

УДК 621.45.02

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРИЙНЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ГТД С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

А. Ю. Чечулин

Antt2008@yandex.ru

ОАО «Уфимское агрегатное производственное «Гидравлика» (ОАО «УАП «Гидравлика»)

Поступила в редакцию 22 октября 2014 г.

**Аннотация.** Рассматриваются пути совершенствования пусковых характеристик серийных вспомогательных ГТД при комплексном изучении зависимости разброса параметров запуска от различных факторов с применением результатов обработки параметров статистики сдаточных испытаний вспомогательных двигателей большим объемом выборки  $n = 150$  двигателей, результатов моделирования процесса запуска двигателя с помощью разработанной математической нелинейной динамической модели запуска, а также использованием результатов экспериментальных испытаний двигателя.

**Ключевые слова:** пусковые характеристики; статистика; температура газа перед турбиной; корреляционные зависимости; динамическая модель запуска; контроль теплового состояния.

Ресурс вспомогательных газотурбинных двигателей (ВГТД) определяется количеством гарантированных запусков и моточасов, причем определяющую часть повреждаемости «горячей части» вспомогательный двигатель получает на режимах запуска.

Поэтому обеспечение стабильных пусковых характеристик при проведении сдаточно-контрольных испытаний серийных вспомогательных ГТД является гарантией обеспечения заданных характеристик ресурса и надежности изделий при эксплуатации.

В настоящей работе исследуются причины разброса пусковых характеристик серийно выпускаемых ВГТД путем анализа выборки статистических данных параметров запуска большого объема  $n=150$  изделий авиационных вспомогательных двигателей III типоразмера [1], полученных при сдаточно-контрольных испытаниях. Анализ производился с применением зависимостей, полученных с помощью разработанной нелинейной динамической модели запуска [2, 3] и результатов климатических испытаний. При этом исследуются причины разброса параметров запуска, корреляционные связи между параметрами, влияние настроек автоматики и геометрии узлов газозвоздушного тракта.

При анализе параметров запуска двигателей на сдаточных испытаниях установлена зна-

чимая зависимость между максимальным забросом средней температуры газа перед турбиной и за турбиной, временем запуска "горячего двигателя, температурой окружающего воздуха, тепловым состоянием двигателя перед запуском, настройками САУ и других параметров, участвующих в контрольном процессе. Приводятся рекомендации по обеспечению стабильных пусковых характеристик ВГТД

### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Исходные данные статистики параметров 150 двигателей обрабатывались по нижеприведенной методике.

Для анализа распределения параметров запуска и режима были построены гистограммы для каждого из параметров. Число интервалов гистограммы определялось по соотношению:

$$\frac{N}{1}, \quad (1)$$

где  $N = 150$  – число двигателей в статистике за один год выпуска.

Для каждого из параметров рассчитывались следующие статистические характеристики [4, 5]:

- математическое ожидание:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{150} X_i; \quad (2)$$

- среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_X = \sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 / (N - 1)}; \quad (3)$$

- плотность нормального распределения для точек, соответствующих серединам интервалов гистограмм:

$$f(x) = 1/(\sigma\sqrt{2\pi})e^{-(x-\bar{x})^2/2\sigma^2}; \quad (4)$$

- критерий Пирсона  $\chi^2$ , характеризующий степень соответствия полученной гистограммы нормальному закону распределения:

$$\chi^2 = \sum \{f_i - f(x)\}^2 / f(x), \quad (5)$$

где суммирование осуществляется по количеству интервалов гистограммы;  $f_i$  – относительное количество изделий, попадающее в заданный интервал гистограммы (по отношению к общему количеству изделий в выборке);  $f(x)$  – плотность вероятности в заданном интервале гистограмм.

Для оценки взаимной связи между любой парой параметров ( $X$  и  $Y$ ) вычислялись следующие статистические характеристики:

- коэффициент парной корреляции:

$$K_{XY} = 1/N\{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})\}; \quad (6)$$

- параметры линейного уравнения:

$$Y = AX + B, \quad (7)$$

где

$$A = K_{XY}/\sigma_X^2, B = \bar{Y} - K_{XY}/\sigma_X^2 \cdot \bar{X}; \quad (8)$$

- относительный коэффициент корреляции:

$$r_{XY} = K_{XY}/\sigma_X/\sigma_Y; \quad (9)$$

- критерий значимости для относительного коэффициента корреляций:

$$H = |r_{XY}|\sqrt{N - 1}. \quad (10)$$

При построении корреляционных зависимостей между некоторыми параметрами для  $N = 150$  двигателей была выполнена проверка по наличию грубых погрешностей, подлежащих

$$t_r = \max|X_i - X|/\sigma_X, \quad t = |X_b - X|/\sigma_X, \quad (11)$$

где  $X_b$  – значение точки, резко отличающееся от остальных. Если  $t > t_r$ , то значение  $X_b$  можно отбросить, т. е. вероятность появления наблюдения мала или равна принятому уровню значимости ( $\alpha = 0,95$ ). Значения выпавших точек в

расчётах были отброшены. Для чего рассчитаны границы допустимых MAX и MIN значений при 150 наблюдениях: устройства компрессора, камеры сгорания, турбины, отличия в настройках и характеристик системы автоматического управления, погрешностей средств измерения (статической и динамической), отличия во внешних условиях, при которых проводились испытания, физико-химические свойства рабочих жидкостей.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ

Составлена классификация факторов, вызывающих разброс пусковых характеристик (рис. 1). В число факторов здесь включены следующие:

1. Допуска на отладку параметров двигателя, САУ и стартера:

- время «холодного» запуска отлаженного двигателя в пределах отладочной нормы;
- максимального-пикового ("броска") давления топлива в пусковом коллекторе (до  $\tau = 8$  с) на «горячем» и «холодном» запусках;
- минимального давления пускового топлива после открытия стоп-крана основного топлива на «горячем» и «холодном» запусках;
- настройку топливной автоматики (2 элемента) на отлаженном по запуску двигателе;
- настройку автоматики компрессора – регулятора перепуска воздуха за компрессором;
- настройку напряжения (мощности) стендового источника постоянного тока, питающего стартер при запуске.

2. Параметры стендовой системы:

- гидравлическое сопротивление потоку воздуха на входе в двигатель;
- гидравлическое сопротивление потоку газов на выходе из двигателя;
- отличия аэродинамики различных экземпляров испытательных стендов.

3. Параметры, характеризующие вариацию внешних условий:

- температуру воздуха на входе в двигатель;
- давление воздуха на входе в двигатель;
- теплового состояние двигателя перед «горячим» запуском по «остаточной» температуре по штатному указателю замера температуры газов за турбиной.



Рис. 1. Классификация факторов, вызывающих разброс пусковых характеристик

4. Геометрические характеристики узлов турбокомпрессора:

- время пролива лопаточных узлов соплового аппарата I ступени турбины;
- время пролива направляющего аппарата I ступени компрессора;
- время пролива направляющего аппарата II ступени компрессора;
- время пролива направляющего аппарата III ступени компрессора.

5. Динамические погрешности измерений температуры, связанные с различием тепловой инерционности отдельных экземпляров термомпар:

- замера максимальной средней, определенной по показаниям 18-ти термомпар, температуры газа перед турбиной на «горячем» запуске;
- замера максимальной температуры газа за турбиной по штатному указателю, состоящему из трех термомпар.

Номенклатура параметров запуска были выбраны в соответствии с методикой отладки и контроля параметров запуска двигателя. Время запуска «горячего» двигателя, выполняемого не менее чем через минуту с момента останова ротора запуска после выбега, является производным от отладочного времени запуска «холодного» двигателя, т.е. когда отличия между температурой окружающего воздуха, температурой газов за турбиной по штатному указателю и температурой масла составляют не более 5° С.

Тепловое состояние двигателя контролируется при «горячем» запуске и определяется максимальной величиной заброса по осредненным показаниям 18 термомпар.

Помимо статистической обработки для подтверждения значимости корреляционных связей привлекались результаты натурных климатических испытаний [6], а также результаты моделирования с помощью разработанной нелинейной динамической модели запуска ВГТД [2, 3].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе проведенных статистических наблюдений за параметрами 150 двигателей была составлена полная корреляционная матрица размером 24×24 параметра, в которой все параметры записаны в столбцах и в строках. В полученной матрице на пересечении столбца и строки представлен относительный коэффициент взаимной корреляции между параметрами  $R$  и величина критерия значимости коэффициента корреляции  $H$ .

Наибольшая значимость корреляционной зависимости выявлена между параметрами временем «горячего» запуска и температурой окружающего воздуха ( $R = 0,710$ ;  $H = 8,519$ ).

Полученная по статистике зависимость между временем «горячего» запуска и температурой окружающего воздуха (рис. 2) соответствует следующему выражению:

$$\tau_{\text{зап}} = 0,204t_h + 23,81 \quad (12)$$

и достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментальных испытаний двигателя

в ЦИАМ «двигатель № 1» при разных температурах окружающей среды и единой настройке топливной автоматики [6]. На рис. 2 приведены доверительные границы области параметров для множества точек, взятые для уровня вероятности  $\alpha = 0,95$ . Параметры двигателей, соответствующие точкам, выпавшим за границы доверительного интервала, в дальнейшем не рассматривались. Качественный характер экспериментальной зависимости  $\tau_{\text{зап гор.}} = f(t_h)$  соответствует среднестатистической, а увеличенное время запуска объясняется более слабым источником постоянного тока, примененным в ходе климатических испытаний по сравнению с источником, примененным при серийных стендовых испытаниях.

Статистический анализ показал наиболее значимые корреляционные зависимости максимального заброса температуры газов перед турбиной, выбранного в качестве результирующего показателя в оценке теплового состояния двигателя, с параметрами, приведенными в таблице.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости заброса температуры газа за турбиной при запуске в зависимости от температуры окружающего воздуха при единой настройке САУ, а также среднестатистические зависимости, полученные обработкой статистики по вышеуказанной методике. Здесь же нанесены точки статистики параметров ( $n = 150$  двигателей). Следует отметить, что для зависимости заброса температуры газов за турбиной от температуры окружающего воздуха  $t_T^* = f(t_h)$  получен больший уровень критерия значимости, чем для заброса температуры газа перед турбиной (критерий значимости корреляции  $H = 6,03$  против  $H = 4,33$  и соответственно  $r = 0,509$  и  $r = 0,381$ ). На рис. 3 нанесены экспериментальные данные по испытаниям двигателя («двигатель № 1»), проходившего климатические испытания [6] в ТБК ЦИАМ при выполнении запусков при различной температуре с единой регулировкой, а также результаты испытания серийного двигателя «двигатель № 2», выбранного в качестве контрольного экземпляра при задании нормы на максимальную температуру газа при запуске.

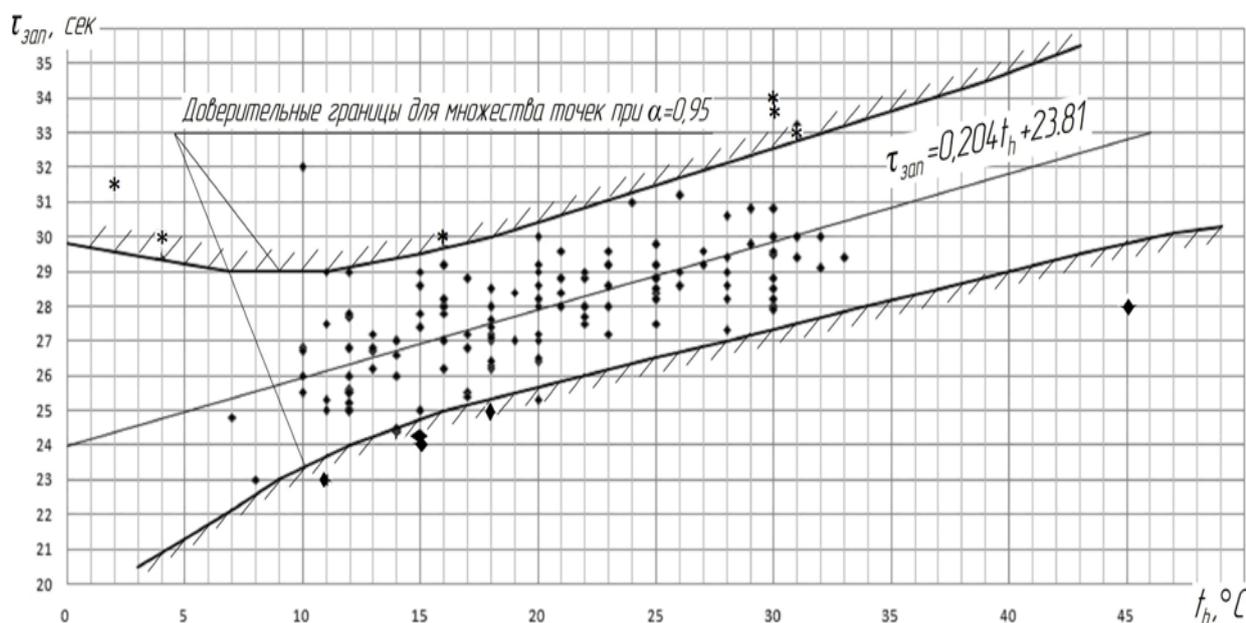


Рис. 2. Зависимость времени запуска от температуры окружающего воздуха:  
 ◆ – статистика, \* – данные климатических испытаний «двигатель № 1»

Таблица

Наименование параметров	$t_T^*, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_h^*, \text{ }^\circ\text{C}$	$B_n, \text{ мм. рт. ст.}$	$\tau_{\text{зап}}, \text{ с}$	$T_{T \text{ ост}}^*, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{на-III}}$
Температура газа перед турбиной, $T_{T \text{ ср}}^*, \text{ }^\circ\text{C}$	$R=0.536;$ $H=6.428$	$R=0.381;$ $H=4.569$	$R=-0.225;$ $H=2.703$	$R=0.308;$ $H=3.691$	$R=0.275;$ $H=3.305$	$R=-0.235;$ $H=2.820$

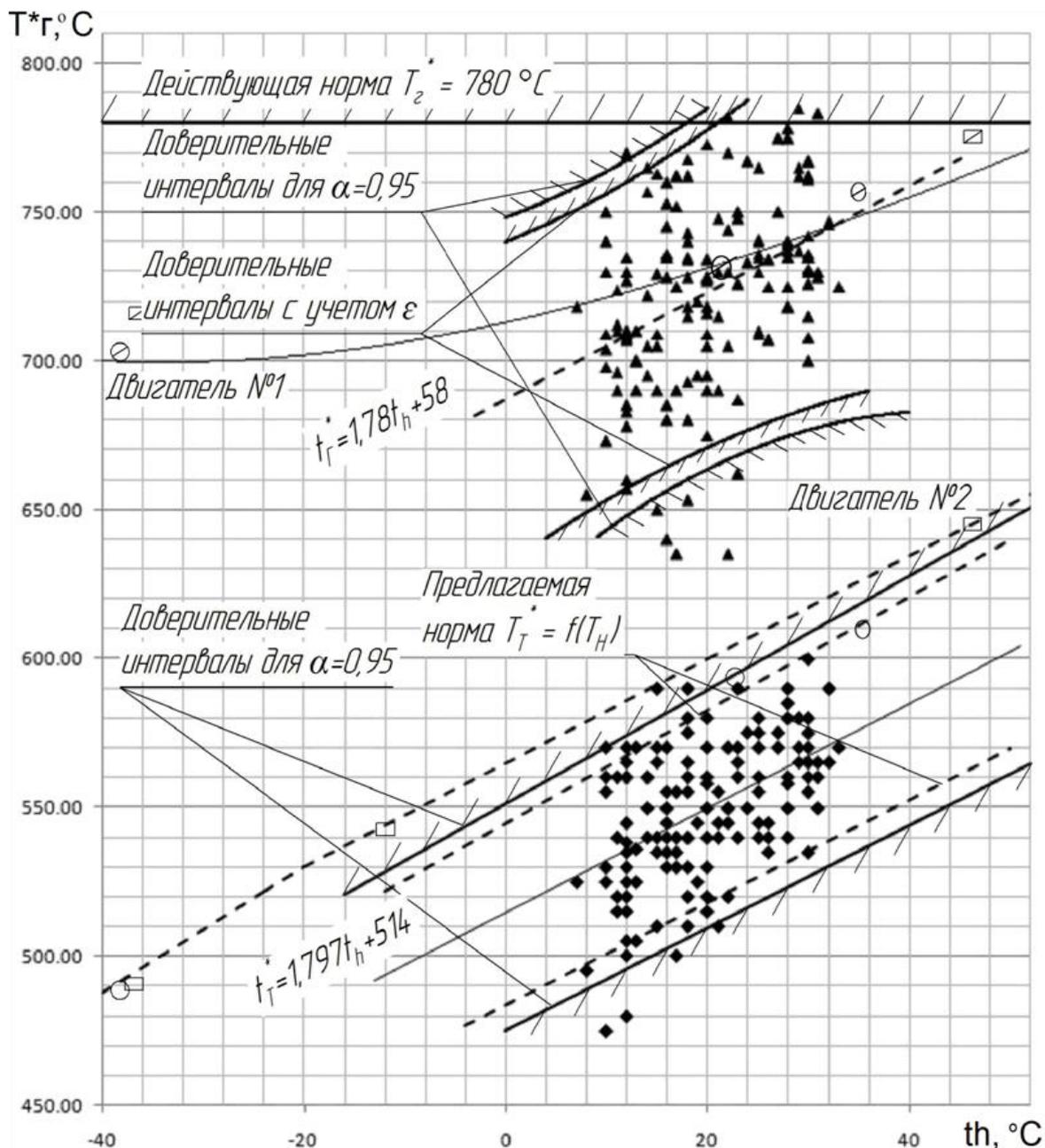
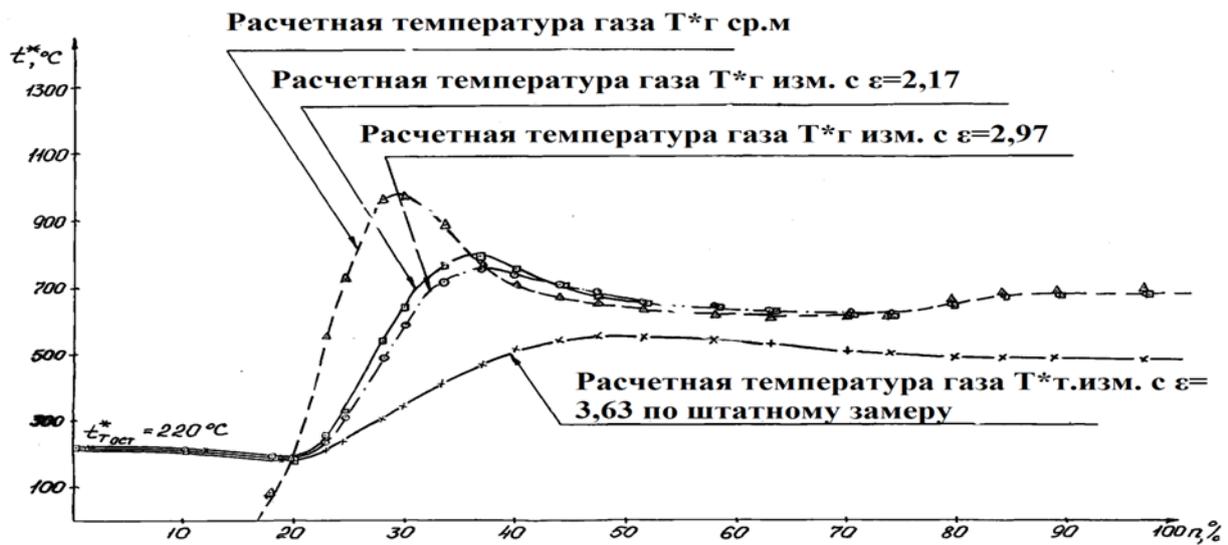


Рис. 3. Статистические зависимости  $t_{Г*cp} = f(t_h)$  и  $t_{Г*} = f(t_h)$  для рассматриваемой выборки

Оценка допустимого теплового состояния «двигателя № 2» при запуске при установлении нормы на величину максимального заброса осуществлялась путем сравнения ее с показаниями оптического пирометра, сканировавшего температуру рабочих лопаток I ступени турбины. Для двигателя № 2 характер полученной зависимости достаточно хорошо согласуется со среднестатистическими зависимостями  $t_{Г*} = f(t_h)$ . Здесь же нанесены доверительные интервалы этих зависимостей. Величины максимальных забросов температур газа перед и за турбиной, несмотря на существующий разброс в исходных данных, определяющих их уровень, достаточно тесно связаны между собой (крите-

рий значимости  $H = 6,428$ ), что позволяет сделать вывод о эффективности их одновременного использования для контроля теплового состояния двигателя при запуске. Обращает внимание увеличенный разброс времени запуска «горячего» двигателя  $\Delta = 9$  сек по сравнению с отладочной нормой времени запуска «холодного» двигателя  $\Delta = 3$  сек

Введение в методику контроля теплового состояния двигателя при запуске нормы на время запуска «горячего» двигателя, выполняемого при фиксированном тепловом состоянии двигателя перед запуском и зависящей от температуры окружающего воздуха, позволит уменьшить ожидаемый разброс  $T_{Г*max}$  (рис. 3).



**Рис. 4.** Расчетное протекание в процессе запуска теоретической температуры  $T^*_г$ , замера  $T^*_г$  с разными показателями инерционности термопар с помощью нелинейной динамической модели [3, 4] и показаний по штатному указателю  $T^*_г$

Как показало «причесывание» реальной статистики параметров запуска по линейным моделям, составленным на основании коэффициентов влияния параметров времени запуска «горячего» двигателя-  $t_{\text{зап гор.}}$  температуры окружающего воздуха перед запуском-  $t_h$ , теплового состояния двигателя перед «горячим» запуском-  $T^*_{Т\text{ ост}}$ , барометрического давления в боксе-Вн на величину максимального заброса температуры газов за турбиной по штатному указателю-  $T^*_{Т\text{ max}}$ , позволит уменьшить величину фактического разброса  $T^*_{Т\text{ max}}$  с величины  $\pm 40^\circ\text{C}$  на величину  $\pm 30^\circ\text{C}$  при уровне доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  (см. рис. 3).

С целью исследования влияния инерционности термопар, представляющих собой нестандартные термопары изготавливаемые в условиях лаборатории предприятия, замера средней температуры газа перед турбиной, на величину разброса, было исследовано несколько экземпляров термопар в условиях специализированной лаборатории НИИ «Приборостроения» (Казань) [7] с измерением постоянной времени термопары:

$$\varepsilon = \frac{K}{(PW)^{0,81}} + 0,2, \quad (13)$$

где  $K$  – экспериментальный коэффициент;  $P$ ,  $W$  – статическое давление и скорость потока в месте установки термопары. При этом было выявлено следующее: постоянная времени для разных экземпляров термопар, изготовленных по одним чертежам, изменяется в достаточно

широком диапазоне  $\varepsilon = 2,15\text{--}4,06$ . Для исследования влияния отклонения постоянной времени термопары на величину максимального заброса температуры газа перед турбиной при запуске было проведено моделирование процессов с помощью динамической модели запуска [2, 3] при измерении температуры газа перед турбиной с термопарами, имеющими различную тепловую инерционность.

Как показывает расчет, в процессе запуска в условиях  $t_h = +15^\circ\text{C}$ ,  $Bn = 760$  мм. рт. ст. и  $t_{Т\text{ ост}} = +220^\circ\text{C}$  с заданными показателями инерционности с помощью нелинейной динамической модели [4] (рис. 4) показания термопар в зоне максимума отличаются на  $17^\circ\text{C}$ . Расчет СКО доверительной границы при этом осуществлялась по соотношению [7] для суммарной погрешности измерения. Обладая информацией по влиянию данного фактора ( $\varepsilon$ ), на основании проведения моделирования процесса запуска [3, 5, 7] при различных значениях тепловой инерционности термопар и вероятностях изготовления, можно установить влияние вклада этого фактора и свести его к минимуму за счет уменьшения стабилизации процесса изготовления термопар замера  $T^*_г$ . При этом величина ожидаемого фактического заброса  $T^*_г$  уменьшится следующим образом:

$$\sigma_{T^*_г\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{факт}}^2 - K^2\sigma_{\varepsilon}^2}, \quad (14)$$

где  $\sigma$  – СКО температуры газа перед турбиной, полученной по результатам первичной статистики, °С;  $K$  – коэффициент влияния постоянной времени термодатчика на величину максимального заброса температуры газа перед турбиной;  $\sigma_{\text{max}}$  – СКО температуры газа перед турбиной, обусловленный изменением тепловой инерционности термодатчика.

Доверительный интервал разброса максимальной величины температуры газа перед турбиной в процессе запуска, скорректированный с учетом исключения погрешности в изготовлении термодатчика (см. рис. 3).

### ВЫВОДЫ

1. Приведена классификация параметров, оказывающих влияние на контроль теплового состояния двигателя при отладке запуска на стенде предприятия.

2. Исследованы взаимные зависимости между параметрами запуска и факторами на них влияющими, выявленными при классификации.

Выявлена значимая корреляционная зависимость времени «горячего» запуска от температуры окружающего воздуха, введение которой в методику отладки позволит существенно повысить достоверность отладки времени запуска и уменьшить ожидаемый разброс максимальной величины температуры газа перед турбиной.

Наиболее значимые параметры, определяющие величину максимального заброса температуры газа перед турбиной: время «горячего» запуска, температура окружающего воздуха при испытаниях, тепловое состояние перед горячим запуском, барометрическое давление, а также ошибки измерений (в частности разброс постоянной времени термодатчика контроля  $\sigma_{\text{max}} - \epsilon$ ).

3. Предложены рекомендации по улучшению методики контроля теплового состояния двигателя при запуске:

- по введению нормы на время запуска "горячего" двигателя в зависимости от температуры окружающего воздуха;
- учету теплового состояния двигателя перед «горячим» запуском;
- по введению поправки нормы на время запуска на величину барометрического давления в боксе Вн;
- повышению качества изготовления термодатчика.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авиационные** вспомогательные силовые установки / А. М. Поляков и др. М.: Машиностроение, 1992. 672 с. [[ A. M. Polyakov, et al. *Aviation auxiliary power units*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1992. ]]
2. **Гуревич О. С.** Системы автоматического управления авиационными ГТД. Энциклопедический справочник. М.: Торус Пресс, 2011. [[ O. S. Gurevich, *Control system aircraft engine*, (in Russian). Moscow: Torus Press, 2011. ]]
3. **Чечулин А. Ю.** Алгоритмы управления режимами запуска вспомогательного газотурбинного двигателя из условия обеспечения повышенного ресурса: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1989. 22 с. [[ A. Yu. Chechulin, *Control algorithm of wake-up mode of auxiliary power unit for ensuring of increased resource*: Report for scientist degree. Ufa, 1989. ]]
4. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. [[ E. S. Ventzel, *Probability theory*. Moscow: Nauka, 1969. ]]
5. **Рабинович С. Г.** Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. [[ S. G. Rabinovich, *Measurement accuracy*. Leningrad: Energy, 1978. ]]
6. **Заключение** ЦИАМ № 004/847-84 от 01.02.84 по первому этапу испытаний двигателя № 0п-5 на ВКС У-7М предприятия. М., 1984. [[ Report of CIAM No. 004/847-84 from 01.02.84 about the first stage of engine № 0п-5 test on VKS U-7M enterprise. Moscow, 1984. ]]
7. **Письмо** НИИ приборостроения № 11-6-31/2510 от 06.06.86, Казань. [[ Letter by NII Priborostroeniya No. 11-6-31/2510 from 06.06.86, Kazan. ]]

### ОБ АВТОРАХ

**ЧЕЧУЛИН Анатолий Юрьевич**, гл. констр. КБ авиационных ВСУ. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1976). Канд. техн. наук по тепл. двиг. (МНПО «Союз», 1989). Иссл. в обл. пусковых характеристик ГТД.

### METADATA

**Title:** Improved of methods of monitoring the starting characteristics of serial Auxiliary Gas Turbine Engine using the statistical analysis.

**Authors:** A. Yu. Chechulin.

**Affiliation:**

OJSC "Gidravlika Ufa Aggregate Enterprise" (OJSC "UAE "Gidravlika").

**Email:** Antt2008@yandex.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 1 (67), pp. 22-28, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Considered ways to improve the starting characteristics of serial Auxiliary GTE in the comprehensive study of depending scatter the parameters of start on various factors with using the results of processing parameters statistics of delivery trials auxiliary engines with large sample size  $n = 150$  engines, the simulation results of the process to start the engine using the developed mathematical nonlinear dynamic model of start, as well as using results of experimental tests of the engine.

**Key words:** starting characteristics; statistics, gas temperature before the turbine; correlations; mean square deviation; the dynamic model run; thermal monitoring.

**About the author:**

**CHECHULIN, Anatolii Yurievich** Chief Project Designer on APU and GTP of OJSC "UAE "Gidravlika. Dipl. Ing. Mech. (USATU, 1976). Cand. of Tech. Sci (MNPO "Souz", 1989). Research in the field of starting characteristics of GTE.