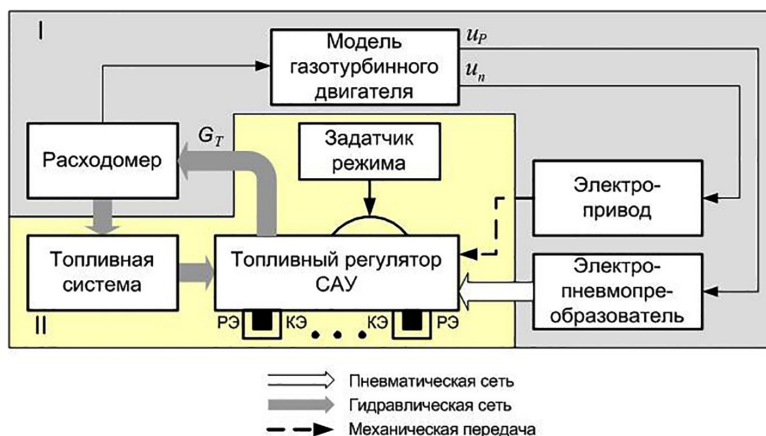


Рис. 1. Схема полунатурного стенда для испытания топливных регуляторов (ТР) систем автоматического управления (САУ) газотурбинных двигателей (ГТД):  
 I — полунатурная модель ГТД; II — топливный регулятор САУ;  
 РЭ и КЭ — регулировочный и контртящий элемент;  
 $u_n, u_p$  — сигналы управления электроприводом и электропневмопреобразователем;  
 $G_T$  — расход топлива

Fig. 1. Scheme of a half sized stand for testing fuel regulators of automatic control systems for gas turbine engines:  
 I — semi-natural model of gas turbine engines; II — fuel regulator of automated control systems;  
 РЭ and КЭ — adjustment element and counter element;  
 $u_n, u_p$  — control signals of the electric drive and electropneumatic converter;  
 $G_T$  — fuel consumption

испытания. Одним из наиболее эффективных методов является метод планирования эксперимента [1], используемый для получения статистической модели [2] объекта испытаний. Его использование позволяет получить математическую зависимость выходного параметра объекта от влияющих факторов.

Методы планирования эксперимента позволяют оптимизировать затраты на проведение испытаний, прогнозировать поведение объекта при многофакторном эксперименте и в ходе эксплуатации, а также оценивать прецизионность и неопределённость результатов испытаний.

### Постановка задачи

Рассмотрим испытания топливных регуляторов (ТР) систем автоматического управления (САУ) ГТД на полунатурном испытательном стенде [3, 4], содержащем имитационную динамическую модель ГТД, расходомер, электропривод и электропневмопреобразователь (рис. 1).

Значения входных и выходных параметров топливного регулятора определяют по измерительным приборам, установленным на стенде. Критерием выполнения требований к ТР является входение измеренных значений его выходного параметра (расхода топлива) в заданный техническими требованиями диапазон (границы погрешности). При этом оценку неопределённости измерений не проводят. Кроме того, поскольку на стенде установлены различные электро-механические преобразователи (электропривод, насосы), их вибрации влияют на мгновенные значения расхода топлива.

Таким образом, для получения достоверной оценки прецизионности и неопределённости измерений необходимо использовать статистические методы.

Для получения оценок неопределённости измерения расхода топлива необходимо рассматривать влияние каждого из входных параметров (факторов) ТР САУ и их взаимное влияние на выходной параметр (отклик), то есть определить функциональную зависимость, связывающую входные и выходные параметры объекта (1). Эту задачу можно решить с помощью построения плана эксперимента и определения статистической модели ТР САУ для последующего расчёта неопределённости измерения.

### Теория

Испытания, проводимые в процессе разработки, доводки и серийного производства ТР САУ, можно объединить в группы [5, 6]:

- 1) научно-исследовательский эксперимент, проводимый до разработки;
- 2) испытания отдельных узлов, проводимые при разработке и доводке;
- 3) доводочные и специальные испытания опытных образцов;
- 4) сертификационные и государственные испытания;
- 5) испытания серийных образцов.

Таким образом, весь жизненный цикл ТР САУ сопровождается проведением испытаний. С повышением требований к параметрам ТР САУ

и ростом его сложности объём испытаний непрерывно растёт.

Во время испытаний ТРА ГТД большое внимание уделяют отработке эксплуатационных свойств (запуск, приёмистость, устойчивость работы и др.). Эти задачи решают при испытаниях ТРА ГТД на стенде в наземных условиях и при имитации высотных, скоростных и климатических условий. При отсутствии на полунатурном моделирующем стенде оборудования для создания высотно-скоростных и температурных режимов используют соответствующие имитационные модели ГТД и производят перерасчет реальных физических параметров по высотно-скоростным и температурным условиям.

Отсутствие или неправильная оценка неопределённости измерений с несколькими влияющими факторами существенно влияет на надёжность как ТР САУ, так и ГТД в целом.

Планирование эксперимента — комплекс мероприятий, которые направлены на эффективное выполнение и постановку экспериментов (опытов, испытаний).

Основная цель планирования эксперимента — минимизация количества опытов и достижение требуемой точности выполняемых измерений без потери статистической достоверности результатов.

Задача планирования эксперимента достаточно сложна, так как необходимо учесть все функциональные соотношения характеристик ТР, условия проведения испытаний, влияние параметров, не связанных с конструкцией топливного регулятора ТР и другие факторы, которые могут повлиять на результаты испытаний.

Необходимо отметить, что в большей степени эффективность плана эксперимента определяет правильный выбор влияющих факторов. Одним из требований, предъявляемых к плану эксперимента, является обеспечение независимости факторов, т.е. возможность установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов.

В настоящее время существует большое количество методов планирования экспериментов, основные из которых:

- полный факторный эксперимент (далее — ПФЭ);
- дробный факторный эксперимент;
- центральный композиционный план и др.

Из всех существующих методов ПФЭ является наиболее простым и в большей степени учитывает всевозможные связи факторов, однако с увеличением факторов применение ПФЭ становится практически невозможным, так как требуемое количество опытов резко возрастает.

С помощью ПФЭ можно получить математическое описание исследуемого объекта. Уравнение регрессии для трёхфакторного эксперимента будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i + \sum_{i,j=1,i \neq j}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i,j,k=1,i \neq j \neq k}^n b_{ijk} \cdot y_i \cdot x_j \cdot x_k, \quad (1)$$

где  $n$  — число факторов ПФЭ,  $i, j, k$  — индексы факторов.

Таблица 1. Матрица планирования  
полного трехфакторного эксперимента  
Table 1. Planning matrix of full three-factor experiment

Номер опыта, $l$	Факторы			Функция отклика $Y$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	
1	-1	-1	-1	$y_1$
2	+1	-1	-1	$y_2$
3	-1	+1	-1	$y_3$
4	+1	+1	-1	$y_4$
5	-1	-1	+1	$y_5$
6	+1	-1	+1	$y_6$
7	-1	+1	+1	$y_7$
8	+1	+1	+1	$y_8$

Таблица 2. Исходные данные  
Table 2. Initial data

$\alpha_{pyA}$ , угл. град.	$n_{BA}$ , об/мин	$P'_K - P'_{BK}$ , кг/см <sup>2</sup>	$G_T$ , кг/ч
25±0,6	2000±100	0,4±0,05	420±20
25±0,6	3250±100	1,2±0,05	745±30
25±0,6	3900±100	1,8±0,05	930±40
25±0,6	4000±100	2,6±0,05	1070±35
70±0,6	2000±100	0,4±0,05	650±25
70±0,6	3250±100	1,2±0,05	905±35
70±0,6	3900±100	1,8±0,05	1035±40
70±0,6	4000±100	2,6±0,05	1170±45
94±0,6	2000±100	0,4±0,05	830±30
94±0,6	3250±100	1,2±0,05	1015±37
94±0,6	3900±100	1,8±0,05	1145±40
94±0,6	4000±100	2,6±0,05	1325±45
115±0,6	2000±100	0,4±0,05	1010±40
115±0,6	3250±100	1,2±0,05	1120±45
115±0,6	3900±100	1,8±0,05	1250±50
115±0,6	4000±100	2,6±0,05	1375±50

Для удобства вычислений коэффициентов регрессии все факторы в ПФЭ варьируют на двух уровнях, соответствующих значениям кодированных переменных +1 и -1. Следовательно, ПФЭ превращается в систему опытов, которая содержит различные неповторяющиеся комбинации уровней варьирования факторов. В табл. 1 приведена матрица ПФЭ с тремя влияющими факторами. Матрица планирования ПФЭ обладает следующими свойствами:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^N X_i &= 0, \\
 \sum_{i=1}^N X_i^2 &= N, \\
 \sum_{i,j=1, i \neq j}^N X_i X_j &= 0, \\
 \sum_{i,j=1, i \neq j, k}^N X_i X_j X_k &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $N$  — общее число опытов ПФЭ.

Общее количество опытов ПФЭ в матрице планирования  $N = 2^n$ .

С помощью матрицы ПФЭ вычисляют коэффициенты регрессии  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijk}$  ( $i \neq j \neq k$ ). Для каждого фактора назначают интервал планирования. Эти факторы нормируют в соответствии с полученными интервалами и определяют коэффициенты регрессии нормированных факторов через оценки дисперсий

$$\begin{aligned}
 S_b^2 &= S_y^2 / N, \\
 S_{coef} &= \sqrt{S_b^2 / (nm)},
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где  $S_y^2$  — дисперсия отклика.

Коэффициент считается значимым, если выполнено условие:

$$|b| \geq S_{coef} \cdot t, \tag{4}$$

где  $t$  — табличное значение критерия Стьюдента.

Полученное уравнение регрессии соответствует критерию Фишера:

Таблица 3. Нормированные значения факторов  
Table 3. The normalized values of factors

Обозначение характеристик	$P_K - P_{BX}$ , кг/см <sup>2</sup>	$n_{BA}$ , об/мин	$\alpha_{PYD}$ , угл. град.
-1	0,4	2000	25
0	1,5	3000	70
+1	2,6	4000	115
Интервал варьирования	1,1	1000	45
Зависимость кодированной переменной от натурального значения	$X_1 = \frac{\tilde{X}_1 - 1,5}{1,1}$	$X_2 = \frac{\tilde{X}_2 - 3000}{1000}$	$X_3 = \frac{\tilde{X}_3 - 70}{45}$

Таблица 4. Результаты ПФЭ в нормированных значениях факторов ( $\alpha = 0,05$ )  
Table 4. Results of the complete factorial experiment in normalized factor values ( $\alpha = 0,05$ )

Опыт, $l$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\hat{y}_l$	$S_y^2$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	425,3	430,2	421,5	425,7	19,0
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	850,3	846,2	839,8	845,4	28,0
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	675,6	670,3	681,2	675,7	29,7
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1075,8	1074,6	1086,3	1078,9	41,4
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1015,6	1002,3	1015,6	1011,2	59,0
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1150,9	1143,1	1155,2	1149,7	37,6
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1220,5	1235,6	1213,6	1223,2	126,6
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1390,6	1386,9	1385,6	1387,7	6,7
$\sum x_i \cdot y_i$	7797,5	1126	933,5	1746,1	9,3	-519,9	-33,5	42,5	Критерий Стьюдента $f=16; t_{кр}=2,12$			$S_b^2=21,76$	
$b_i$	974,7	140,8	116,7	218,3	1,2	-65,0	-4,2	5,3				$S_{koef}=0,95$	
$t_i$	1023,7	147,8	122,6	229,3	1,2	68,3	4,4	5,6	Критерий Кохрена $G_p=0,36; G_{кр}=0,52$ ( $f_1=2, f_2=8$ ) Дисперсии однородны			$S_{ad}^2=32,67$	
Значимость	знач	знач	знач	знач	незнач	знач	знач	знач				$F_p=1,5$	

$$F_p = \frac{\max(S_{ad}^2, S_y^2)}{\min(S_{ad}^2, S_y^2)}, \quad (5) \text{ влияющих факторов и их коэффициентам корреляции}$$

где оценка дисперсии адекватности

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-B} \sum_{l=1}^N (y_l - \hat{y}_l)^2, \quad (6) \quad u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i,j=1; i \neq j}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) \cdot u(x_i) \cdot u(x_j)}, \quad (7)$$

где  $B$  — число коэффициентов регрессии искомого уравнения, включая свободный член;  $y_l$  и  $\hat{y}_l$  — соответственно экспериментальное и оценочное значение функции отклика в  $l$ -м опыте.

Числа степеней свободы:  $f_1 = N - B = 1$ ,  $f_2 = n(m - 1) = 16$ . Уравнение регрессии считают адекватным, если расчётное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше его табличного значения  $F$ .

Стандартную неопределённость отклика  $\hat{y}$  оценивают по стандартным неопределённостям

где  $r(x_i, x_j)$  — оценка парного коэффициента корреляции факторов  $x_i$  и  $x_j$

$$r(x_i, x_j) = \frac{\overline{x_i x_j} - \overline{x_i} \cdot \overline{x_j}}{s_i \cdot s_j} = \frac{\overline{x_i x_j} - \overline{x_i} \cdot \overline{x_j}}{\sqrt{x_i^2 - (\overline{x_i})^2} \cdot \sqrt{x_j^2 - (\overline{x_j})^2}}, \quad (8)$$

где  $s_i, s_j$  — средние квадратические отклонения величин  $x_i$  и  $x_j$ .

Таблица 5. Проверка ПФЭ на адекватность  
Table 5. Verification of the complete factorial experiment for adequacy

Расчётные значения ПФЭ											
$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	$\bar{y}_3$	$\bar{y}_4$	$\bar{y}_5$	$\bar{y}_6$	$\bar{y}_7$	$\bar{y}_8$	$S_b^2$	$S_{ad}^2$	$F_p$	$F$
424,50	846,60	676,87	1077,73	1010,00	1150,90	1224,40	1386,53	21,8	32,7	1,5	2,12

Таблица 6. Расчёт неопределённости измерения расхода топлива  
Table 6. Calculation of the uncertainty of measurement of fuel consumption

Характеристики	$u_{cp}$	$u_{cn}$	$u_{ca}$	$r(x_1, x_2)$	$r(x_1, x_3)$	$r(x_2, x_3)$	$\partial G / \partial P$	$\partial G / \partial n$	$\partial G / \partial \alpha$	$u_{cG}$	$U_{PG}$
Значения	0,025	50	0,300	0,932	0	0	105,3	0,139	3,436	7,483	14,966

Число эффективных степеней свободы стандартной неопределённости  $u_y$

$$v_y = \frac{u_y^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u^4(y_i)}{v_i} \left( \frac{\partial f}{\partial y_i} \right)^4}. \quad (9)$$

### Результаты исследования

Задачей эксперимента было построение регрессионной зависимости расхода топлива  $G_T$  от факторов: угол поворота рычага управления двигателем  $\alpha_{pyA}$ , разность давления воздуха за компрессором и на входе в двигатель  $P_K - P_{BX}$ , частота вращения ротора  $n_{BA}$ . В ходе исследования был выбран ПФЭ как наиболее информативный среди прочих. Для разработки плана эксперимента были использованы данные методики испытаний, приведенные в табл. 2.

Масштаб изменения факторов выбирают таким образом, чтобы максимальное значение соответствовало +1, а минимальное — -1. Если шкалы факторов нелинейные и нулевое значение интервала варьирования несимметрично относительно других уровней, то факторы нормируют

$$X_i = \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_{i0}}{I}, \quad (10)$$

где  $X_i$  и  $\bar{X}_i$  — соответственно нормированное и измеренное значения;  $\bar{X}_{i0}$  — основной (нулевой) уровень;  $I$  — интервал варьирования,  $I = |\bar{X}_{i\max} - \bar{X}_{i0}|/2$ .

По результатам экспериментов дополнительных нормированные значения факторов приведены в табл. 3.

Расчёт плана эксперимента приведён в табл. 4.

Согласно критерию Стьюдента, все коэффициенты, кроме взаимодействия  $x_1x_2$ , значимы. Окончательное уравнение регрессии

$$y = 974,69 + 140,75x_1 + 116,69x_2 + 218,27x_3 - 64,99x_1x_3 - 4,18x_2x_3 + 5,31x_1x_2x_3. \quad (11)$$

Уравнение проверяют на адекватность по критерию Фишера, подставляя +1 или -1 вме-

сто  $x_i$  в соответствии с номером  $I$  эксперимента из табл. 4. Результаты проверки ПФЭ приведены в табл. 5.

Полученная модель соответствует критериям адекватности. После перехода к натуральным величинам уравнение регрессии выглядит следующим образом

$$G_T = 242,644(P_K - P_{BX}) + 0,1344n_{BA} + 7,567\alpha_{pyA} - 0,00025n_{BA}\alpha_{pyA} - 1,634(P_K - P_{BX})\alpha_{pyA} + 0,00011(P_K - P_{BX})n_{BA}\alpha_{pyA} - 97,159.$$

Стандартные неопределённости измерения значений факторов оценивают по типу В [7], исходя из предела погрешности (расширенной неопределённости) с коэффициентом охвата  $k = 2$ . Расчёт неопределённости приведён в табл. 6.

### Выводы и заключения

Преимущества данного подхода при испытаниях ТРА:

- возможность определения взаимосвязи входных и выходных параметров ТРА с помощью статистической модели на основе экспериментальных данных;

- возможность выбора режимов испытаний по известной модели;

- снижение издержек и трудоёмкости испытаний при выборе режимов испытаний согласно полученной модели;

- получение статистически обоснованной неопределённости измерений для гарантированного выполнения требований к предельной погрешности.

Однако, как отмечалось ранее, применение ПФЭ при большом числе влияющих факторов является нецелесообразным ввиду увеличения количества необходимых опытов. В этой ситуации необходимо использовать другие методы планирования эксперимента.

### Заключение

Исходя из проведенного исследования, можно отметить, что использование методов планирования эксперимента при испытаниях ТРА ГТД по известным значениям характеристик стендовых

испытаний является довольно простым и удобным методом повышения эффективности испытаний ГТД, а также обеспечения прецизионности и заданной неопределённости испытаний.

#### Список источников

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 279 с.
2. Чечулин А. Ю. Совершенствование методики контроля пусковых характеристик серийных вспомогательных ГТД // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 1 (67). С. 22–28.
3. Шендалева Е. В. Отладка систем автоматического управления газотурбинных двигателей и прогнозирование их технического состояния // Вестник СибАДИ. 2017. № 3 (55). С. 111–119.
4. Шендалева Е. В. Сравнительные испытания стендового оборудования для испытания топливрегулирующей аппаратуры газотурбинных двигателей // Метрология, стандартизация, качество: теория и практика: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 14–16 нояб. 2017 г.). Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. С. 153–160. DOI:10.1088/1742-6596/998/1/012031.
5. Марчуков Е. Ю., Онищик И. И., Рутовский В. Б. [и др.]. Испытания и обеспечение надёжности авиационных двигателей и энергетических установок / под общ. ред. И. И. Онищика. М.: Изд-во МАИ, 2004. 336 с.
6. Александровская Л. Н., Крутлов В. И., Кузнецов А. Г. Теоретические основы испытаний и экспериментальная

обработка сложных технических систем. М.: Логос, 2003. 736 с.

7. ГОСТ 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1: 2008. Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. Введ. 2018–09–01. М.: Стандартинформ, 2017. 112 с.

---

**ШЕНДАЛЕВА Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология».

SPIN-код: 2592-2847

ORCID: 0000-0002-9993-7105

Адрес для переписки: shendalevaev@yandex.ru

**ХАЛИМОВ Хусан Илгорович**, магистрант гр. СМм-171 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: www.kick\_93@mail.ru

#### Для цитирования

Шендалева Е. В., Халимов Х. И. Планирование эксперимента при стендовых испытаниях топливрегулирующей аппаратуры // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 156–162. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-156-162.

Статья поступила в редакцию 18.04.2019 г.

© Е. В. Шендалева, Х. И. Халимов

## DESIGN OF EXPERIMENTS AT BENCH TESTS OF FUEL SUPPLYING APPARATUS

E. V. Shendaleva, Kh. I. Khalimov

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article questions an experiment design of gas-turbine engine combustion unit at test bench. The relevance of statistical methods use and, particularly, experiment design for increase in reliability and safety of the aircraft equipment is undoubted. The article purpose is the methodological aspect development in uncertainty assessment of fuel consumption measurement in the test conditions at the semi-natural modeling stand. The experiment design use for combustion unit statistical model creation and uncertainty finding of fuel consumption measurement is offered.

**Keywords:** design of experiments, fuel consumption, gas-turbine engine, semi-natural test bench.

### References

1. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [Planning an experiment by searching of optimal conditions]. 2nd ed. Moscow: Nauka Publ., 1976. 279 p. (In Russ.).
2. Chechulin A. Yu. Sovershenstvovaniye metodiki kontrolya puskovykh kharakteristik seriynykh vspomogatel'nykh GTD [Improved of methods of monitoring the starting characteristics of serial Auxiliary Gas Turbine Engine using the statistical analysis] // Vestnik UGATU. *Vestnik UGATU*. 2015. Vol. 19, no. 1 (67). P. 22–28. (In Russ.).
3. Shendaleva E. V. Otladka sistem avtomaticheskogo upravleniya gazoturbinykh dvigateley i prognozirovaniye ikh tekhnicheskogo sostoyaniya [The regulation of gas turbine engine automatic control system in time of trials for technologic state forecasting] // Vestnik SibADI. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. No. 3 (55). P. 111–119. (In Russ.).
4. Shendaleva E. V. Sravnitel'nyye ispytaniya stendovogo oborudovaniya dlya ispytaniya toplivoreguliruyushchey apparatury gazoturbinykh dvigateley [Comparative tests of bench equipment for fuel control system testing of gas-turbine engine] // Metrologiya, standartizatsiya, kachestvo: teoriya i praktika. *Metrologiya, standartizatsiya, kachestvo: teoriya i praktika*. Omsk: OmSTU Publ., 2017. P. 153–160. DOI: 10.1088/1742-6596/998/1/012031. (In Russ.).
5. Marchukov E. Yu., Onishchik I. I., Rutovskiy V. B. [et al.]. Ispytaniya i obespecheniye nadezhnosti aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Testing and ensuring the reliability of aviation engines and power stations] / Ed. I. I. Onishchik. Moscow: MAI Publ., 2004. 336 p. (In Russ.).
6. Aleksandrovskaya L. N., Kruglov V. I., Kuznetsov A. G. Teoreticheskiye osnovy ispytaniy i eksperimental'naya obratka slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Theoretical bases of testing and experimental processing of complex technical systems]. Moscow: Logos Publ., 2003. 736 p. (In Russ.).
7. GOST 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1: 2008. Neopredelennost' izmereniya. Chast' 3. Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya [Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement]. Moscow: Standartinform Publ., 2017. 112 p. (In Russ.).

---

**SHENDALEVA Elena Vladimirovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Transport, Oil and Gas Storage, Standardization and Certification Department.  
SPIN-code: 2592-2847  
ORCID: 0000-0002-9993-7105  
Address for correspondence: shendalevaev@yandex.ru

**KHALIMOV Khusan Ilgorovich**, Undergraduate gr. SMm-171, Elite Education and Master Course Department.  
Address for correspondence: www.kick\_93@mail.ru

### For citations

Shendaleva E. V., Khalimov Kh. I. Design of experiments at bench tests of fuel supplying apparatus // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 156–162. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-156-162.

**Received 18 April 2019.**  
© E. V. Shendaleva, Kh. I. Khalimov