

Башинский В.Г., Камак Ю.О.

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ**

Главным источником ИК-излучения летательного аппарата (ЛА) в наземных условиях является силовая установка (СУ) и ее элементы: детали двигателя (лопатки последней ступени турбины, элементы за-турбинного кока, экраны и др.), нагретые до высокой температуры, а также струя выхлопных газов. На бесфорсажных режимах максимум ИК-излучения газовой струи составляет около 15% от максимума ИК-излучения сопла СУ ЛА (без применения мер по снижению тепловой заметности).

Мероприятия по снижению ИК-излучения могут привести к изменению основных характеристик ЛА, влияя на боевую эффективность его применения. Эффективными мероприятиями по снижению тепловой заметности следует считать такие, которые, изменяя ИК-характеристики до заданного уровня, не нарушают соответствия основных характеристик ЛА требованиям, заданным тактико-техническим заданием.

Основной характеристикой ИК-излучения двигателей ЛА, позволяющей оценивать зоны действия головок самонаведения и изменение размеров этих зон, является величина собственной спектральной силы излучения $I_{o,\lambda}$, зависящая от режима работы двигателя, длины волны и направления наблюдения. Поскольку боевые ИК-приборы работают в сравнительно широких спектральных интервалах $\Delta\lambda$, то ИК-излучение ЛА характеризуется величиной интегральной собственной силы излучения $I_{o,\Delta\lambda}$.

Для конкретных условий работы объекта испытаний его ИК-излучение полностью характеризуется индикатрисой излучения, то есть зависимостью силы излучения от угла наблюдения φ . Мероприятия по снижению ИК-заметности приводят либо к общему уменьшению значений силы излучения, либо к перераспределению ее в пространстве, то есть в конечном итоге изменяют индикатрису излучения.

Эффективность мероприятий по снижению ИК-заметности характеризуется коэффициентом ослабления силы излучения в зависимости от направления наблюдения

$$\tilde{k}(\varphi) = \frac{I_{o,\Delta\lambda}(\varphi)_{\text{б.м}} \text{ (без мероприятий)}}{I_{o,\Delta\lambda}(\varphi)_{\text{м}} \text{ (с мероприятиями)}}, \quad (1)$$

который в общем случае является также функцией длины волны и ширины используемого спектрального интервала $\Delta\lambda$.

При использовании радиометрической (спектрорадиометрической) измерительной аппаратуры собственная сила излучения не может быть измерена непосредственно. Путем косвенных измерений может быть получен ряд физических параметров, в той или иной степени (в зависимости от вида измерительного прибора (ИП) и условий измерений) приближающихся к собственной силе излучения.

Выходной сигнал A ИК-приборов определяется непосредственно разностью между суммарным потоком излучения от объекта и фона, попадающего в поле зрения ИП, и потоком излучения от чистого фона. В других ИП выходной сигнал определяется разностью внешнего (падающего) и внутреннего (создаваемого внутриприборными засветками или специальным встроенным излучателем) потоков, которая путем последовательного измерения потоков от объекта с фоном и от чистого фона сводится к предыдущей.

Учитывая, что входной поток (в Вт) связан с энергетической освещенностью соотношением

$$\Phi = ES_{o,c}, \quad (2)$$

где $S_{o,c}$ – действующая площадь оптической системы ИП, для величины выходного сигнала, определяемой отдельной спектральной составляющей потока, имеем выражение

$$A_\lambda = c' \Delta\Phi_\lambda \phi_\lambda = c \Delta E_\lambda \phi_\lambda, \quad (3)$$

где $\phi_\lambda = \phi_{\lambda,o,c}\phi_{\lambda,\phi}\phi_{\lambda,np}$ – сквозная относительная спектральная характеристика чувствительности ИП; $\phi_{\lambda,o,c}$ – относительная спектральная характеристика оптической системы; $\phi_{\lambda,\phi}$ – относительная спектральная характеристика пропускания спектрального фильтра; $\phi_{\lambda,np}$ – относительная спектральная характеристика чувствительности приемника излучения; c – постоянный коэффициент, учитывающий площадь входного зрачка ИП, максимальные абсолютные значения пропускания оптики и фильтра, максимальную чувствительность приемника и коэффициент передачи тракта сигнала.

Известно, что

$$\begin{aligned} \Delta E_\lambda &= \frac{\tau_\lambda(D)}{D^2} [B_{o,\lambda}S_o + B_{\phi,\lambda}(S_{n,z} - S_o) - B_{\phi,\lambda}S_{n,z}] = \frac{\tau_\lambda(D)}{D^2} S_o (B_{o,\lambda} - B_{\phi,\lambda}) = \\ &= \frac{\tau_\lambda(D)}{D^2} (I_{o,\lambda} - I_{\phi,\lambda}) = E_{\kappa,\lambda}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $E_{\kappa,\lambda}$ – контрастная спектральная энергетическая освещенность, Вт/м³; D – расстояние между объектом и ИП, м; $D > 100$ м; $\tau_\lambda(D)$ – спектральный коэффициент атмосферного пропускания на трассе длиной D ; S_o – видимая площадь объекта, м²; $S_{n,z}$ – площадь участка фона, заполняющего мгновенное поле зрения прибора на расстоянии D , м²; $B_{o,\lambda}$; $B_{\phi,\lambda}$ – средние спектральные яркости объекта и фона, Вт/ср · м; $I_{o,\lambda}$; $I_{\phi,\lambda}$ – собственная спектральная сила излучения объекта и участка фона, затеняемого объектом соответственно, Вт/ср · м.

Отсюда следует, что в результате спектральных измерений могут быть определены: кажущаяся контрастная спектральная сила излучения (в Вт/ср · м)

$$I_{\kappa,\lambda}^* = E_{\kappa,\lambda} D^2 = \tau_\lambda(D) [I_{o,\lambda} - I_{\phi,\lambda}], \quad (5)$$

истинная контрастная спектральная сила излучения (в Вт/ср · м)

$$I_{\kappa,\lambda} = \frac{E_{\kappa,\lambda} D^2}{\tau_\lambda(D)} = I_{o,\lambda} - I_{\phi,\lambda}, \quad (6)$$

собственная спектральная сила излучения (в Вт/ср · м)

$$I_{o,\lambda} = I_{\kappa,\lambda} + I_{\phi,\lambda}. \quad (7)$$

Интегрирование этих величин в пределах требуемого спектрального интервала $\Delta\lambda$, позволяет получить соответствующие интегральные значения $I_{\kappa,\Delta\lambda}^*$, $I_{\kappa,\Delta\lambda}$ и $I_{o,\Delta\lambda}$.

При использовании ИП радиометрического типа измеряется эффективная контрастная интегральная освещенность (в Вт/м²)

$$\begin{aligned} E_{\phi,\kappa,\Delta\lambda} &= \frac{I_{o,n}}{D^2} \left[Z_\lambda \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_{o,m}} \right) - Z_\lambda \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_{o,m}} \right) \right] k_o - \frac{I_{\phi,n}}{D^2} \left[Z_\lambda \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_{\phi,m}} \right) - Z_\lambda \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_{\phi,m}} \right) \right] k_\phi = \\ &= I_{o,\Delta\lambda} k_o - I_{\phi,\Delta\lambda} k_\phi, \end{aligned} \quad (8)$$

где $I_{o,n}$ – полная (во всем спектральном диапазоне) собственная сила излучения объекта, Вт/ср;
 $I_{\phi,n}$ – полная собственная сила излучения участка фона, затеняемого объектом, Вт/ср; $Z\left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)$ – табличная функция; $\lambda_{o,n}$, $\lambda_{\phi,n}$ – длины волн, соответствующие максимальным значениям спектральной плотности излучения объекта и фона и определяемые (в мкм) по закону Вина:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T}; \quad (9)$$

λ_1 , λ_2 – коротковолновая и длинноволновая границы чувствительности ИП; $I_{o,\Delta\lambda}$, $I_{\phi,\Delta\lambda}$ – интегральная собственная сила излучения соответственно объекта и фона в интервале $\Delta\lambda$; k_o , k_ϕ – коэффициенты использования излучения объекта и фона, определяемые выражением:

$$k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Me_{\lambda_{opt}}(T) \phi_\lambda \tau_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Me_{\lambda_{opt}}(T) d\lambda}, \quad (10)$$

где $Me_{\lambda_{opt}}$ – функция Планка, нормированная относительно максимума.

Определяемая в результате радиометрических измерений величина $E_{\text{эф.к.}\Delta\lambda} D^2$ представляет собой эффективную контрастную интегральную силу излучения объекта $I_{\text{эф.к.}\Delta\lambda}$, если в коэффициентах использования излучения учтено атмосферное пропускание τ_λ , или кажущуюся эффективную контрастную интегральную силу излучения $I_{\text{эф.к.}\Delta\lambda}^*$, если атмосферное пропускание по каким-либо причинам не может быть учтено.

Таким образом, в процессе измерений (с использованием радиометрической аппаратуры) реально достигнуто получение пяти вышеописанных физических параметров, характеризующих ИК-излучение объекта испытаний.

Эффективность мероприятий (постоянных или временных) по снижению ИК-излучения оценивается любым из следующих выражений (в зависимости от условий проведения испытаний, их цели и используемой измерительной ИК-аппаратуры), представленных в порядке возрастания погрешности:

$$\begin{aligned} \tilde{k}_1 &\cong \frac{I_{o,\Delta\lambda,\text{б.м}}}{I_{o,\Delta\lambda,\text{м}}}; \\ \tilde{k}_2 &\cong \frac{I_{\kappa,\Delta\lambda,\text{б.м}}}{I_{\kappa,\Delta\lambda,\text{м}}}; \\ \tilde{k}_3 &\cong \frac{I_{\kappa,\Delta\lambda,\text{б.м}}^*}{I_{\kappa,\Delta\lambda,\text{м}}^*}; \\ \tilde{k}_4 &\cong \frac{I_{\text{эф.к.}\Delta\lambda,\text{б.м}}}{I_{\text{эф.к.}\Delta\lambda,\text{м}}}; \\ \tilde{k}_5 &\cong \frac{I_{\text{эф.к.}\Delta\lambda,\text{б.м}}^*}{I_{\text{эф.к.}\Delta\lambda,\text{м}}^*}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $b.m$ – означает значение параметра, характеризующее ИКИ объекта испытаний без мероприятий по снижению ИК-заметности; m – то же, но с учетом мероприятий по снижению уровня ИК-излучения.

Калибровка ИП радиометрического типа заключается в определении взаимосвязи выходного сигнала ИП (в виде напряжения, тока, отклонения шлейфа и т.п.) с величиной освещенности на входном зрачке. Калибровка в единицах освещенности автоматически учитывает в градуировочной зависимости все постоянные характеристики ИП, включая действующую площадь оптической системы.

Измерительный прибор радиометрического типа калибруется (при $D > 100$ м) по точечной модели абсолютно черного тела (АЧТ) с набором сменных диафрагм. При этом оптическая ось объекта ИП должна быть перпендикулярна поверхности излучения АЧТ. Расстояние t между ИП и АЧТ должно быть не менее ближнего предела фокусировки (для ИП, имеющих возможность фокусировки) или не менее $30F$ (где F – фокусное расстояние объектива) для ИП, постоянно сфокусированных на бесконечность.

Величина освещенности от АЧТ изменяется путем изменения площади $S_{АЧТ}$ излучающего отверстия (диаметра d и сменных диафрагм) и температуры АЧТ и рассчитывается по формулам:

$$\left. \begin{aligned} E_{\lambda, АЧТ} &= \frac{S_{АЧТ}}{\pi l^2} 1,2854 \cdot 10^{-15} T_{АЧТ}^5 Y_{\lambda} \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} \right) \tau_{\lambda}, \\ E_{эфф, \Delta\lambda} &= \frac{S_{АЧТ}}{\pi l^2} 1,2854 \cdot 10^{-15} T_{АЧТ}^5 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Y_{\lambda} \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} \right) \phi_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $Y_{\lambda} \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} \right)$ – табличная функция.

Вычисление интеграла в выражении (12) выполняется следующим образом:

спектральный диапазон чувствительности ИП $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ разбивается на n узких спектральных интервалов $\Delta\lambda_i$, одинаковой ширины;

интеграл заменяется суммой

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Y_{\lambda} \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} \right) \phi_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda = \sum_{i=1}^n Y_{\lambda_i} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_m} \right) \phi_{\lambda_i} \tau_{\lambda_i} \Delta\lambda_i; \quad (13)$$

для центральной или граничной (одинаково для всех интервалов) длины волны каждого интервала λ_i

определяются отношения $\frac{\lambda_i}{\lambda_m}$;

по таблице находятся значения Y_{λ_i} ;

по паспортным данным ИП определяются значения ϕ_{λ_i} или составляющих $\phi_{\lambda_{ос}}$, $\phi_{\lambda_{ф}}$, $\phi_{\lambda_{пр}}$;

для выбранных длин волн λ_i определяются значения τ_{λ_i} любым доступным способом, например, с использованием таблицы (см. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М., Советское радио, 1978) или инженерной методики расчета спектральной прозрачности атмосферы в области 0,22–6,0 мкм для источников неселективного излучения;

для каждой длины волны вычисляются соответствующие произведения и выполняется суммирование в соответствии с выражением (13).

Для некоторых частных случаев (например, в случае радиометрического ИП с приемником $I_n Sb$ без спектрального фильтра) можно при вычислениях $E_{эфф, \Delta\lambda, АЧТ}$ использовать формулу (8), рассчитывая коэффициент использования АЧТ по аппроксимационным формулам [1].

В целях исключения влияния фона на результат калибровки определяются разности освещенности от АЧТ, создаваемых при последовательной смене диафрагм АЧТ:

$$\Delta E_{i,j,\lambda, АЧТ} = E_{\lambda, АЧТ_i} - E_{\lambda, АЧТ_j} = E_{\kappa, \lambda, АЧТ_{ij}};$$

$$\Delta E_{i,j\text{эф},\Delta\lambda,AЧТ} = E_{\text{эф},\Delta\lambda,AЧТ_i} - E_{\text{эф},\Delta\lambda,AЧТ_j} = E_{\text{эф},\kappa,\Delta\lambda,AЧТ_{ij}}$$

и соответствующие им разности выходных сигналов измерительного прибора $\Delta A_{ij} = A_i - A_j$. По этим данным строятся градуировочные зависимости вида $\Delta A = f(\Delta E)$ или $\Delta E = \varphi(\Delta A)$. В целях получения большего количества точек градуировочной зависимости и сокращения затрат времени на калибровку целесообразно использовать одновременно несколько АЧТ, установленных на одинаковом фоне и на одинаковом расстоянии от ИП, но имеющих разные температуры. При этом необходимо следить, чтобы в поле зрения ИП не попадали два АЧТ одновременно.

Испытания (исследования) двигателя проводятся, как правило, на открытом стенде ($30 \text{ м} \leq D \leq 3000 \text{ м}$), позволяющем устанавливать СУ в требуемой компоновке, например, с мотогондолой, хвостовой частью, крылом, системой подавления ИК-излучения и так далее, а летательного аппарата в целом на специальной открытой площадке, приспособленной для его крепления, поворотов и проведения ИК-измерений на расстояниях, обеспечивающих полное попадание объекта в поле зрения измерительного устройства.

Для исключения помех от излучения фона при измерениях с помощью ИП радиометрического типа время испытаний целесообразно выбирать из условий:

в ясную погоду – после захода солнца;

в ненастную погоду – в любое время при отсутствии дождя, снега, густого тумана.

В качестве обязательных режимов работы СУ ЛА, на которых производится измерение ИК-излучения, должны быть выбраны:

максимальный форсированный;

крейсерский форсированный;

максимальный.

В процессе проведения испытаний дополнительно ИК-излучение должно проверяться на следующих режимах:

крейсерском;

полетном малом газе.

Углы визирования ИП выбираются из условия проведения экспериментов в количестве, необходимом для построения индикатрисы ИК-излучения в задней и передней полусферах (ЗПС и ППС). Шаг изменения угла визирования задается в зависимости от целей испытаний и испытательной аппаратуры.

Измерение характеристик ИК-излучения проводится в спектральных диапазонах чувствительности приемников излучения головок самонаведения управляемых ракет (1,8–3,2 мкм; 3,5–5,5 мкм; 6–14 мкм).

Последовательность операций в процессе ИК-измерений при фиксированном угле визирования для каждого режима работы двигателя (СУ ЛА) следующая:

наводка ИП (радиометра, спектрорадиометра, тепловизора) на объект испытаний с помощью визирного устройства или по максимальному сигналу и установка необходимой чувствительности прибора;

измерение ИК-излучения фона при неработающем двигателе, если такая возможность обеспечивается ИП;

вывод двигателя на требуемый режим, его стабилизация в течение необходимого времени и регистрация основных параметров данного режима (частоты вращения роторов, температуры газов за турбиной, расхода топлива и др.);

измерение ИК-излучения с регистрацией выходного сигнала ИП на соответствующем регистраторе.

При наличии искусственных помех (шумов) последние две операции повторяются несколько раз.

Если двигатель (ЛА) оборудован системой подавления ИК-излучения, то сначала измеряют излучение объекта при неработающей системе, а затем, не меняя режим работы двигателя и не производя никаких регулировок, – при работающей системе подавления.

Кроме ИК-характеристик и параметров работы двигателя, в процессе испытаний необходимо измерять и регистрировать следующие характеристики:

температуру элементов выходного устройства СУ;

полное давление на срезе сопла;

температуру, относительную влажность и давление атмосферного воздуха;

діаметр критического сечения и среза сопла;
расстояние от ИП до объекта испытаний и угол визирования.

Дополнительно к указанным параметрам целесообразно (в зависимости от цели испытаний или исследований) фиксировать такие характеристики, как:

статическую температуру струи и ее распределение по сечению и длине в количестве не менее 150 точек;

метеорологическую дальность видимости;

другие параметры (в зависимости от вида и целей испытаний).

Выводы. Приведенную выше методику можно использовать на всех видах испытаний опытных, модифицированных и серийных (в случае доработки) летательных аппаратов, авиационных двигателей или силовых установок для оценки их характеристик тепловой заметности (ИК-характеристик). Также можно использовать на более ранних этапах опытно-конструкторских работ по созданию новых образцов СУ (ЛА), например, при автономной отработке объекта и при проведении специальных испытаний и исследований физических моделей выходного устройства СУ по оценке эффективности мероприятий по снижению ИК-излучения авиационных двигателей.

Литература

1. Криксунов Л.З. Тепловизоры. Киев: Техника, 1987.
2. Кучин В.Л., Криксунов Л.З., Волков В.А., Мехряков В.И., Рябышко В.А. Справочник по приборам инфракрасной техники / Киев: Техника, 1980.

УДК 629.735.45

Башинський В.Г., Камак Ю.О.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДВИГУНІВ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ВИПРОБУВАНЬ

У статті пропонується типова методика визначення теплової помітності силових установок літальних апаратів, яка використовується для оцінки ефективності заходів щодо зниження інфрачервоного випромінювання.

Bashinskii V.G., Kamak Y.O.

TECHNIQUE DEFINITION OF INFRA-RED RADIATION OF ENGINES FLYING MACHINE AT CARRYING OUT OF TESTS

In article the typical technique of definition thermal заметности power-plants of the flying machines, applied to an estimation of efficiency of actions for decrease in infra-red radiation is offered.