

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОКС С ЭЛЕМЕНТАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

Ерохин А. В.¹, Пахольченко А.А.²

^{1,2}Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

¹erohinaleksandr06@gmail.com

²andrey.paholchenko@mail.ru

Ключевые слова: камера сгорания, методика, регрессионная модель, эффективность рабочего процесса, регулирование.

Анализ основных факторов, оказывающих влияние на эффективность рабочего процесса сгорания топлива в ОКС с высокими значениями $\Delta T_{\text{с}}^*$, позволил сделать вывод, что для обеспечения их наивыгоднейших характеристик по полноте сгорания топлива, устойчивости процесса горения, дымления, эмиссии вредных веществ в широком эксплуатационном диапазоне суммарных значений коэффициента избытка воздуха (α_{Σ}), необходимо целенаправленно воздействовать на геометрию камеры сгорания (КС), с целью придания ей свойства адаптивности. Иными словами, вводить в конструкцию перспективных камер сгорания элементы регулирования, для поддержания оптимального состава топливовоздушной смеси в первичной зоне. Предполагается, что регулированию подлежат:

- устройства для изменения относительной координаты размещения первого пояса отверстий для подвода воздуха в зону горения ($\bar{x}_{\text{пз}}$);
- центробежно - пневматические форсунки с изменяемым соотношением паровой и жидкой фаз топлива ($\bar{G}_{\text{пар}}$);
- устройства для изменения суммарной эффективной площади отверстий для подвода воздуха в зону горения ($\sum \mu F_{\text{ож}}$).

Для формирования закона управления, в качестве функции отклика, был предложен безразмерный комплекс $E_{\text{ТВ}}$ [1], представляющий собой:

$$E_{\text{ТВ}} = \sum_{i=1}^N \frac{T_{\text{м}}}{T_{\text{ст}}} / N ; (N \geq N_{\text{мин}}), \quad (1)$$

где N – количество точек наблюдений $T_{\text{м}}$ в первичной зоне;

$N_{\text{мин}}$ – минимальное число точек наблюдения $T_{\text{м}}$ для построения детального поля температур в первичной зоне; $T_{\text{м}}$ – местная температура; $T_{\text{ст}}$ – стехиометрическая температура ($T_{\text{ст}} \approx 2400 \text{ K}$).

Смысл комплекса состоит в том, чтобы определить долю объема, в котором наблюдается наибольшая эффективность тепловыделения от всего объема, в котором протекает процесс горения. Это позволяет дать оценку эффективности использования объема, предоставленного для сжигания определенного количества топлива. По своей сути, $E_{\text{ТВ}}$ пропорционален $\eta_{\text{г}}$. В качестве его основных преимуществ выступают физичность и простота получения.

Значения комплекса определялись при помощи использования математической модели, подробное описание которой представлено в [1]. Таким образом, получим окончательный вид зависимости $E_{\text{ТВ}}$ от выбранных факторов, влияние которых на характер протекания рабочего процесса в ОКС оценивается в данном примере:

$$E_{\text{ТВ}} = f(\bar{x}_{\text{т}}, \bar{G}_{\text{пар}}, \sum \mu F_{\text{ож}}). \quad (2)$$

Для исследования выявления зависимостей между тремя независимыми факторами $\bar{x}_T, \bar{G}_{\text{пар}}, \sum \mu F_{\text{ож}}$ и результирующей функцией $E_{\text{ТВ}}$, применяются методы регрессионного и корреляционного анализа, а также численной оптимизации регрессионной модели [2].

Алгоритм исследования содержит четыре стадии: выбор регрессионной модели, отбор значимых факторов, построение уравнения регрессии и оптимизация на основе регрессионной модели с целью выявления максимального значения функции отклика у.

Стоит отметить, что для решения оптимизационной задачи нахождения максимума целевой функции, можно использовать итерационный численный метод, который получил название Generalized Reduced Gradient. Данный численный метод базируется на алгоритме условной нелинейной оптимизации, основу которого составляет метод градиентного спуска [3]. Данный метод реализован в надстройке Solver электронного процессора MS Excel.

Для оценки эффективности представленной методики, была решена задача определения оптимального закона управления элементами регулирования рабочего процесса для среднестатистической ОКС ТРДДФ со смешением потоков, обладающая следующими значениями параметров: $T_c^* = 1665 \text{ K}$, $\eta_{\text{гр расч}} = 0,98$. При этом, положениям устройств регулирования присвоены следующие значения: $\bar{x}_T = 0,5, \bar{G}_{\text{пар}} = 0, \bar{\varphi}_{\text{лз}} = 0,8$ ($\bar{\varphi}_{\text{лз}} = \varphi_{\text{лз}}/75$).

Расчетное значение показателя эффективности $E_{\text{ТВ}}$ такой КС на режиме работы двигателя «Максимал» составило 0,9792553, что примерно соответствует $\eta_{\text{гр расч}}$. Исходя из этого, можно считать $E_{\text{ТВ}} \approx \eta_{\text{гр расч}}$.

В рамках первого этапа алгоритма исследования, в качестве аппроксимирующей функции, была выбрана функция второго порядка:

$$E_{\text{ТВ}}(\bar{x}_T, \bar{G}_{\text{пар}}, \sum \mu F_{\text{ож}}) = a_0 + a_1 \bar{x}_T + a_2 \bar{G}_{\text{пар}} + a_3 \sum \mu F_{\text{ож}} + a_{12} \bar{x}_T \bar{G}_{\text{пар}} + a_{13} \bar{x}_T \sum \mu F_{\text{ож}} + a_{23} \bar{G}_{\text{пар}} \sum \mu F_{\text{ож}} + a_{11} \bar{x}_T^2 + a_{22} \bar{G}_{\text{пар}}^2 + a_{33} \sum \mu F_{\text{ож}}^2. \quad (3)$$

На втором этапе алгоритма, был произведен отбор факторов, оказывающих значимое влияние на значение функции отклика, путем проведения корреляционного анализа, с последующим отбором факторов с точки зрения исключения мультиколлинеарности. Таким образом, был сформирован набор членов регрессионной модели, которые будут входить в линейную модель:

$$E_{\text{ТВ}}(\bar{x}_T, \bar{G}_{\text{пар}}, \sum \mu F_{\text{ож}}) = 0,2052 - 0,385 \bar{G}_{\text{пар}} + 0,024 \sum \mu F_{\text{ож}} + 0,0022 \bar{x}_T \sum \mu F_{\text{ож}} + 0,0045 \bar{G}_{\text{пар}} \sum \mu F_{\text{ож}} - 0,006 \bar{G}_{\text{пар}}^2 - \sum \mu F_{\text{ож}}^2. \quad (4)$$

Согласно результатам, для рассматриваемой ОКС, наибольший вклад в изменение значения $E_{\text{ТВ}}$ вносит изменение координаты подвода воздуха в зону горения.

На заключительном этапе проводится оптимизация целевой функции $E_{\text{ТВ}}(\bar{x}_T, \bar{G}_{\text{пар}}, \sum \mu F_{\text{ож}})$, с учетом принятых ограничений, согласно которым значения независимых переменных изменяется в диапазоне от 0 до 1.

По результатам решения оптимизационной задачи, было установлено, что необходимо переместить относительную координату размещения первого пояса отверстий для подвода воздуха в зону горения с $\bar{x}_T = 0,5$ до $\bar{x}_T = 1$, а $\bar{\varphi}_{\text{лз}} = 0,8$ увеличить до 0,93, что позволит повысить значение $E_{\text{ТВ}}$ до 0,9858283. При переводе ОКС на режим малого газа, необходимо применение сразу всех рассмотренных выше устройств регулирования. В частности, изменив: $\bar{x}_T$ с 0,5 до 1, $\bar{G}_{\text{пар}}$ с 0 до 1, а также $\bar{\varphi}_{\text{лз}}$ с 0,8 до 1, обеспечивая $E_{\text{ТВ}} = 0,9790$, против 0,9698, без регулирования.

Исходя из анализа полученных результатов, можно сделать вывод о нецелесообразности введения элементов регулирования рабочего процесса в конструкцию

традиционных КС ($T_c^* \approx 1600 \text{ K}$), что обусловлено их удовлетворительными характеристиками во всем диапазоне рабочих режимов ГТД.

Как показали предварительные расчеты, для КС с T_c^* от 1600 до 1700 К, достаточно управлять суммарной эффективной площадью отверстий для подвода воздуха в зону горения. Конструкцию КС с T_c^* от 1700 до 1800 К, в дополнении к этому, необходимо оснащать элементами управления координатой размещения первого пояса отверстий для подвода воздуха, а при достижении T_c^* равной 1800 К и более, кроме того, использовать центробежно - пневматические форсунки с изменяемым соотношением паровой и жидкой фаз топлива.

Список литературы

1. Ерохин А.В., Пахольченко А.А. Математическая модель основной камеры сгорания с элементами управления рабочим процессом для перспективного газотурбинного двигателя. Научный журнал: «Насосы. Турбины. Системы». № 4. 2023 (49). С. 84-91.
2. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента. М.: Огни, 2002. 224 с.
3. Magidson J., Vermunt J.K. Latent Class Models. Statistical Innovations Inc [Электронный ресурс]. Tilburg University, 2002. Режим доступа: <http://statisticalinnovations.com/lg/sage11.pdf>.

Сведения об авторах

Ерохин Александр Валериевич – адъюнкт кафедры «Авиационных двигателей» ВУНЦ ВВС «ВВА» им. Профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина (г. Воронеж). Область научных интересов: рабочий процесс КС.

Пахольченко Андрей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Авиационных двигателей» ВУНЦ ВВС «ВВА» им. Профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина (г. Воронеж). Область научных интересов: рабочий процесс КС.

METHODOLOGY OF FORMING A CONTROL LAW FOR A CROSS-COUNTRY SYSTEM WITH ELEMENTS OF WORKING PROCESS REGULATION

Erohin Alexander Valerievich¹, Paholchenko Andrey Alexandrovich²

¹ Air Force Education and Research Center «The Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy»,
Voronezh, Russia

¹erohinaleksandr06@gmail.com

²andrey.paholchenko@mail.ru

Keywords: combustion chamber, methodology, regression model, efficiency of the work process.

This paper examines the methodology for forming a control law for an combustion chambers with elements of work process regulation.