

УДК 519.2(875.8)

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arise/teje/1073.html>

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ СУБЛИМИРУЮЩИХ ТЕЛ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОТОКОМ ГАЗА

Э. Баттулга^{1,2}sidn_ni@mail.ru
enhee_jrgl@yahoo.com
SPIN-код: 8882-1489¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² Монгольский университет науки и технологии, Улан-Батор, Монголия

Изложен статистический подход к экспериментальному исследованию распределения тепловых потоков на поверхности проницаемых тел при обтекании потоком газа. Основное внимание уделено статистической обработке результатов измерения при различных параметрах потока. Показана существенная роль статистического анализа при обработке результатов экспериментальных измерений параметров газа по поверхности тела. Выявлены уровни сложности элементов, даны количественные оценки коэффициентов теплопередачи и достоверности полученных оценок. Разработаны положения теории подобия и для безразмерных критериев. Получено решение задачи как для линейных, так и для нелинейных газодинамических систем, что существенно расширяет возможности практического использования методов выявления потенциальных дефектов. Представленные в статье материалы и опыт применения различных методов выявления потенциальных дефектов позволяют с достаточной достоверностью выявить качественную оценку эффективности различных видов испытаний при отбраковке элементов температурных датчиков, содержащих потенциальные дефекты.

Ключевые слова: летательный аппарат, тепловой поток, аэромеханика, обтекание потоком газа, поверхностный массообмен

Введение. При разработке и проектировании современных высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) особое значение имеют правильная оценка и учет воздействия различного по интенсивности и распределению по поверхности тела массопотока в пограничный слой на распределенные и интегральные характеристики ЛА. Проведенный анализ опубликованных экспериментальных и теоретических работ [1–4] показывает, что в настоящее время отсутствуют систематические данные по исследованию влияния различных определяющих параметров (чисел M_∞ и Re_∞ , температуры и т. д.) на сверхзвуковое обтекание ЛА. Повышенный интерес к проблеме входа в атмосферу ЛА с высокими скоростями требует разрешения некоторых основных вопросов, касающихся перехода пограничного слоя при сверхзвуковых

числах Маха. Особый интерес вызывает процесс сублимации теплозащитного материала, поскольку большинство материалов разрушается именно таким образом. Влияние массообменных явлений в пограничный слой связано с сублимацией тепловой защиты летательного аппарата.

Экспериментальному изучению влияния поверхностного массообмена на трение и теплопередачу на поверхности ЛА, обтекаемых сверхзвуковым потоком, посвящено множество работ [1–4]. Установлено, что при турбулентном режиме течения в пограничном слое поверхностный массообмен приводит к снижению тепловых потоков к стенке вследствие изменения профилей скорости и температуры в пограничном слое [2–4].

По мере увеличения интенсивности массопереноса пограничный слой оттесняется от поверхности, вблизи нее формируется слой вдуваемого газа и тепловые потоки уменьшаются вплоть до нулевых значений [3]. Однако даже при интенсивном массообмене, когда пограничный слой оттесняется от поверхности и трение на ней становится нулевым, получены конечные (хотя и небольшие) значения коэффициента теплопередачи, что объясняется сохранением теплообмена благодаря излучению высокоэнтальпийного ударного слоя и теплопроводности вдуваемого газа [4].

Регистрация изменения температур поверхности и теплового потока в газодинамическом эксперименте (особенно в течение коротких временных периодов набегания потока) является одним из наиболее существенных факторов при постановке и проведении исследований теплопередачи в дозвуковых и сверхзвуковых течениях.

Материалы и методы. Согласно теории подобия, исследования на аэродинамических моделях следует проводить в том же диапазоне изменения определяющих критериев подобия, что и для натурального аппарата. Однако выполнить полное параметрическое исследование процесса теплообмена в натуральных условиях на аэродинамических моделях с установлением количественной связи между критериями в большинстве случаев невозможно. Поэтому условия испытаний на аэродинамических моделях выбирают на основании результатов предварительного анализа, исследований в аэродинамических трубах и приборной базы [4].

Траекторию движения ЛА для исследования выбирают таким образом, чтобы, с одной стороны, она включала наиболее характерные по теплонапряженности участки, а с другой стороны, было возможно сопоставить результаты летных исследований с результатами, полученными в аэродинамических трубах и расчетным путем. С этой целью датчики температуры размещают на моделях в зависимости от целей и задач исследований. При выборе мест расположения датчиков температуры необходимо учитывать особенности нагрева

ЛА, связанные с наличием зон повышенного нагрева, возникающих при взаимодействии скачков уплотнения с пограничным слоем, отрыве и присоединении потока и т. п. Указанные особенности выявляют на основе анализа результатов экспериментальных исследований на стендах и теоретических исследований [5–9]. Необходимо иметь в виду, что число размещаемых на модели измерительных датчиков, как правило, ограничено располагаемым объемом. В связи с этим датчики следует располагать так, чтобы получить наиболее полную картину аэродинамического нагрева поверхности модели.

Точность измерения температуры при летных исследованиях существенно зависит от правильного выбора диапазона измерений. Ожидаемый диапазон влияет на выбор как методов и средств измерений температуры, так и характеристик соответствующих согласующих устройств. Диапазон измерения температуры в каждой точке определяют на основе анализа результатов, полученных при расчете аэродинамического нагрева поверхности, с использованием имеющихся априорных данных о характеристиках теплообмена в рассматриваемой точке.

В настоящее время наиболее широкое применение при летных исследованиях нашли контактные методы измерения температуры с помощью термометров сопротивления, термопар, термоиндикаторов (термочувствительных красок, термоиндикаторов плавления, измерителей максимальной температуры).

Принцип действия термометров, как известно, основан на свойстве проводников или полупроводников изменять свое сопротивление при изменении температуры. При проведении летных исследований нередко возникает необходимость применять термометры сопротивления, которые по своим характеристикам и конструктивному исполнению отличаются от выпускаемых промышленностью. В этом случае важно правильно выбрать параметры термометра сопротивления, его размеры и чувствительность [4]. Эти параметры датчика в большой степени зависят от сопротивления чувствительного элемента при нулевой температуре.

Сопротивление термометра сопротивления при нулевой температуре определяется по известной формуле $R_0 = \Delta R_{\text{изм}} / \alpha(t_{\text{е}} - t_{\text{н}})$, где $\Delta R_{\text{изм}}$ — допустимый разбаланс измерительного моста; $t_{\text{е}}$ — верхний предел измерения температуры; $t_{\text{н}}$ — нижний предел измерения температуры; α — термический коэффициент сопротивления материала чувствительного элемента.

Если применять термометры сопротивления, параметры которых определяются по предложенной формуле, невозможно или нецелесообразно, необходимо использовать готовый датчик с известным значением сопротив-

ления в комплекте с выбранным измерительным мостом. Сопряжение термометра сопротивлением с согласующим устройством осуществляется следующим образом. Выбирают значение температуры, при котором измерительный мост согласующего устройства должен быть сбалансирован. Это значение температуры в любом случае должно быть несколько ниже нижнего предела измерения.

При аэродинамических тепловых исследованиях на моделях наряду с измерением температурных полей элементов конструкции ЛА возникает необходимость в изучении процессов теплообмена между воздушным потоком в пограничном слое и поверхностью аппарата, т. е. экспериментального определения коэффициента или конвективного теплового потока в условиях, как правило, неустановившегося теплового режима [4]. Одним из способов определения конвективного теплового потока является применение различного рода вставок, устанавливаемых заподлицо с наружной поверхностью обшивки модели. Вставки могут иметь различную конструкцию.

Один из возможных вариантов конструкции датчика теплового потока показан на рис. 1. Для уменьшения методической погрешности измерений теплоприемник датчика теплового потока должен удовлетворять следующим требованиям [5]: толщину и материал теплоприемника следует выбирать исходя из условия примерного равенства температур поверхности теплоприемника и окружающей обшивки; число Био для выбранного теплоприемника и условий летного эксперимента должен быть достаточно малым, т. е. $Bi_i = \alpha \delta / \lambda_T < 1$, где α — коэффициент теплообмена; δ — толщина стенки теплоприемника; λ_T — теплопроводность материала теплоприемника.

Определение теплового потока существенно упрощается, если удастся обеспечить равномерное поле температур в теплоприемнике. В этом случае удельный тепловой поток к поверхности теплоприемника определяется по формуле $q_{\text{конг}} = cp\delta(dT_w/dT) + \epsilon_w \sigma (T_w/100)^4$, где c , p — теплоемкость и плотность материала теплоприемника; σ — коэффициент излучения абсолютно черного тела; ϵ_w — коэффициент степени черноты поверхности; T_w — температура наружной поверхности теплоприемника; dT_w/dT — скорость изменения температуры наружной поверхности теплоприемника. При выполнении указанных требований измерение температуры наружной поверхности можно заменить измерением ее в любой точке модели, поскольку при малых числах Био температура и скорость изменения ее в любой точке теплоприемника практически постоянны.

Таким образом, при применении калориметрического датчика для измерения теплового потока в необходимо измерять температуру теплоприемни-

ка и знать зависимость коэффициента степени черноты поверхности теплоприемника от температуры. В частном случае, когда удастся обеспечить постоянное значение температуры теплоприемника, калориметрический датчик становится датчиком равновесного теплового потока $q_{\text{конг}} = \epsilon_w \sigma (T_w/100)^4$. Интенсивность поверхностного массообмена выражена безразмерным параметром вдува $(\bar{\rho v})_{\text{вд}} = (\rho v)_{\text{вд}} / (\rho u)_{\infty}$, где v и u — скорость вдуваемого газа и набегающего потока соответственно; ρ — плотность (индексы ∞ и вд соответствуют параметрам набегающего потока и вдуваемого газа).

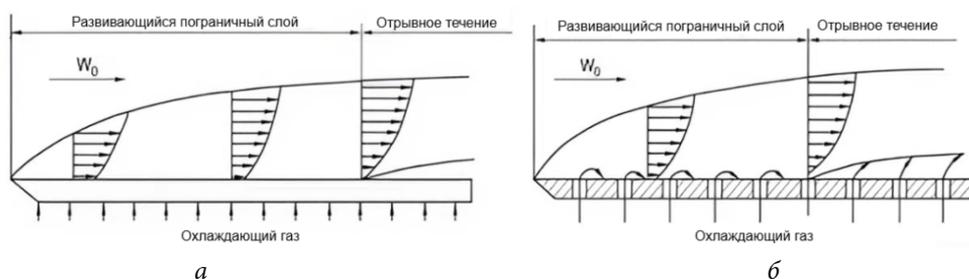


Рис. 1. Экспериментальная модель для исследования пористого охлаждения [5]: вдув газа в пограничный слой через пористую (а) и перфорированную (б) стенку

Значение удельных массовых расходов вдуваемого газа определяют по формуле $\rho_{\text{вд}} v_{\text{вд}} = Q / F_{\text{пр}}$, где Q — суммарный массовый расход; $F_{\text{пр}}$ — характерная площадь (площадь проницаемой поверхности модели).

Методика измерений и обработка результатов эксперимента. Для измерения удельных тепловых потоков предложен метод регулярного режима [4]. Уравнение теплового баланса, связывающее количество теплоты, поступившей через поверхность проницаемой оболочки $F_{\text{пр}}$, с изменением энтальпии газа, имеет вид $a(T_w - T)F_{\text{пр}} = \rho c V (dT/d\tau)$. Здесь V — объем проницаемой оболочки; ρ — плотность; a — коэффициент теплоотдачи; T — температура произвольной точки тела, T_w — температура потока на поверхности датчика (рис. 2), установленного на модели.

Считая теплофизические характеристики системы постоянными и введя переменную $\theta = T_w - T$, получим уравнение $\theta = \theta_0 e^{-m\tau}$, где постоянная $m = aF_{\text{пр}} / (\rho c V)$ представляет собой темп охлаждения. Здесь θ_0 — начальное значение при времени $\tau = 0$.

При воздействии на датчик удельного теплового потока \dot{q} время наступления режима регулярного нагрева датчика τ_p определяется по формуле $\tau_p \approx l_k^2 c_k \rho_k / (6\lambda_k)$, где l_k — линейный размер калориметрической массы; ρ_k, c_k, λ_k — его плотность, удельные теплоемкость и теплопроводность (см. рис. 2).

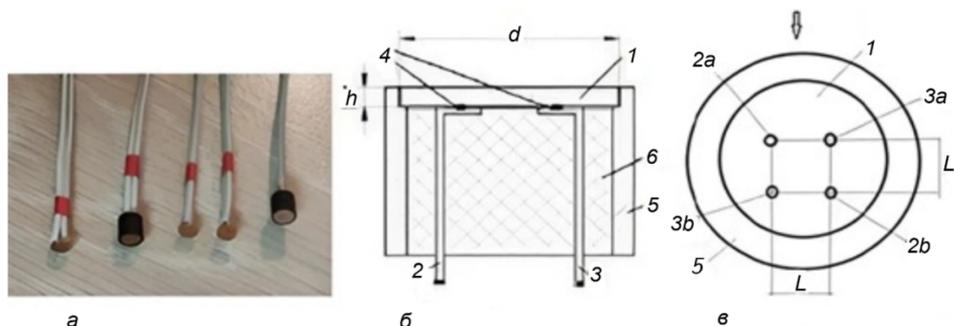


Рис. 2. Фото (а) и эскизы (б, в) калориметрических датчиков:

а — с парой электродов; б — с двумя парами электродов; 1 — медный диск (таблетка), 2 — электрод-хромель (-), 3 — электрод-копель (+), 4 — сварка серебром, 5 — изоляционная втулка, б — эпоксидная смола; стрелкой показано направление потока

Если тепловые потери малы, то в режиме регулярного нагрева темп роста температуры калориметрической массы практически прямо пропорционален тепловому потоку \dot{q} [1, 5]: $dT/d\tau = F_k \dot{q} / (\rho_k V_k c_k)$. Здесь F_k — поверхность калориметрического датчика. Для оценки числа Био необходимо знать значение коэффициента теплоотдачи. Так, удельный тепловой поток по поверхности модели определяется зависимостью $\dot{q}_w = -0,76(\text{Pr})^{-0.6} (\rho_w \mu_w / \rho_\delta \mu_\delta)^{0.1} \times \sqrt{\beta_i \rho_\delta \mu_\delta} [H_\delta - c_p T_w]$. Здесь индексы w и δ относятся к параметрам на стенке и на внешней границе пограничного слоя соответственно; $\beta_i = (a_0/R_0) \sqrt{(1-p_1/p'_0) \cdot 2/k}$; a_0 — скорость звука в условиях торможения; H — энтальпия; R_0 — радиус затупления в критической точке; k — отношение удельных теплоемкостей; p_1, p'_0 — статическое давление и давление за прямым скачком [4, 5].

Значения коэффициента динамической вязкости μ , удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении C_p известны. Удельный тепловой поток в точке полного торможения вычисляли по формуле $\dot{q}_0 = -0,763(\text{Pr})^{-0.6} \times$

$$\times \sqrt{\rho_{\delta} \mu_{\delta} \tilde{\lambda} c_p [T_{\delta} - T_w]}, \text{ где } \tilde{\lambda} = \frac{u_{\infty}}{2R_0} \left[\frac{8((k-1)M_{\infty}^2 + 2)}{(k+1)M_{\infty}^2} \left[1 + \frac{k-1}{2} \frac{(k-1)M_{\infty}^2 + 2}{2kM_{\infty}^2(k-1)} \right]^{-(k-1)} \right]^{0.5};$$

u_{∞} — скорость набегающего потока, k — отношение удельных теплоемкостей; M_{∞} — число Маха. Для калориметрического цилиндра высотой $l_k = 1$ мм, выполненного из меди, значение $Bi = 1,46 \cdot 10^3$ и время выхода на регулярный режим нагрева оказывается равным $\tau_p = 1,46 \cdot 10^{-3}$ с. Датчики для измерения удельных тепловых потоков были вставлены в текстолитовый вкладыш и тщательно заделаны заподлицо с наружной поверхностью (см. рис. 2).

Причины ускорения процессов развития потенциальных дефектов.

Отметим обстоятельство, которое необходимо учитывать при оценке влияния термодинамических процессов на скорость развития потенциальных дефектов температурных датчиков. В ряде случаев наблюдаются существенные расхождения между теоретическими оценками и экспериментальными результатами. По мере понижения температуры скорость развития потенциальных дефектов должна очень быстро падать, при этом расчетная степень увеличения ресурса настолько велика, что полученные результаты представляются нереальными. Таким образом, чем ниже температура, при которой проводится какое-либо наблюдение, тем меньше энергия активации процесса. Температурная зависимость скорости какого-либо сложного процесса в широком интервале температур в первом приближении может быть описана степенным законом. Применяв этот подход к анализу физических процессов развития потенциальных дефектов, получим зависимость долговечности надежности тепловых датчиков [13] (величины, обратной скорости развития потенциальных дефектов) от их максимальной рабочей температуры (рис. 3). Анализ предложенной зависимости показывает, что долговечность различных датчиков значительно изменяется от степень максимальной рабочей температуры.

На рис. 4 показана область изменения интенсивности отказов датчиков от температуры и прямая I , соответствующая энергии активации в 1 эВ. Интенсивность отказов элементов связана с наличием и скоростью развития скрытых и потенциальных дефектов, поэтому ее можно рассматривать как интегральную характеристику наличия дефектов и кинетики дефектообразования [13]. Анализ зависимости, изображенной на рис. 4, показывает, что $\lambda = f(T_{пер})$ может быть аппроксимирована функцией $\lambda = BT^{-6}$, где T — температура среды; B — коэффициент пропорциональности, равный для рассматриваемого класса датчиков $(0,4...0,9) \cdot 10^{-22}$. Наклон прямых, ограничиваю-

щих области значений λ , отличается от наклона прямой для $E_a = 1$ эВ, что можно объяснить следующим образом. Прямая для $E_a = 1$ эВ в основном отражает механизмы отказов, связанные с процессами развития дефектов в датчике, которые в среднем имеют энергию, близкую к 1 эВ. При практическом использовании зависимостей, показанных на рис. 3 и 4, следует принимать во внимание как отработанность конструкции моделей датчиков, так и степень совершенства технологических процессов их изготовления.

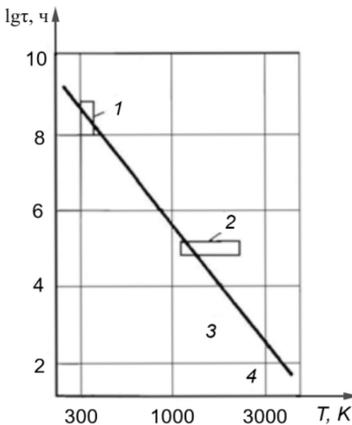


Рис. 3. Зависимость долговечности различных элементов датчика от максимальной рабочей температуры:

1 — температурные датчики ($T = 300$ К, $\tau = 10^8 \dots 10^9$ ч); 2 — электровакуумные приборы ($T = 1000 \dots 1800$ К, $\tau = 1 \cdot 10^5$ ч); 3, 4 — лампы накаливания ($T = 2800 \dots 3000$ К; $\tau = 20 \dots 1000$ ч)

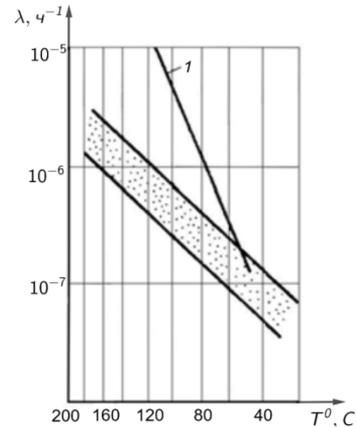


Рис. 4. Зависимость отказов датчиков от температуры

На основании изложенного может быть предложен интегральный критерий для объективной оценки степени совершенства технологического процесса изготовления температурных датчиков в виде соотношения $K_C = \alpha_T / \alpha_p$, где α_T — угол наклона прямой, описывающей в полулогарифмическом масштабе теоретическую зависимость рассматриваемого параметра от температуры; α_p — угол наклона прямой, описывающей в полулогарифмическом масштабе реальную зависимость рассматриваемого параметра от температуры. Чем ближе значение K_C к единице, тем более совершенны конструкция датчика и технологические процессы его установки. Если физическая природа уско-

ряющих воздействий выбрана, то следующей задачей при разработке методов прогнозирования отказов температурных датчиков является нахождение зависимости для параметров элементов, изменяющиеся в результате развития потенциальных дефектов:

$$R = f(V_{\Sigma}, \tau), \tag{1}$$

где V_{Σ} — параметры ускоряющих воздействий; τ — время.

Коэффициент ускорения имеет вид:

$$K_y(\tau) = \frac{f(V_{\Sigma_3}, \tau_3)}{f(V_{\Sigma_{и}}, \tau_{и})}, \tag{2}$$

где V_{Σ_3} и $V_{\Sigma_{и}}$ — соответствующие параметры дестабилизирующих воздействий при эксплуатации и испытаниях; τ_3 и $\tau_{и}$ — соответственно время эксплуатации и испытаний.

Теоретические методы определения $K_y(\tau)$ в общем виде для сложных элементов еще не разработаны [7–10]. Определение зависимостей (1) и (2) экспериментальными методами сопряжено со значительными временными и экономическими затратами, а получаемые при этом результаты не обладают приемлемой общностью и могут быть использованы только для тех конкретных типов элементов датчиков, для которых они получены. Идея наиболее общего метода решения указанной задачи, в котором сочетаются аналитическое рассмотрение и широкое привлечение экспериментальных материалов, основано на использовании положений неравновесной термодинамики, ряда методов теории подобия [10–12]. Если развитие потенциальных дефектов определяется конечной совокупностью происходящих в элементах физических (физико-химических) процессов с характеристиками ($W_1, W_2, \dots, W_{\xi}, \dots, W_{\omega}$), причем W_{ξ} характеристик является независимыми, и если уравнение, описывающее развитие дефектов, представлено в виде

$$L(W_1, W_2, \dots, W_{\xi}, \dots, W_{\omega}), \tag{3}$$

то его решение может быть представлено в виде функции от $W_i - W_{\xi}$ безразмерных параметров (критериев подобия)

$$L(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_j, \dots, \pi_{W_i - W_{\xi}}), \tag{4}$$

где π_j — j -й критерий подобия, определяемый как безразмерный степенной комплекс следующего вида:

$$\pi_j = \tau^{\alpha_j, \alpha}, W^{\alpha_j, 1}, W^{\alpha_j, 2}, \dots, W_{\xi}^{\alpha_j, \xi}, \dots, W_{\omega}^{\alpha_j, \omega}, \tag{5}$$

где α_j, ξ — действительные числа; $j = 1, 2, \dots, W_i - W_\xi$ — число критериев подобия. Если в качестве обобщенной меры развития потенциальных дефектов выбрать величину

$$\pi_0 = - \int_0^\tau \frac{1}{\Delta A} \frac{\partial(\Delta A)}{\partial \tau} d\tau, \quad (6)$$

то решение уравнения (3) можно, согласно (4), записать в виде

$$\pi_0 = L'(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_j, \dots, \pi_{W_i - W_\xi}), \quad (7)$$

Теория подобия позволяет получить критерии подобия для большинства перечисленных процессов, причем критерии подобия (5) имеют аналогичную структуру (6) и могут быть записаны как

$$\pi_j = B_j F_j(T) \tau \gamma_j \quad (j = 1, 2, \dots, W_i - W_\xi), \quad (8)$$

где B_j — коэффициенты пропорциональности; F_j — функции, зависящие от температуры; γ_j — величины, зависящие от геометрических размеров дефектов датчиков.

Для определения характера функции L' разложим правую часть уравнения (7) в ряд Тейлора и ограничимся первыми членами разложения:

$$\pi_0 = \sum_{j=1}^{W_i - W_\xi} \frac{\partial L'}{\partial \pi_j} \Delta \pi_j, \quad (9)$$

где $\Delta \pi_j$ — конечное приращение j -го критерия (8).

Полагая, что граничные и начальные условия этих уравнений не зависят от условий испытаний и определяются лишь начальным распределением концентраций и дефектных областей Q' , уравнение (9) можно записать в виде [13]

$$\pi_0 = \sum_{j=1}^{\pi_1} C_{j_1} \pi_{j_1} + \sum_{j=1}^{\pi_2} C_{j_2} \pi_{j_2} + \dots + \sum_{j=1}^{\pi_q} C_{j_q} \pi_{j_q} + \sum_{j=1}^{\pi_p} C_{j_p} \pi_{j_p}, \quad (10)$$

где C_{j_q} — постоянная; π_q — количество процессов q -го типа; $\pi_1 + \pi_2 + \dots + \pi_q + \dots + \pi_p = \pi$ — общее количество происходящих процессов. Подставляя в (10) уравнение (8), получим

$$\begin{aligned} \pi_0 = & \sum_{j=1}^{\pi_1} C_{j_1} B_{j_1} F_{j_1}(T) \tau \gamma_{j_1}^1 + \sum_{j=1}^{\pi_2} C_{j_2} B_{j_2} F_{j_2}(T) \tau \gamma_{j_2}^2 + \dots + \\ & + \sum_{j=1}^{\pi_q} C_{j_q} B_{j_q} F_{j_q}(T) \tau \gamma_{j_q}^q + \dots + \sum_{j=1}^{\pi_p} C_{j_p} B_{j_p} F_{j_p}(T) \tau \gamma_{j_p}^p. \end{aligned} \quad (11)$$

Уравнения (10), (11) получены в предположении, что все происходящие процессы могут быть подразделены на q групп по принципу схожести энергий активации и аналогичной структуры функции $F_j(T)$ и $\tau \gamma_j$. Это допущение принято называть многогрупповым приближением. Если допустить, что происходящие процессы являются термоактивными и для них справедливо уравнение (11), то это уравнение может быть преобразовано к виду интенсивности изменения параметров элементов:

$$R(T\tau) = \sum_{j=1}^{\pi_1} R_{j_1} C_{j_1} \exp\left\{-\frac{E_{a_j^1} T_0 - T}{k T \cdot T}\right\} + \sum_{j=1}^{\pi_2} R_{j_2} C_{j_2} \exp\left\{-\frac{E_{a_j^2} T_0 - T}{k T \cdot T}\right\} + \dots +$$

$$+ \sum_{j=1}^{\pi_q} R_{j_q} C_{j_q} \exp\left\{-\frac{E_{a_j^q} T_0 - T}{k T \cdot T}\right\} + \dots + \sum_{j=1}^{\pi_p} R_{j_p} C_{j_p} \exp\left\{-\frac{E_{a_j^p} T_0 - T}{k T \cdot T}\right\}, \tag{12}$$

где T_0, T — соответственно эксплуатационная и испытательная температура; R_{j_q} — интенсивность изменения параметров при $T = T_0$, обусловленная процессами q -й группы; $E_{a_j^p}$ — энергия активации p группы.

В тех случаях, когда число оказывающих определяющее влияние на развитие потенциальных дефектов процессов ограничено и эти процессы происходят одновременно, уравнение (12) упрощается и может быть представлено как

$$R(T\tau) = \sum_{j=1}^{\pi_1} R_{j_1} \exp\left\{\frac{E_{a_j^1} T_0 - T}{k T T_0}\right\} + \sum_{j=1}^{\pi_2} R_{j_2} \exp\left\{\frac{E_{a_j^2} T_0 - T}{k T T_0}\right\} \sqrt{\frac{T_0}{T}} +$$

$$+ \sum_{j=1}^{\pi_3} R_{j_3} \exp\left\{\frac{E_{a_j^3} T_0 - T}{k T T_0}\right\} \tau^{\gamma_{j_3} - 1} + \sum_{j=1}^{\pi_4} R_{j_4} \exp\left\{\frac{E_{a_j^4} T_0 - T}{k T T_0}\right\}. \tag{13}$$

Допустив, что множителем $\sqrt{T_0/T}$ (12) можно пренебречь, а при T , близких к T_0 , величину $R(I, \tau)$ можно считать примерно постоянной, преобразуем уравнение (13) к виду

$$R(z) \approx \sum_{j=1}^p R_j \exp(F_j z) + \phi_j(z, \tau),$$

где p — число групп энергий активации; $F_j = \frac{E_{a_j}}{k}$; $z = \frac{T - T_0}{T T_0}$; R_j — суммарная интенсивность развития потенциальных дефектов в результате развития

процессов j -й группы; $\varphi_j(z, \tau)$ — группа слагаемых, зависящих от температуры и времени. В полученных соотношениях реальное распределение процессов и степень их влияния на развитие потенциальных дефектов учитываются множителями $(R_{j_1}, \dots, R_{j_2}, \dots, R_{j_q}, \dots, R_{j_p})$. Влияние электромагнитных факторов учитывается как указанными множителями, так и эффективными значениями энергий активации, что согласуется с понятиями воздействий электромагнитных факторов с помощью двух механизмов [13, 14] и дополнительным повышением температуры за счет джоулева тепла и термомагнитных, термоэлектрических перекрестных эффектов.

Уровни сложности элементов, количественные оценки коэффициентов ускорения и достоверность полученных оценок, в конечном счете, зависят от возможности экспериментального и (или) теоретического определения величин $(R_{j_q}, E_{q_i}, \gamma_{j_q}, p)$.

Использование положений теории подобия и введение безразмерных критериев на основании π -теоремы позволяют как распространять результаты, полученные при экспериментальных и/или теоретических исследованиях для конкретных типов аэродинамических моделей, на целый ряд подобных устройств (элементов), так и обобщать результаты, полученные при исследовании наиболее простых элементов, для более сложных элементов структур. При этом методами современной теории подобия можно решать указанные задачи как для линейных, так и для нелинейных физических систем, что существенно расширяет возможности практического использования методов выявления потенциальных дефектов при снижении затрат на разработку программ таких испытаний.

Несмотря на принципиальную возможность экспериментально-теоретического определения значений $K_y(\tau)$ можно получить достаточно точные количественные оценки коэффициентов ускорения развития потенциальных дефектов для простых элементов. Это объясняется, в первую очередь, недостаточным знанием закономерностей дефектообразования в реальных датчиках, а также сложностью и высокой стоимостью экспериментального получения таких оценок. Однако не следует делать вывод о нецелесообразности практического применения ускоряющих испытаний только на том основании, что они в настоящее время не дают точных количественных результатов.

Используя имеющиеся материалы и опыт применения различных методов выявления потенциальных дефектов, можно с достаточной достоверностью дать качественную оценку эффективности различных видов испытаний при отбраковке элементов температурных датчиков, содержащих потенциальные дефекты. Пример такой оценки для тепловых датчиков и микросхем приведен в таблице.

Результаты оценки тепловых датчиков и микросхем

Вид испытаний	Вид отказов и дефектов								
	Обрыв внутренних соединений	Короткое замыкание соединений	Наличие посторонних частиц	Поверхностные дефекты	Дефекты сборки и монтажа	Нарушение внешней оболочки	Дефекты корпуса	Дефекты внешних выводов	Некачественные покрытия
Внутренний визуальный осмотр	-	-	-	+	+	-	-	-	-
Внешний визуальный осмотр	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Высокотемпературная эксплуатация	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Термоудар	-	-	-	+	+	-	-	-	+
Механический удар	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<p><i>Примечание.</i> Знак плюс означает возможность обнаружения вида дефектов методом неразрушающего контроля, минус — отсутствие такой возможности.</p>									

Из таблицы видно, что для эффективного выявления элементов, содержащих потенциальные дефекты, необходимо использовать комплекс испытаний и диагностирующих средств, при этом в целом ряде случаев существенной оказывается и последовательность проводимых испытаний [15]. В общем случае скорость развития потенциальных дефектов, обусловленных термоактивируемыми процессами, зависит как от значений температуры, так и от величин температурных градиентов. В терминах неравновесной термодинамики, это объясняется тем, что термодинамические потоки, обусловленные термоактивационными процессами, как правило, обратно пропорциональны первой (или второй) степени температуры и прямо пропорциональны температурным градиентам. Поэтому можно сделать вывод об ускоренном выявлении потенциальных дефектов путем многократных поочередных воздействий на элементы повышенной и пониженной температур (так называемого термоциклирования). Так, при многократном термоциклировании (800 термоциклов) в диапазоне от минус 55 до 70 °С (скорость изменения от 1 до 5 °С/мин) в процессе отработочных испытаний удается интенсифицировать развитие механизмов отказов, для проявления которых в нормальных климатических условиях необходимо более 50 тыс. ч.

Как уже отмечалось, после проведения испытаний, в процессе которых обеспечена интенсификация развития потенциальных дефектов, элементы должны подвергаться сплошному контролю, при котором фиксируются все возможные вариации их параметров, свойств и характеристик. При этом применяют как методы диагностики, используемые для выявления явных дефектов, так и методы неразрушающего диагностирования [16, 17]. Наибольшее распространение находят методы электрофизических параметров.

Получение объективной и достоверной информации о механизмах и типах отказов датчиков требует вполне определенной методологии исследований, сложных и, как правило, дорогостоящих диагностирующих средств и квалифицированных инженерно-технических кадров, обладающих достаточными знаниями как в области технологии изготовления элементов, так и в области радиоприборостроения [18].

Только совместные усилия изготовителей температурных датчиков и аппаратуры, оперативный и исчерпывающий обмен информацией о типах, механизмах и причинах отказов, объективный и достоверный анализ причин отказов и совместные мероприятия по их устранению гарантируют прогресс в деле повышения надежности измерений в аэромеханике.

Заключение. По итогам исследования можно подчеркнуть, что задача технического контроля ограничивается указанием на возможные неполадки в теплотехническом эксперименте. Выявление причин этих неполадок и устранение их представляют собой в основном технические функции, т. е. входят в задачи инженера. Надлежащий порядок контроля качества позволяет уменьшить долю брака путем его профилактики и предупреждать о предстоящих неполадках. Для этого нужно указать дефекты в аэродинамических исследованиях путем составления «истории» аппаратуры, «истории» экспериментальных процессов, а также обнаружить возможность усовершенствования методов или процессов обработки в последующих партиях тепловых датчиков, увеличить количество и снизить в целом себестоимость экспериментов при одновременном улучшении их качества.

Статистический контроль доли брака или чаще применяемый статистический контроль частоты брака организуется так же, как и контроль ранее рассмотренных статистических характеристик. Статистический контроль доли или частоты брака в ходе испытаний может быть как сплошным, так и выборочным. Обычно проверяют долю или количество дефектных датчиков в последовательно равновеликих партиях датчиков. После проведения статистического контроля рекомендуется снова выверить и уточнить значения принятых параметров. Задача математической статистики заключается в том, чтобы при возможно меньшем объеме выборки обеспечить достаточно эф-

фективный метод контроля качества датчиков в партии по качеству датчиков в выборке.

Поскольку исследование отказавших элементов часто связано с проведением разрушающих испытаний, целесообразно установить определенную последовательность работ, чтобы исключить возможность потери информации из-за нерационального распределения операций по различным стадиям. В этом смысле определенный интерес представляет методика анализа отказавших датчиков, изложенная в стандарте США MIL STD-883. Указанная методика дополняет соответствующие разделы материалами об используемых диагностирующих средствах и детализирует описания выявленных дефектов. Отметим, что хотя в указанной методике описан анализ отказавших датчиков, тем не менее многие положения этой методики оказываются справедливыми и при анализе других типов элементов и, в первую очередь, теплотехнических приборов. Исследования по предложенной методике предполагают минимальные диагностику и количество диагностирующих средств.

Дополнительные измерения электрических параметров проводят специально для выявления обрывов и коротких замыканий. Контролируют сопротивление изоляции между корпусом (крышкой корпуса) и каждым электрически разобленным выводом, а также отсутствие коротких замыканий (или отклонений от требуемых характеристик) между каждой парой выводов и/или каждым выводом, корпусом (оболочкой корпуса). Внутренний осмотр после вскрытия корпуса датчика проводят с помощью оптических средств, обеспечивающих увеличение не менее чем в 30 раз. Электрические характеристики измеряют с помощью как специализированной контрольно-измерительной и контрольно-испытательной аппаратуры, используемой при выходном и входном контроле, так и стандартных измерительных средств.

Литература

- [1] Сидняев Н.И. Обзор методик исследования обтекания гиперзвуковым потоком газа тел с разрушающимся покрытием. *Теплофизика и аэромеханика*, 2004, т. 11, № 4, с. 501–522.
- [2] Зинченко В.И., Гольдин В.Д. Способы снижения максимальных температур поверхности тел из комбинированных материалов при их гиперзвуковом обтекании. *Инженерно-физический журнал*, 2024, т. 97, № 4, с. 1012.
- [3] Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. *Тепловая защита*. Москва, Энергия, 1976, 392 с.
- [4] Сидняев Н.И. *Обтекание гиперзвуковых летательных аппаратов в условиях поверхностного разрушения*. Москва, Физматлит, 2017, 302 с.
- [5] Сидняев Н.И. *Теория вероятностей и математическая статистика*. Москва, Юрайт, 2011, 310 с.

- [6] Сидняев Н.И. *Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных*. Москва, Юрайт, 2011, 399 с.
- [7] Выгодчикова И.Ю. *Алгоритм оценки параметров линейной множественной модели регрессии по минимаксному критерию*. Москва, Синергия, 2019, 216 с.
- [8] Дрейпер Н., Смит Г. *Прикладной регрессионный анализ*. Москва, Вильямс, 2007, 912 с.
- [9] Мещеряков В.В. *Задачи по статистике и регрессионному анализу с MATLAB*. Москва, Диалог-Мифи, 2019, 448 с.
- [10] Алабин М.А., Ройтман А.Б. *Корреляционно-регрессионный анализ статистических данных в двигателестроении*. Москва, Машиностроение, 2019, 124 с.
- [11] Горлач Б.А. *Теория вероятностей и математическая статистика*. Санкт-Петербург, Лань, 2013, 320 с.
- [12] Кобзарь А.И. *Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2012, 816 с.
- [13] Сидняев Н.И., Садыхов Г.С., Савченко В.П. *Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 382 с.
- [14] Сидняев Н.И. *Статистический анализ и теория планирования эксперимента*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 195 с.
- [15] Mendenhall W., Sincich T. *A Second Course in Statistics. Regression Analysis*. PrenticeHall, 2011, 812 p.
- [16] Chatterjee S., Simonoff J.S. *Handbook of Regression Analysis*. Wiley, 2013, 236 p.
- [17] Yan X., Su X.G. *Linear regression analysis. Theory and computing*. World Scientific, 2009, 329 p.
- [18] Сидняев Н.И. Оценка надежности системы отделения космического аппарата от маршевого двигателя. *Вестник машиностроения*, 2021, № 2, с. 3–13. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-2-3-13>

Поступила в редакцию 10.06.2025

Баттулга Энхжаргал — аспирантка МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация; Монгольский университет науки и технологии, Улан-Батор, Монголия.

Научный руководитель — Сидняев Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: Sidn_ni@mail.ru

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Баттулга Э. Анализ результатов исследования тепловых потоков на поверхностях сублимирующих тел при обтекании потоком газа. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 06 (101). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arse/teje/1073.html>

ANALYSIS OF THE RESULTS OF A STUDY OF HEAT FLUXES ON THE SURFACE OF SUBLIMATING CONICAL BODIES DURING SUPERSONIC FLOW

E. Battulga^{1,2}

sidn_ni@mail.ru
enhee_jrgl@yahoo.com
SPIN-code: 8882-1489

¹ *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

² *Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia*

A statistical approach to the experimental study of the distribution of heat fluxes on the surface of permeable bodies during gas flow is described. The main attention is paid to the statistical processing of measurement results for various flow parameters. The essential role of statistical analysis in processing the results of experimental measurements of gas parameters on the body surface is shown. The levels of complexity of the elements are revealed, quantitative estimates of the heat transfer coefficients and the reliability of the estimates are given. The provisions of the similarity theory have also been developed for dimensionless criteria. A solution to the problem has been obtained for both linear and nonlinear gasdynamic systems, which significantly expands the possibilities of practical use of methods for detecting potential defects. The materials presented in the article and the experience of using various methods for detecting potential defects make it possible to identify with sufficient reliability a qualitative assessment of the effectiveness of various types of tests when rejecting elements of temperature sensors containing potential defects.

Keywords: aircraft, heat flow, aeromechanics, gas flow, surface mass transfer

Received 10.06.2025

Battulga E. — Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation; Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia.

Scientific advisor — Sidnyaev N.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Applied Mathematics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: Sidn_ni@mail.ru

Please cite this article in English as:

Battulga E. Analysis of the results of a study of heat fluxes on the surface of sublimating conical bodies during supersonic flow. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 06 (101). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arise/teje/1073.html>