

DOI: 10.15593/2224-9982/2019.57.04

УДК 629.7: 536.2: 539.21

В.С. Кошман

Пермский государственный аграрно-технологический университет
им. акад. Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Температурное состояние является одним из основных факторов, определяющих работоспособность высокоэнергетических конструкций. Между расчетными и опытными данными параметров температурных полей, как правило, наблюдаются значительные расхождения, причины которых до сих пор не имеют исчерпывающего объяснения. Однако в заданных условиях теплового нагружения за динамику формирования температурных полей и достигаемые в элементах конструкций уровни значений температуры во многом ответственны теплопроводность λ , изобарная удельная теплоемкость c_p и плотность ρ материалов. Из анализа литературы следует, что к настоящему времени ход температурных кривых теплофизических характеристик $\lambda(T)$, $c_p(T)$ и $\rho(T)$ тугоплавких металлов рассматривается изолированно, вне взаимосвязи между собой. Отмечена целесообразность изучения взаимосвязей между теплофизическими характеристиками металлов. Автор обращает внимание на аналитическое решение Р. Бермана: повышение точности измерения теплопроводности λ на основе закона Фурье в его записи для твердого тела как сплошной среды достижимо при учете нелинейности вида $\lambda = bT^3$, где в простейшем эксперименте $b = \text{const}$ в расширенном интервале значений температуры ΔT . В данной связи высказано предположение и дано доказательство тому, что в объеме металла при создании градиента температуры транспорт теплоты, реализуемый электронами проводимости, сопровождается переносом теплоты фотонным излучением. Приведено научное обоснование выражения для комплекса теплофизических свойств $K = \lambda^{1/3} c_p \rho$ металлов, а также результаты его экспериментальной проверки. Предложена обобщенная формула температурной зависимости теплопроводности $\lambda(T)$ тугоплавких металлов для целей численного решения тепловых задач на основе дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. Отмечена необходимость учета всей совокупности определяющих факторов при расчете температурных полей.

Ключевые слова: металлические элементы, температурное состояние, теплопроводность, закон Фурье, формула Дебая, закон Стефана – Больцмана, внутреннее фотонное излучение, обобщенная формула для теплопроводности.

V.S. Koshman

Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Pryanishnikov,
Perm, Russian Federation

TO THE QUESTION OF ESTIMATION OF THE TEMPERATURE STATE OF REFRACTORY METAL ELEMENTS IN AIRCRAFT STRUCTURES

The temperature state is one of the main factors determining the performance of high-energy structures. As a rule, between the calculated and experimental data of temperature field parameters there are significant differences, the causes of which still do not have an exhaustive explanation. However, under given conditions of thermal loading, thermal conductivity λ , isobaric specific heat capacity c_p and density ρ of materials are largely responsible for the temperature conductivity of temperature fields and temperature levels achieved in structural elements. From the literature review it follows, that the course of the temperature curves of the thermophysical characteristics $\lambda(T)$, $c_p(T)$ and $\rho(T)$ of refractory metals is considered separately, without any relationship between themselves. The expediency of studying the interrelationships between the thermophysical characteristics of metals is noted. The author draws attention to the Berman solution: improving of the accuracy of measuring thermal conductivity based on Fourier's law in its tractability for a solid as a continuous medium is achievable when taking into account the nonlinearity of $\lambda = bT$, where in the simplest experiment $b = \text{const}$ in the extended temperature range ΔT . Thereby it was suggested and proved that in the volume of the metal during the creation of the temperature gradient, the heat transport realized by conductivity electrons is accompanied by heat transfer by photon emission. The scientific substantiation of the expression for the complex of thermophysical properties $K = \lambda^{1/3} c_p \rho$ of metals, as well as the results of its experimental verification are given. A generalized formula for the temperature dependence of the thermal conductivity $\lambda(T)$ of refractory metals is proposed for the

purpose of numerical solution of thermal problems based on the differential equation of transient thermal conductivity. The utmost attention is paid to the necessity of taking into consideration of all determining factors when calculating temperature fields.

Keywords: metallic elements, temperature state, thermal conductivity, Fourier law, Debye formula, Stefan-Boltzmann law, internal photon emission, generalized formula for thermal conductivity.

Введение и цель исследования

Как известно, одним из основных факторов, определяющих работоспособность двигателей летательных аппаратов, является их тепловое состояние. Исходя из этого при проектировании теплонапряженных элементов и узлов всегда прогнозируется и распределение температуры по их объему на те или иные моменты времени. Выход на адекватные реальным картинам математические модели формирования температурных полей и их количественное исследование путем вычислительного эксперимента может существенно сократить сроки последующей опытной отработки изделий и обеспечить дополнительное снижение материалоемкости и относительное снижение стоимости [1–4].

В авиации, ракетной и космической технике больших скоростей широкое применение находят тугоплавкие металлы (титан, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал, молибден, вольфрам, рений), и их сплавы [5], изучение свойств которых уже длительное время находится в центре внимания исследователей. Получение достоверной информации о пространственно-временном распределении температуры в объеме твердых тел реализовать на практике достаточно трудно [6]. В данной связи при исследовании температурного состояния высокоэнергетических конструкций между расчетными и опытными данными наблюдаются, как правило, значительные расхождения, причины которых до сих пор не имеют исчерпывающего объяснения. В то же время в согласии с законом сохранения и превращения энергии в заданных условиях теплового нагружения за динамику температурных полей и достигаемые в элементах конструкций уровни температуры во многом ответственны теплопроводность λ , изобарная удельная теплоемкость c_p и плотность ρ материалов [2, 3]. В идеале объем накапливаемых опытных данных должен адекватно отвечать объектам изучения.

По результатам измерений температурные зависимости объемной теплоемкости $c_p \rho_{\text{металлов}}$ установлены достаточно однозначно, а для теплопроводности в области высоких значений температуры дают картину, которую никак нельзя назвать однозначной. Для одних и тех же конструкционных материалов по одним опытным данным их теплопроводность λ с ростом термодинамической температуры T возрастает, по другим – понижается, а по третьим – остается практически неизменной. Наблюдаемое может способствовать упрощению математического описания. Однако остается открытым и актуальным вопрос о правомерности принимаемых приближений. В случае тугоплавких металлов используемые при численном решении тепловых задач температурные зависимости теплофизических характеристик $\lambda(T)$, $c_p(T)$ и $\rho(T)$ принимаются изолированно, без учета подобия и корреляционных связей между ними, а следовательно, и во многом произвольно. Целью настоящей работы является изучение взаимосвязи между теплофизическими характеристиками металла, которые во многом ответственны за формирование температурных полей в теплонапряженных элементах проектируемых конструкций.

Обоснование выражения для комплекса теплофизических свойств

Исходим из того, что теоретические построения, как правило, опираются на модели изучаемых процессов, законы сохранения, гипотезы. При описании микроскопического механизма переноса теплоты в металлах их теплопроводность λ определяют в соответствии с концепцией свободных электронов. Переноса энергию, электроны в количестве n_e на единицу объема движутся в объеме кристаллической решетки, имея на средней длине свободного пробега L среднюю скорость движения V , а также теплоемкость на один электрон $c_e^{(1)}$. Во всех вариантах теории переноса теплопроводность λ металла определяют в соответствии с кинетической формулой Дебая [7–9]:

$$\lambda = \frac{1}{3} LVc_e^{(1)} \cdot n_e = \frac{1}{3} LVc_{ve}, \quad (1)$$

где c_{ve} – объемная теплоемкость электронов проводимости, $c_{ve} = c_e^{(1)} n_e$. Однако сложности в определении скорости движения V , теплоемкости c_{ve} и прежде всего длины свободного пробега электронов проводимости L (при комнатной температуре $L \sim 3 \cdot 10^{-8}$ м [10]) не позволяют выйти на ход температурных кривых $\lambda(T)$.

Числовые значения и температурные зависимости теплопроводности и объемной теплоемкости конструкционных материалов поддаются измерению с помощью физических приборов, а накопленные опытные данные нуждаются в обобщении.

Интерес представляет результат простейшего, по Р. Берману, эксперимента. Как отмечает автор [11], он обращается к закону (уравнению) Фурье

$$q_\lambda = -\lambda \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (2)$$

где $\frac{dT}{dx}$ – градиент температурного поля вдоль оси x . Из измерительных приборов используют только два термометра. Они регистрируют температуру T однородного образца, а также разность значений температуры ΔT в его сечениях. Последние удалены друг от друга на расстояние единичной длины ($\Delta x = 1$) в направлении распространения теплового потока. Для теплопроводности λ принимается зависимость вида $\lambda = bT^3$, где b – некоторый постоянный для интервала температуры ΔT коэффициент. Далее записывается уравнение

$$\lambda dT = bT^3 dT, \quad (3)$$

которое интегрируется по T в пределах от T до $T + \Delta T$. Это позволяет прийти к решению

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2, \quad (4)$$

а его анализ – к выводу [11, с. 15]: «даже для такого большого относительного изменения температуры, как $\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{10}$, разность между найденным и истинным значениями коэффициента теплопроводности составляет всего лишь 1/4 %». Особого внимания заслуживает смысловая нагрузка исходной позиции Р. Бермана, позволяющая выйти на результат, который прежде всего ориентирован на задачу повышения точности определения теплопроводности λ исследуемых твердых тел.

Можно полагать, что под решением (4) есть весомое основание, тем более, что для металлов нелинейность вида $\lambda = bT^3$ не позволяет адекватно описать накопленный массив экспериментальных данных по теплопроводности λ в широком интервале значений температуры. Однако присутствие в правой части уравнения (3) сомножителя bT^3 дает основание предположить, что при наличии градиента температуры в объеме, занятом твердым телом, реализуется теплоперенос не только по механизму собственно теплопроводности, но и путем излучения.

При решении задачи Бермана прежде всего обратим внимание на физический смысл явления теплопроводности. По С.В. Вонсовскому [12, с. 89], в металлическом образце «через площадку в 1 см², перпендикулярную оси x , в единицу времени проходит $N = n_e V/3$ электронов (множитель 1/3 учитывает равномерное распределение направлений скоростей движения частиц в пространстве трех измерений)». Если в пространстве имеется градиент температуры, то в первом приближении кинетическая энергия, которую переносит каждый электрон,

$$E_e^{(1)} = \frac{d\varepsilon}{dx} L = -\frac{d\varepsilon}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} L = -c_e^{(1)} \frac{dT}{dx} L,$$

а плотность теплового потока теплопроводностью

$$q_\lambda = E_e^{(1)} N = -\frac{1}{3} L V c_e^{(1)} n_e \frac{dT}{dx} = -\frac{1}{3} L V c_{ve} \frac{dT}{dx}.$$

Таким образом, видна явная зависимость теплового потока в объеме металлов как от градиента температуры, так и от транспорта электронов проводимости в пределах кристаллической решетки, имеющей дальний порядок. Вывод: физическая картина явления теплопроводности вполне наблюдаема и при приближенном решении, поскольку закон Фурье (2) и кинетическая формула Дебая (1) тесно взаимосвязаны. Здесь плотность теплового потока теплопроводностью q_λ , Вт/м², выступает как количество кинетической энергии, переносимой массивом электронов проводимости через единицу площади сечения металлического образца в единицу времени. При переходе от закона Фурье к формуле Дебая физический смысл изучаемого явления не теряется, а закладывается прочная основа для дальнейших построений. На этом пути в согласии с формулой (3) представляет интерес рассмотрение связи закона Фурье с законом Стефана – Больцмана.

По этой причине прежде всего обратимся к вопросу равновесия вещества и излучения. Полагаем, что перепады значений температуры между сечениями в объеме металла отсутствуют. Понимая под фотоном квант электромагнитного поля, принимаем допущения: 1) в объеме металла присутствует фотонный газ; 2) фотонный газ находится в равновесии с движущимися электронами проводимости и ионами кристаллической решетки. Спектр равновесного фотонного излучения является спектром абсолютно черного тела [13], что отвечает закону Стефана – Больцмана для объемной плотности энергии излучения [14]:

$$u_\gamma = \frac{4\sigma T^4}{c},$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт · м⁻²К⁻⁴, а c – скорость света в вакууме, $c = 3 \cdot 10^8$ м · с⁻¹. Тогда на объемную теплоемкость равновесного фотонного излучения $c_{v\gamma}$ выходим обычным путем [10], взяв производную от энергии u_γ по температуре T :

$$c_{v\gamma} = \frac{du_\gamma}{dT} = \frac{16\sigma T^3}{c}. \quad (5)$$

Вновь обратим внимание на изучаемую систему при наличии в ней весьма малого продольного градиента температуры $\frac{dT}{dx}$. В согласии с выражением (3) можно принять [15], что плотность теплового потока по закону Фурье q_λ прямо пропорциональна Δq_γ , т.е. доле плотности теплового потока излучением, приходящейся на малый температурный интервал ΔT :

$$q_\lambda \propto \Delta q_\gamma. \quad (6)$$

Это позволяет рассмотреть зависимость λ , L и ΔT от Δq_γ . В соответствии с формулой (2) плотность теплового потока теплопроводностью q_λ через металлический образец с тепловым сопротивлением R пропорциональна разности значений температуры ΔT :

$$q_\lambda = \frac{\Delta T}{R} = \frac{\lambda \Delta T}{L}, \quad (7)$$

где R определяется теплопроводностью λ материала образца и средней длиной свободного пробега электронов L . Доля плотности теплового потока излучением Δq_γ зависит от температуры нелинейным образом:

$$\Delta q_\gamma = \frac{dq_\gamma}{dT} \Delta T = \frac{d(\sigma T^4)}{dT} = 4\sigma T^3 \Delta T. \quad (8)$$

Явный вид связи (6) нам не известен. Однако в первом приближении в числе значимых обобщенных переменных можно принять тепловое сопротивление (слоя металла толщиной порядка средней длины свободного пробега электронов) R , объемную теплоемкость фотонного излучения $c_{\nu\gamma}$, среднюю кинетическую энергию электрона проводимости $E_e^{(1)}$ и среднюю энергию единичного фотона $E_\gamma^{(1)}$, а также обратиться к уравнению вида

$$F(R, c_{\nu\gamma}, E_e^{(1)}, E_\gamma^{(1)}, \dots) = 0.$$

Тогда с энергетических позиций с учетом формул (5)–(8) можно записать

$$\frac{1}{R} = \frac{\varphi c E_\gamma^{(1)} c_{\nu\gamma}}{4 E_e^{(1)}} \quad (9)$$

и

$$\lambda = \frac{\varphi m_\gamma^{(1)} c^3 c_{\nu\gamma} L}{2 m_e V^2}, \quad (10)$$

где m_e – масса электрона; $m_\gamma^{(1)}$ – масса фотона, а φ – неизвестная нам функция. Заметим, если следовать принятым выше допущениям, то уравнения (9) и (10) в равной мере могут отвечать как поверхностному слою металлического образца, так и каждому из весьма тонких слоев, расположенных внутри его объема.

Уравнения (1) и (10), неразрывно связанные с уравнениями Фурье (2) и Стефана – Больцмана, отражают зависимость теплопроводности λ от одних и тех же переменных L и V , что позволяет определить функцию φ . Решая уравнения совместно относительно средней скорости электронов проводимости V , получаем

$$V^3 = \frac{3\varphi m_\gamma^{(1)} c^3 c_{\nu\gamma}}{2 m_e c_{ve}} \quad \text{и} \quad \varphi = \frac{2 m_e V^3 c_{ve}}{3 m_\gamma^{(1)} c^3 c_{\nu\gamma}}.$$

Фундаментальный механизм, объясняющий связь формулы (6), в настоящее время не ясен. Однако в рассматриваемом случае, на наш взгляд, важен сам факт наличия внутренней связанности между формулами (1) и (10), последняя из которых отражает взаимосвязь между отдельными энергетическими параметрами электронной и фотонной подсистем изучаемых твердых тел. По результатам проведенного исследования физически это означает, что в объеме металла наряду с переносом теплоты по механизму собственно теплопроводности реализуется также и лучистый теплоперенос. Это отвечает широко распространенному мнению [8 и др.]: в реальных процессах теплопроводность и излучение сопутствуют друг другу.

Поскольку в правой части выражения (10) объемная теплоемкость фотонного излучения прямо пропорциональна температуре в третьей степени: $c_{\nu\gamma} \propto T^3$, теплопроводность $\lambda \propto T^3$ и $\lambda^{1/3} \propto T$, что отвечает прогнозу Бермана (3). Тогда, зная количество теплоты Q , подводимой к единице объема вещества, можно найти величину повышения его температуры $\Delta T = Q / (c_p \rho)$, а полагая $T = B \Delta T$ (здесь B – некоторое число; B^{-1} и Q – величины малые), записать выражение для комплекса теплофизических свойств: $K = \lambda^{1/3} c_p \rho$.

Далее обратимся к известным из литературы опытным данным по теплопроводности λ , Вт/(м·К), изobarной удельной теплоемкости c_p , Дж/(кг·К), и плотности ρ , кг/м³, а также комбинации $\lambda = ac_p\rho$, где a – температуропроводность, м²/с. Обобщение экспериментального материала проведем на расширенной основе с учетом положения металлических химических элементов в периодической таблице Д.И. Менделеева.

Опытная проверка предлагаемой формулы

Если комбинация $K = \lambda^{1/3}c_p\rho$ созвучна как физической природе реальных веществ, так и их интегральным свойствам, а следовательно, если выражает нечто существенное, то при обращении к опытным данным можно ожидать те или иные присущие ей априорно неизвестные особенности поведения. Покажем это.

Согласие опытных величин [16] теплофизических характеристик простых веществ – металлических элементов периодической системы, включая тугоплавкие, в виде молярной величины комплекса свойств K_μ (вычислен через молярную теплоемкость $c_{p\mu}$, Дж/(моль·К)) и молярной энтропии S_μ , Дж/(моль·К) [17], при значениях температуры порядка комнатных отражено на рис. 1.

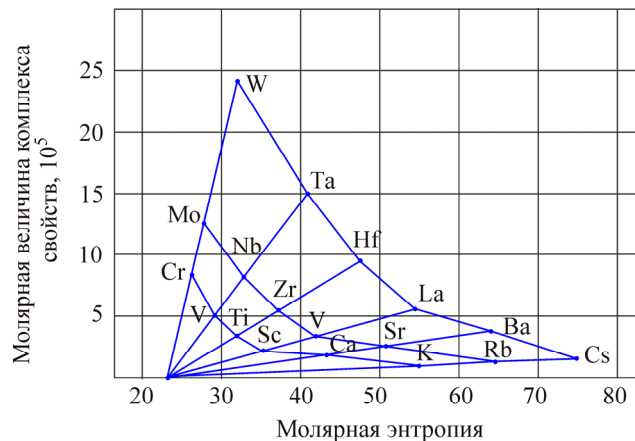


Рис. 1. Диаграмма теплофизических свойств $K_\mu - S_\mu$

В данном случае речь можно вести о диаграмме свойств. Наблюдаемая симметричность диаграммы $K_\mu - S_\mu$ и наличие точек пересечения прямых, соединяющих элементы соответствующих подгрупп, по А.Р. Регелю и В.М. Глазову [17], в аналогичных рассмотренному нами случаях свидетельствуют и о значимости каждого из сопоставляемых свойств, и о достоверности иллюстрируемых опытных данных, и, что существенно, о наличии фундаментальной взаимосвязи между свойствами, запрограммированной в строении электронных оболочек атомов и последовательном их изменении по соответствующим направлениям таблицы Д.И. Менделеева.

Графики температурной зависимости комплекса свойств тугоплавких металлов молибдена Мо, вольфрама W, рения Re, ванадия V, ниобия Nb, тантала Ta, титана Ti, гафния Hf и циркония Zr приведены на рис. 2.

В интервале значений температуры от 1000 до 2500 К за основу приняты результаты теплофизических измерений, выполненных коллективом под руководством профессора Л.П. Филиппова (1971) в МГУ. По свидетельству их авторов, надежность полученного экспериментального материала неоднократно проверялась варьированием основных условий эксперимента (размеров образцов, частот и амплитуд колебаний температуры) и сопоставлением данных, полученных в разных вариантах методов. Обращают на себя внимание особенности приведенных на рис. 2 температурных зависимостей [18]:

1. Наличие явно выраженных изломов в случае титана Ti, гафния Hf и циркония Zr приходится на области фазовых переходов.

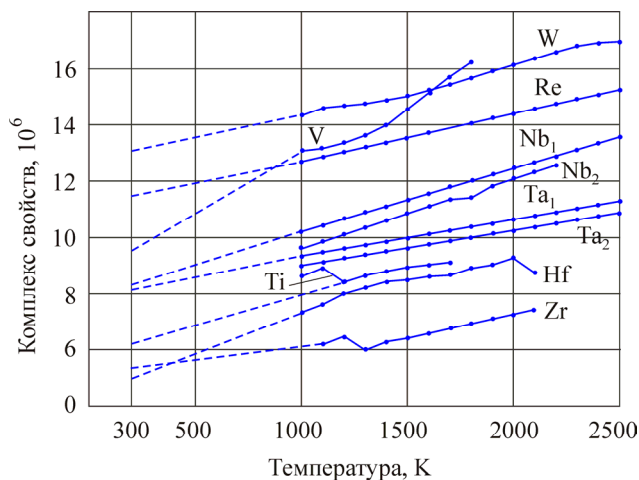


Рис. 2. Температурные зависимости комплекса свойств K тугоплавких металлов

2. Для ниобия Nb и тантала Ta в зависимости от различия в структуре и состава примесей линии температурной зависимости $K(T)$ смещены и фактически параллельны друг другу.

3. В области высоких значений температуры температурные зависимости $K(T)$ вне областей фазового перехода близки к линейным.

4. Высокотемпературные отечественные данные по комплексу свойств K согласуются с результатами измерений зарубежных исследователей при близких к комнатной значениях температуры, которые обобщены К.Дж. Смитлзом (1980).

На основе прецизионных высокотемпературных опытных данных вычислены величины температурного параметра $\beta = \Delta K / \Delta T$ ряда важнейших тугоплавких металлов. Зависимость β от универсального параметра $\text{tg}\alpha$ системы неполяризованных ионных радиусов (используемого по предложению Э.В. Приходько в целях выявления из опытных достоверных величин [17]) приведена на рис. 3.

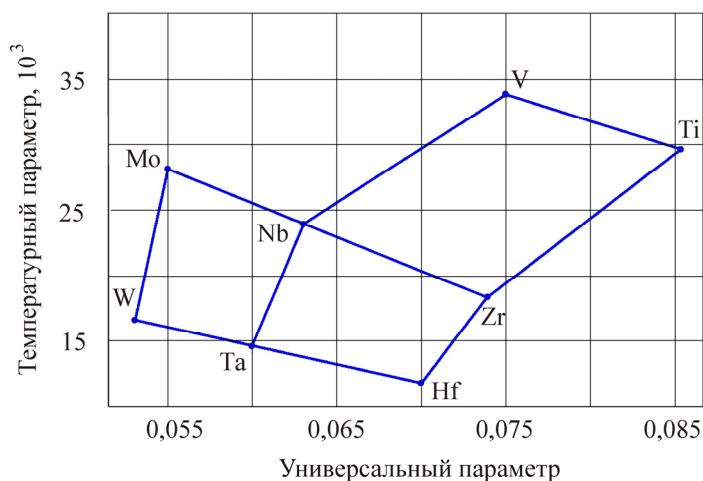


Рис. 3. Зависимость $\beta = f(\text{tg}\alpha)$ для тугоплавких металлов [18]

Видно, что величины параметра β являются практически линейными функциями от $\text{tg}\alpha$ в рядах периодической таблицы Д.И. Менделеева.

Тогда на линейных участках теплопроводность λ выступает как функция температурного параметра β , температуры T , а также зависит от хода температурных кривых объемной теплоемкости $c_p\rho$:

$$\lambda = \left[\frac{\lambda_0^{1/3} c_{p0} \rho_0 + \beta(T - T_0)}{c_p \rho} \right]^3.$$

Здесь λ_0 , c_{p0} , ρ_0 – соответственно числовые значения измеренных (при той или иной опорной температуре T_0) величин теплопроводности, изобарной удельной теплоемкости и плотности материала.

Заключение

Для обеспечения удобства расчета температурных полей в работе обосновано выражение для комплекса теплофизических свойств веществ и конструкционных материалов $K = \lambda^{1/3} c_p \rho$, а также проведена его экспериментальная проверка. Предложена обобщенная формула для компактного представления информации по температурным зависимостям теплопроводности конструкционных материалов с учетом хода температурных кривых объемной теплоемкости. Также отмечено, что при оценках теплового состояния теплонапряженных конструкций необходимо обращать внимание не только на теплофизические характеристики применяемых материалов. Необходим также корректный учет и сложности конфигурации проектируемых изделий, и наличия контактных сопротивлений между слоями элементов и узлов, и влияния сложного характера условий однозначности решаемых тепловых задач, иных определяющих факторов. Проведению расчетов в каждом конкретном случае должен предшествовать процесс анализа информации, позволяющий установить, являются ли надежными принимаемые в качестве исходных результаты измерений и не противоречат ли они некоторым критериям точности. Только на пути объединения многих усилий возможно управление столь сложной термодинамической системой, какой, по сути, является теплонапряженное состояние даже казалось бы самого простого элемента конструкции летательного аппарата и его теплового двигателя.

Библиографический список

1. Дорохов А.Ф., Пахомова Н.В. Моделирование теплопередачи через стенку рабочего цилиндра поршневого ДВС и управление его напряженно-деформированным состоянием // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 1(45). – С. 68–74.
2. Зарубин В.С., Станкевич И.В. Расчет теплонапряженных конструкций. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
3. Росляков А.Д. Методы обеспечения эксплуатационных характеристик теплонапряженных элементов тепловых двигателей на основе моделирования нестационарной теплопроводности: дис. ... д-ра техн. наук. – Самара, 2005. – 275 с.
4. Серовойский В.М., Чуян Р.К. Исследование тепловых полей в элементах конструкции двигателей ЛА // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации, г. Москва, 1986 г.. – М.: Наука, 1987. – 182 с.
5. Либенсон Г.А. Производство порошковых изделий: учеб. – М.: Металлургия, 1990. – 420 с.
6. Дилигенская А.Н. Решение ретроспективной обратной задачи теплопроводности на основе параметрической оптимизации // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56, № 3. – С. 399–406.
7. Теплопроводность твердых тел: справ. / под ред. А.С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.
8. Жуков С.П., Кожухов В.А., Кунгс Я.А. Эффекты теплообразования и теплопередачи под действием электрического тока // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 7. – С. 162–171.
9. Основы физики твердого тела: конспект лекций / Л.Ф. Калистратова, С.В. Данилов, В.И. Суриков, Н.П. Калистратова. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 62 с.

10. Мучник Г.Ф., Рубашов И.Б. Методы теории теплообмена: учеб. пособие. Ч. 1. Теплопроводность. – М.: Высшая школа, 1970. – 288 с.
11. Берман Р. Теплопроводность твердых тел: пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 288 с.
12. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 368 с.
13. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики: учеб. пособие. – М.: Наука, 1976. – 664 с.
14. Краснопецев Е.А. Спецглавы физики. Статистическая физика равновесных систем: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 387 с.
15. Кошман В.С. О закономерностях взаимосвязи электропроводности, теплопроводности и теплового состояния элементов агроинженерных систем // Пермский аграрный вестник. – 2015. – № 4. – С. 40–48.
16. Кошман В.С. О закономерностях для интегральной характеристики теплофизических свойств элементов периодической системы Д.И. Менделеева // Пермский аграрный вестник. – 2014. – № 1. – С. 22–27.
17. Регель А.Р., Глазов В.М. Периодический закон и физические свойства электронных расплавов. – М.: Наука, 1978. – 309 с.
18. Кошман В.С. О температурной зависимости комплекса теплофизических свойств элементов периодической системы Д.И. Менделеева // Пермский аграрный вестник. – 2014. – № 4. – С. 22–26.

References

1. Dorohov A.F., Pahomova N.V. Modelirovanie teploperedachi cherez stenku rabocheho cilindra porshnevoego DVS i upravlenie ego napryazhenno – deformirovannym sostoyaniem [Simulation of heat transfer through the wall of the working cylinder of a piston internal combustion engine and control of its intensely - deformed state]. Modern technologies. System analysis. Modeling, 2015, no. 1 (45), pp. 68-74.
2. Zarubin V.S., Stankevich I.V. Raschet teplonapryazhennykh konstruksiy [Calculation of heat-stressed structures]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 352 p.
3. Roslyakov A.D. Metody obespecheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik teplonapryazhennykh elementov teplovykh dvigateley na osnove modelirovaniya nestatsionarnoy teploprovodnosti: dis. d - ra tekhn. Nauk [Methods to ensure the performance characteristics of heat-stressed elements of heat engines based on the simulation of non-stationary thermal conductivity: PhD dissertation]. Samara, 2005, 275 p.
4. Serovojskij V.M., Chuyan R.K. Issledovaniye teplovykh poley v elementakh konstruksii dvigateley LA [The study of thermal fields in the structural elements of the engines LA]. In book: Gagarinskiye nauchnyye chteniya po kosmonavtike i aviatsii, 1986, Moscow: Nauka, 1987, P. 182.
5. Libenson G.A. Proizvodstvo poroshkovykh izdeliy: uchebnyk [Powder production: a textbook]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 420 p.
6. Diligenskaya A.N. Resheniye retrospektivnoy obratnoy zadachi teploprovodnosti na osnove parametricheskoy optimizatsii [Solution of the retrospective inverse heat conduction problem based on parametric optimization]. Teplofizika vysokikh temperature, 2018, vol. 56, no.3, pp. 399-406.
7. Ohotin A.S. Teploprovodnost tverdykh tel: spravochnik [Thermal conductivity of solids: a reference book]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 320 p.
8. Zhukov S.P., Kozhukhov V.A., Kungs Ya.A. Effekty teploobrazovaniya i teploperedachi pod deystviyem elektricheskogo toka [Effects of heat generation and heat transfer under the action of electric current]. Bulletin of KrasGAU, 2009, no.7, pp. 162-171.
9. L. F. Kalistratova, S. V. Danilov, V. I. Surikov, N. P. Kalistratova. Osnovy fiziki tverdogo tela: konpekt lektsiy [Fundamentals of Solid State Physics: lecture notes]. Omsk: publishing house of Omsk State Technical University, 2010, 62 p.
10. Muchnik G.F., Rubashov I.B. Metody teorii teploobmena. Ch. 1. Teploprovodnost: uchebnoye posobiye [Methods of heat transfer theory. Part 1. Thermal conductivity: a manual]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970, 288 p.
11. Berman R. Teploprovodnost tverdykh tel [Thermal conductivity of solids]. Moscow: Mir, 1979, 288 p.
12. Frenkel Ya.I. Vvedeniye v teoriyu metallov [Introduction to the theory of metals]. Moscow: GIFML, 1958, 368 p.
13. Blokhintsev D.I. Osnovy kvantovoy mekhaniki: uchebnoye posobiye [Basics of Quantum Mechanics: a textbook.]. Moscow: Nauka, 1976, 664 p.

14. Krasnopevtsev E.A. Spetsglavy fiziki. Statisticheskaya fizika ravnovesnykh sistem: uchebnoye posobiye [Special Chapter of Physics. Statistical physics of equilibrium systems: study guide]. Novosibirsk: publishing house of Novosibirsk State Technical University, 2014, 387 p.

15. Koshman V.S. O zakonomernostyakh vzaimosvyazi elektroprovodnosti, teploprovodnosti i teplovogo sostoyaniya elementov agroinzhenernykh sistem [On the regularities of the relationship of electrical conductivity, thermal conductivity and thermal state of elements of agro-engineering systems]. Perm Agrarian Journal, 2015, no. 4, pp. 40-48.

16. Koshman V.S. O zakonomernostyakh dlya integralnoy kharakteristiki teplofizicheskikh svoystv elementov periodicheskoy sistemy D. I. Mendeleyeva [On Regularities for the Integral Characteristic of Thermophysical Properties of the Elements of the Periodic System of D.I. Mendeleev]. Perm Agrarian Journal, 2014, no. 1, pp. 22-27.

17. Regel A.R., Glazov V.M. Periodicheskiy zakon i fizicheskiye svoystva elektronnykh rasplavov [Periodic law and physical properties of electron melts]. Moscow: Nauka, 1978, 309 p.

18. Koshman V.S. O temperaturnoy zavisimosti kompleksa teplofizicheskikh svoystv elementov periodicheskoy sistemy D.I. Mendeleyeva [On the Temperature Dependence of the Complex of Thermophysical Properties of the Elements of the Periodic Table D.I. Mendeleev]. Perm Agrarian Journal, 2014, no. 4, pp. 22-26.

Об авторе

Кошман Валентин Семенович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Сельскохозяйственные машины и оборудование» ФГБОУ ВО ПГАТУ (614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, д. 23, e-mail: koshman31337@yandex.ru).

About the author

Valentin S. Koshman (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Farm Machines and Equipment Department, Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Pryanishnikov (23, Petropavlovskaya st., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: koshman31337@yandex.ru).

Получено 09.04.2019