

Engineering Calculation of Thermal Field in the Head Part of Hypersonic Vehicle

A.I. Prostomolotov, N.A. Verezub

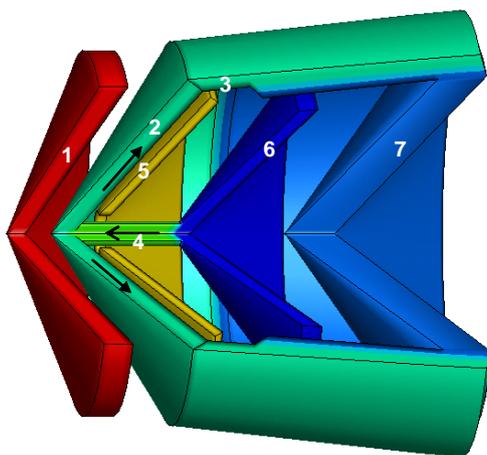
*Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russia,*

prosto@ipmnet.ru
verezb@ipmnet.ru

Abstract

The problem of high-temperature heating the head part of hypersonic vehicle (HSV) was considered. For an estimation of the maximum heating temperature (T_{\max}) the calculations of thermal field were done by means using the inviscid and viscous models of gas flows for different Mach numbers $M = 1 \div 7$. For comparison, the graphs of $T_{\max}(M)$ are shown for the both cases. The engineering approach for the thermal calculations at HSV head has been proposed, which is using previously probed mathematical model of high temperature radiative-conductive heat transfer in industrial thermal processes. The calculated thermal fields were analyzed for the hypothetical construction of HSV head and the innovative tools, which illustrate some possibilities of the active thermal protection.

Keywords: hypersonic flow, thermal protection, computational aerodynamics, finite element method.



Scheme for calculation of thermal processes into HSV: heated region of shock wave (1), blunt cone of head part (2, 3), tube filled by coolant (4), thermal protective shield (5), shield cooling (6), the baffle between a head part and main body (7).

УДК 532.5 519.63 621.315.592:548.4

Инженерный расчет теплового поля в головной части гиперзвукового летательного аппарата

А.И. Простомолотов, Н.А. Вerezуб

*Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского Российской академии наук,
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1*

prosto@ipmnet.ru

verezb@ipmnet.ru

Аннотация

Рассматривается проблема высокотемпературного нагрева головной части гиперзвукового летательного аппарата (ГЛА). Для оценки максимальной температуры нагрева T_{\max} были проведены расчеты теплового поля вне ГЛА по моделям невязкого и вязкого газа для различных чисел Маха $M = 1 \div 7$. Для сравнения приведены графики зависимости T_{\max} (М) в обоих случаях. Предложен вариант инженерного подхода к расчету теплового поля в головной части ГЛА с использованием апробированной авторами ранее методики решения высокотемпературных радиационно-кондуктивных задач для технологических установок. Приводятся результаты расчета теплового поля для гипотетической конструкции головной части ГЛА, иллюстрирующие некоторые направления активной тепловой защиты.

Ключевые слова: гиперзвуковое течение, тепловая защита, вычислительная аэродинамика, метод конечных элементов

1. Введение

При движении с большими скоростями в плотных слоях атмосферы гиперзвуковые летательные аппараты (ГЛА) испытывают значительный аэродинамический нагрев, для устранения которого применяют различные способы тепловой защиты: активной и пассивной [1]. Способы пассивной тепловой защиты основаны на применении уносимых теплозащитных покрытий и их главным недостатком является изменение первоначальной геометрической формы ГЛА. Их анализу и расчетам посвящено основное число работ по математическому моделированию. Наличие граничных условий теплообмена на поверхности теплозащиты и газового потока делает эти задачи осложненными многочисленными химическими реакциями [2], а сопряженный расчет внешней задачи обтекания и внутренней задачи теплообмена проводится с рядом упрощений. Например, температуру на поверхности тела находят либо из предположения о «холодной стенке», когда температура на поверхности является заданной, либо из условия теплоизолированной (адиабатической) стенки.

Известные способы активной тепловой защиты связаны с принудительным охлаждением головной части ГЛА изнутри. Для их обоснования используется в основном интуиция и инженерные методы для оценочных расчетов. В их числе – термоэмиссионная тепловая защита [3, 4], при которой внутренний специальный (эмиссионный) слой, служащий катодом, излучает электроны, которые переносят внутри головного отсека на другой специальный слой, служащий анодом, значительную часть тепла от внешней оболочки. При этом на-

гретая часть оболочки, близкая к катоду, существенно охлаждается. Этот способ также позволяет получить автономный бортовой источник тока.

Другим эффективным способом считается активная тепловая защита на основе продува через теплозащитный слой холодного газа. В монографии [5] рассмотрены примеры управления тепловыми режимами при осесимметричном и пространственном обтекании тел с помощью продува газа-охладителя и использования высокотеплопроводных материалов. Согласно изобретению [6] для охлаждения передней кромки ГЛА создается защитный слой из продуктов разложения метангидрата в виде смеси паров воды и метана, в котором пары воды и метана находятся под давлением в пульсирующем режиме с частотой более 100 Гц и через отверстие в головной части ГЛА вытекают навстречу набегающему потоку. Полагается, что это вызывает модуляцию аэродинамического сопротивления и способствует устойчивости пограничного слоя ГЛА.

В данной работе предложен инженерный подход к расчету теплового поля в головной части ГЛА с использованием ранее апробированной авторами методики решения радиационно-кондуктивных задач для высокотемпературных технологических установок. Его особенностью является использование данных расчета теплового поля вне ГЛА (максимальных значений температуры T_{\max} в области ударной волны) в качестве входных параметров для последующего расчета теплового поля внутри ГЛА. По моделям невязкого и вязкого газа были рассчитаны зависимости $T_{\max}(M)$ для чисел Маха $M = 1 \div 7$. Обтекаемое тело имело вид затупленного в головной части клина, по своим размерам соответствующего модели на установке ГУАТ (ИПМех РАН). Обсуждаются результаты расчета теплового поля для гипотетической внутренней конструкции головной части этого тела применительно к ряду известных вариантов активной тепловой защиты.

2. Расчет теплового поля вне ГЛА

Обтекаемое тело представляет затупленный в головной части клин, по своим размерам соответствующий экспериментальной модели на установке ГУАТ в ИПМех РАН [7].

Течение идеального (невязкого и вязкого) газа рассчитывалось по лицензионной программе ANSYS/FLUENT в полости с координатами: $-0.1 \leq x \leq 0.25$, $-0.075 \leq y \leq 0.075$ [м] (рис. 1, а). Газ втекал в полость через левую стенку ($x = -0.1$ м) и вытекал через правую ($x = 0.25$ м). Скорость втекания $\mathbf{V} = \{V_x, V_y\}$ задавалась как $V_y = 0$ и $V_x = Mc$, где $c = 331$ м/с – скорость звука, для разных чисел Маха $M = 1, 2 \dots 7$.

2.1. Течение невязкого газа

В декартовой системе координат (x, y) течение идеального невязкого газа с уравнением состояния $p = e\rho(\gamma - 1)$ можно представить в канонической записи уравнений Эйлера

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

где

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho V_x \\ \rho V_y \\ \rho E \end{pmatrix}, \quad F_x = \begin{pmatrix} \rho V_x \\ \rho V_x^2 + p \\ \rho V_x V_y \\ (\rho E + p)V_x \end{pmatrix}, \quad F_y = \begin{pmatrix} \rho V_y \\ \rho V_x V_y \\ \rho V_y^2 + p \\ (\rho E + p)V_y \end{pmatrix}$$

Здесь t – время; ρ – плотность; p – давление; (V_x, V_y) – компоненты скорости по x и y ; e – внутренняя энергия и E – полная энергия; $\gamma = C_p/C_v$ – показатель адиабаты; C_p – теплоемкость при постоянном давлении; C_v – теплоемкость при постоянном объеме. На всех

участках границы задавались условия *FarField* [8]. Конечно-элементная сетка (рис. 1, б) была построена по разработанной авторами программе FEGEN.

Результаты расчетов показали образование фронта ударной волны и увеличение температуры вблизи головной части ГЛА при увеличении числа Маха. Результат обтекания при $M = 5$ показан на рис. 1, в, где можно заметить, что фронт ударной волны расположен вблизи головной части ГЛА и в этой области нагрев газа достигает значительной температуры ~ 1700 К.

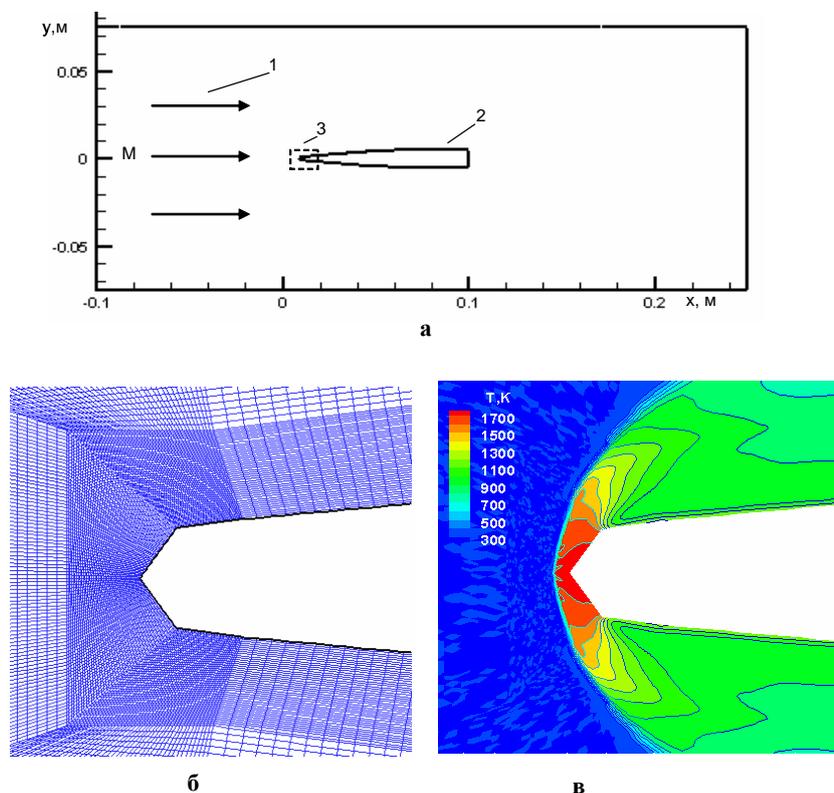


Рис. 1. Расчетная схема (а) обтекания невязким газом (1) тела (2) с головной частью (3) и для увеличенного фрагмента головной части (3): конечно-элементная сетка (б) и распределение изотерм при $M = 5$ (в)

Модель невязкого газа является довольно простой и вполне подходящей для инженерных оценок температуры в ударной волне. Однако она не учитывает теплоперенос внутри обтекаемого тела.

2.2. Течение вязкого газа

Корректность рассмотренной выше модели анализировалась в сравнении с более сложной моделью обтекания тела вязким идеальным газом при аналогичных параметрах, учитывающей теплоперенос как в вязком газе, так и в задаваемой конструкции обтекаемого тела (рис. 2, а).

Для вязкого теплопроводного газа решались уравнения Навье–Стокса совместно с уравнением теплопереноса, которые также представляются в каноническом виде с добавлением по сравнению с уравнениями Эйлера (1) дополнительных вязких членов [9]. Соответствующие расчеты были также выполнены по программе ANSYS/FLUENT со следующими условиями для потока газа: на внешних границах – условие *FarField*, на теле – условие «скольжения» на головной части и «прилипания» на всей остальной части обтекаемого тела. Конечно-элементная сетка была построена также по программе FEGEN (рис. 2, б), но в ус-

ложненной области, учитывающей гипотетическую внутреннюю конструкцию обтекаемого тела.

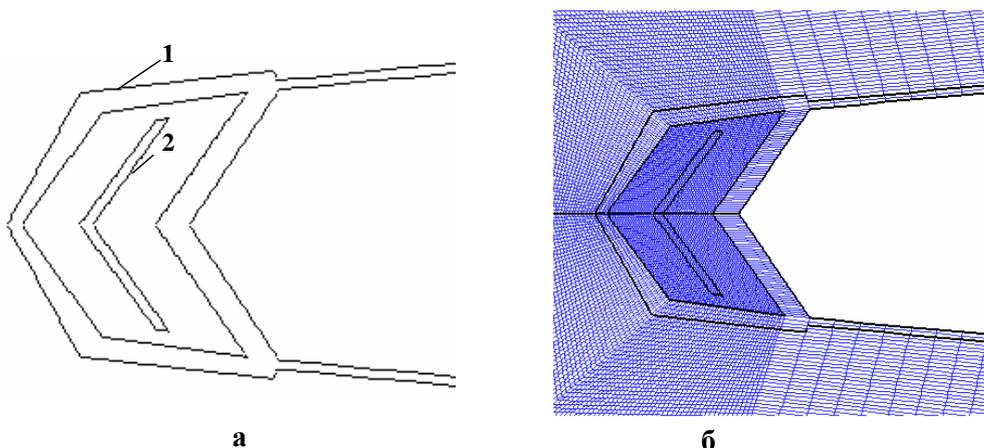


Рис. 2. Обтекание тела вязким газом: увеличенный фрагмент головной части (а), включающей защитную оболочку (1) и охладитель (2) и соответствующая этому фрагменту конечно-элементная сетка (б)

Результаты расчетов, проведенных для модели вязкого газа, также показали, что происходит прогрев головной части тела до значительных температур при больших числах Маха (рис. 3, а). Увеличение числа Маха M вызывает рост максимального значения температуры газа T_{max} вблизи головной части тела в соответствии с графиками, представленными на рис. 3, б. Можно заметить, что, в случае вязкого газа значения температуры несколько ниже.

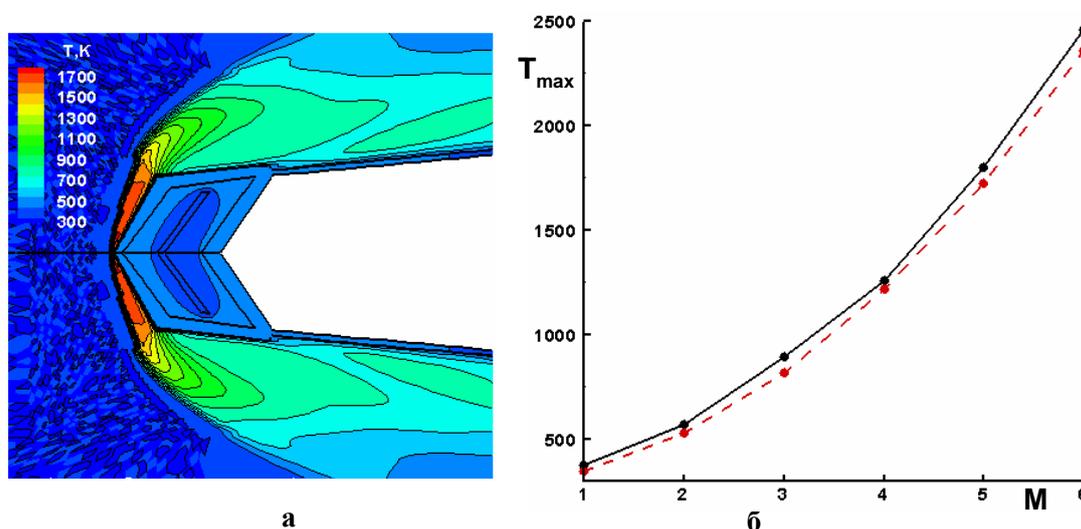


Рис. 3. Поле изотерм вблизи и внутри головной части тела при $M=5$ (а) и зависимости максимальной температуры (T_{max}) от числа Маха (M) в случаях обтекания тела невязким (сплошная черная линия) и вязким газом (красный пунктир) (б)

В целом, после анализа этих результатов был сделан вывод о приемлемости применения более простой модели невязкого газа для сопряжения внешней задачи обтекания и внутренней задачи теплообмена для головной части ГЛА, рассматриваемой ниже.

3. Расчет теплового поля внутри ГЛА

3.1. Схема сопряжения с задачей внешнего обтекания

В рассматриваемом инженерном подходе предполагается, что нагрев головной части ГЛА происходит под действием высокотемпературного теплового излучения от узкого слоя воздуха перед ГЛА, возникающего в ударной волне при больших числах Маха. В соответствии с этим предположением на рис. 4 показана схема расположения тепловыделяющих и теплоотводящих компонентов при расчете теплового поля внутри ГЛА. Согласно этой схеме нагретый до высокой температуры воздух в ударной волне (1) излучает тепло на передний головной конус (2). Тепло растекается за счет теплопроводности к конической оболочке головной части (3) и далее по корпусу (7, 8). В головной части размещается защитный экран (5) и охлаждаемый экран (6). Через трубу (4), соединенную с охлаждаемым экраном (6), может прокачиваться жидкий или газообразный теплоноситель. Контур прокачки теплоносителя может быть продолжен в головной конус (2) через его соединение с трубой (4). Сводка теплофизических параметров, для использованных в данных расчетах материалов, приведена в Таблице.

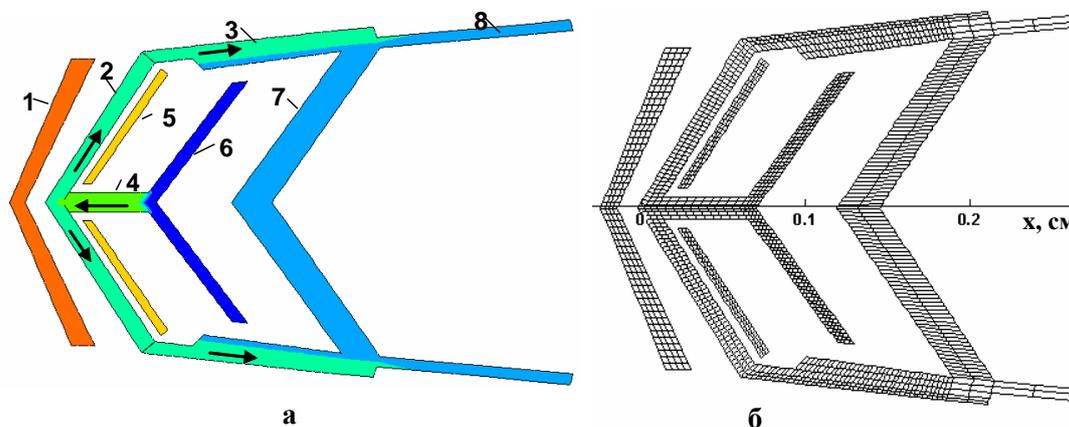


Рис. 4. К расчету теплового поля внутри ГЛА: *a* – схема расположения тепловыделяющих и теплоотводящих компонентов при расчете теплового поля внутри ГЛА, где нагретая область ударной волны (1), затушенный конус головной части корпуса (2, 3), труба с теплоносителем (4), защитный экран (5), охлаждаемый экран (6), перегородка головной части и корпуса (7), фрагмент корпуса (8); *б* – конечно-элементная сетка, построенная по программе FEGEN

Таблица

Теплофизические параметры материалов

Материал (компонент, рис. 4, <i>a</i>)	$T_{пл}$ [К]	Теплопроводность λ [Вт/м × К]		Теплоёмкость C_p [Вт/кг × К]	Плотность ρ [кг/м ³]	Степень черноты ϵ
Воздух (1,4)	–	0.02		1200	1	–
Графит МПГ-8 изотропный (2, 3)	3700	25		1500	2000	0.9
Графит УПВ-1Т ортотропный (2)	3700	λ_{\perp}	λ_{\parallel}	2000	1500	0.9
		1.60	534			
Вольфрам (5)	3422	173		134	19300	0.75
Молибден (6)	2610	142		256	10200	0.12
Сталь (7, 8)	1470	75		449	7874	0.4

3.2. Алгоритм расчета теплопереноса внутри ГЛА

Расчеты проведены по программе FESOL, которая является одной из компонент конечно-элементного программного пакета CrystmoNet [10], разработанного авторами для расчета высокотемпературных тепловых установок. Конечно-элементная сетка (см. рис. 4, б) была построена по программе FEGEN.

Основой расчета теплового поля внутри ГЛА является конечно-элементное решение уравнения конвективного теплопереноса в элементах конструкции ГЛА

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) T \right] = \text{div}(\lambda \nabla T) + Q$$

Здесь $\mathbf{V} = (V_x, V_y)$ – скорость движения теплоносителя в избранных элементах конструкции и Q – объемное выделение или сток тепла. На закрытых поверхностях соприкосновения материалов i и k с разными теплофизическими свойствами требуется выполнения условия баланса теплового потока: $(\lambda_i \nabla T_i)_n - (\lambda_k \nabla T_k)_n = 0$, а на внутренних открытых поверхностях задается условие теплообмена: $(\lambda_k \nabla T_k)_n + \alpha (T_k - T_0) + \varepsilon_k \sigma (T_k^4 - T_{e,k}^4)$, учитывающее два механизма теплообмена поверхности k , имеющей температуру T_k , и коэффициент теплопроводности λ_k . К ним относятся: 1) – поверхностный теплообмен с внешней средой с коэффициентом α при температуре внешней среды T_0 ; 2) – радиационный теплообмен с “видимыми” окружающими поверхностями радиационной кюветы (σ – радиационная постоянная Стефана – Больцмана).

Предполагается наличие $i, k = 1, 2, \dots, N$ радиационных поверхностей, которые считаются диффузно-серыми и для которых рассчитываются взаимные угловые коэффициенты F_{ik} . Для каждой из них задается ε_k – коэффициент черноты поверхности (или $\beta_k \equiv 1 - \varepsilon_k$) и эффективная радиационная температура среды для этой поверхности $T_{e,k}$ определяется решением следующей радиационной задачи. Расчетная область разбивается на L кювет, между которыми требуется соблюдение теплового баланса при многократном отражении от поверхностей, включенных в кювету. Для каждой поверхности k в кювете с N сторонами вычисляются коэффициенты G_{ik} , $i = 1, 2, \dots, N$ путем решения линейных систем уравнений

$$AG_k = b_k, \quad k = 1, 2, \dots, N,$$

где матричные элементы и компоненты вектора следующие:

$$A_{ik} = F_{ik} \beta_i - 1 \quad (i = k), \quad A_{ik} = F_{ik} \beta_i \quad (i \neq k), \quad b_k^T \equiv [-F_{1k} \varepsilon_k, -F_{2k} \varepsilon_k, \dots, -F_{Mk} \varepsilon_k]$$

Баланс радиационной тепловой энергии между поверхностью k и всеми остальными поверхностями кюветы (A_i – площадь i -поверхности) определяется следующим соотношением радиационных потоков:

$$A_k q_k^{rad} = A_k \varepsilon_k \sigma T^4 - \sum_{i=1, \dots, N} G_{ik} A_i \varepsilon_i \sigma T_i^4$$

Его выполнение дает формулу для вычисления эффективной температуры поверхности k

$$T_{e,k} = \left(\frac{1}{A_k \varepsilon_k} \sum_{i=1, \dots, N} G_{ik} A_i \varepsilon_i T_i^4 \right)^{1/4}$$

3.3. Примеры расчета теплопереноса внутри ГЛА

Рассмотрены примеры, соответствующие невязкому обтеканию ГЛА при $M=6$ (см. рис. 3, б). При таком числе Маха радиационный тепловой поток от нагретого воздуха в ударном слое (1) значительно разогревает коническую часть защитной оболочки (2). Так, что температура её острия в варианте пассивной тепловой защиты (т.е. без принудительного охлаждения) достигает ~ 2400 К (см. рис. 3, б). В соответствии с описанным выше алгоритмом расчета такая температура достигается при задании объемного энерговыделения Q в ударном слое (1), разогревающим его до температуры ~ 2800 К. Учитывая, что оболочка головной части при больших числах Маха подвержена воздействию высоких температур, материал, из которого она изготавливается, должен обладать устойчивостью к химическому разложению и обладать низкой теплопроводностью для эффективной тепловой защиты. Сочетанию этих требований удовлетворяют композитные материалы на основе керамики или графита ($T_{nl} = 3700$ К), которые также традиционно применяются в высокотемпературных промышленных установках различного назначения [10].

В данной работе проанализировано применение двух марок графита для затупленного конуса (2) головной части ГЛА: изотропного (МПГ-8) и ортотропного (УПВ-1Т) графита, второй из которых имеет существенно различающиеся коэффициенты теплопроводности по продольному λ_{\parallel} и поперечному λ_{\perp} направлениям (см. таблицу). Результаты расчетов для этих двух случаев представлены на рис. 5, а, б.

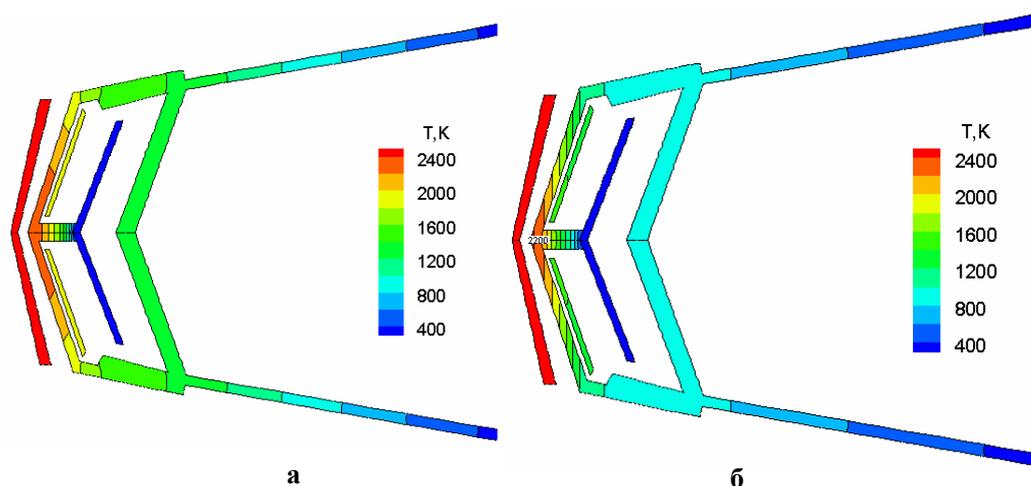


Рис. 5. Тепловое поле внутри головной части ГЛА при $M=6$ в случае изотропного (а) и ортотропного (б) графита для конической части (2)

Анализируя данные на рис. 5, а можно сказать, что при выборе всей конусной части (2) и (3) из изотропного графита нагрев её участка (2) наиболее значительный ($\sim 2000 \div 2400$ К), сток тепла за счет теплопроводности на корпус (8) или через трубу (4) незначительно понижает температуру частей защитной оболочки (2) и (3). В таком варианте сток тепла (радиационный от экрана (5) и теплопроводностный через трубу (6)) на охлаждаемый до 400 К тепловой экран (6) крайне незначительный. В варианте, представленном на рис. 5, б, конусная часть (2) была из ортотропного, а часть (3) – по-прежнему из изотропного графита. Сравнивая данные этого и предыдущего варианта, можно заметить, что распределение температуры в затупленной части конуса (2) существенно изменяется. В частности, область высоких температур сжимается к центру конуса (2), что вызвано существенно меньшим значением коэффициента теплопроводности в поперечном сечении λ_{\perp} по сравнению с продольным λ_{\parallel} (см. таблицу). Таким образом, в рамках пассивной тепловой защиты применение ортотропного материала позволяет только сжать область высоких температур на конус-

ной части ГЛА. Однако их наличие будет оставаться причиной разрушения теплозащитного слоя. Поэтому радикального снижения температуры головной конусной части можно достичь только с помощью активной тепловой защиты, использующей различные физические механизмы дополнительного охлаждения [3–6].

В данной работе для представленного выше варианта ортотропного графита части (2) были рассмотрены конвективные механизмы охлаждения потоком воздуха, продуваемого только по трубе (4) от охлаждаемого экрана (6) к конусной части (2) (рис. 6, а), а также вариант с продолжением этой продувки вдоль части (3) (рис. 6, б). Анализ рис. 6, а показывает, что поток холодного воздуха, перетекающей со сравнительно небольшой скоростью 3.3 см/с от охлаждаемого до 400 К экрана (6) через трубу (4) к конической части (2), позволяет существенно снизить температуру вблизи её острия до ~ 1400 К. При этом в удаленной от острия области конической части (2) и в части (3) температуры становятся значительно меньше ~ 1200 ÷ 800 К. Однако наибольшее охлаждение достигается при прокачке теплоносителя с той же скоростью не только через трубу (4), но через коническую часть (2). Анализ этого варианта, приведенного на рис. 6, б, показывает, что в этом случае вся коническая часть охлаждается до существенно более низких температур ~ 1000 ÷ 600 К.

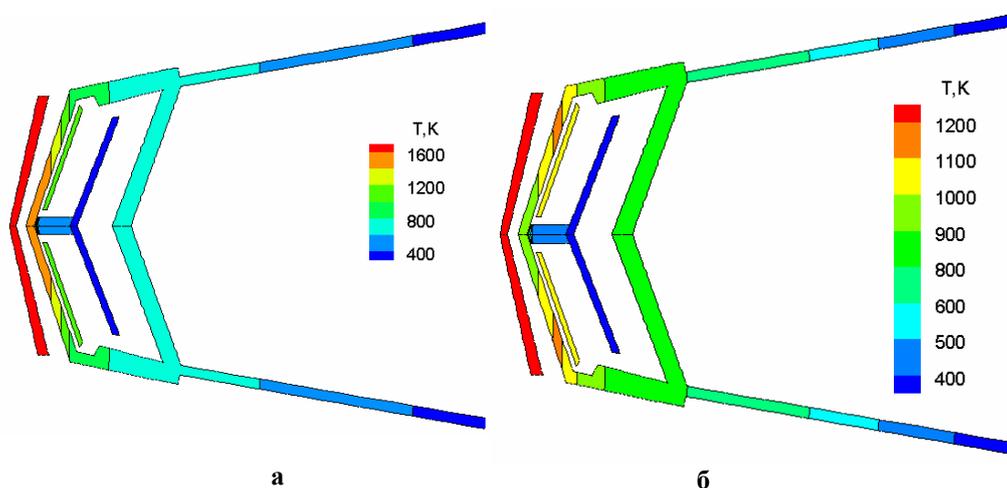


Рис. 6. Тепловое поле внутри головной части ГЛА при $M=6$: а – в случае принудительного конвективного охлаждения только через трубу (4); б – при дополнительной прокачке охладителя через коническую часть

Для наглядного сравнения эффективности этих 4-х вариантов тепловой защиты на рис. 7 приведены графики осевого распределения температуры в областях острия головной части (2) и трубы (4). Можно заметить, что улучшение пассивной защиты за счет выбора конической части (2) из ортотропного графита приводит к некоторому понижению температуры (см. сдвиг кривой 2 вниз относительно кривой 1).

Однако радикальное снижение температуры достигается в случае применения активной тепловой защиты, которая в данном случае была выбрана тоже в 2-х вариантах. В первом варианте применялось конвективное прокачивание воздуха от охлаждаемого до 400 К экрана (6) через трубу (4), что иллюстрируется кривой 3, а во втором – это конвективное прокачивание было продлено через головную часть (2) и соответствует кривой 4. Таким образом, создание охлаждаемого контура: экран-холодильник (6), труба с воздушным или жидким теплоносителем (4) и дополнительная прокачка этого теплоносителя через головную коническую часть (2) дает наиболее существенный эффект тепловой защиты ГЛА.

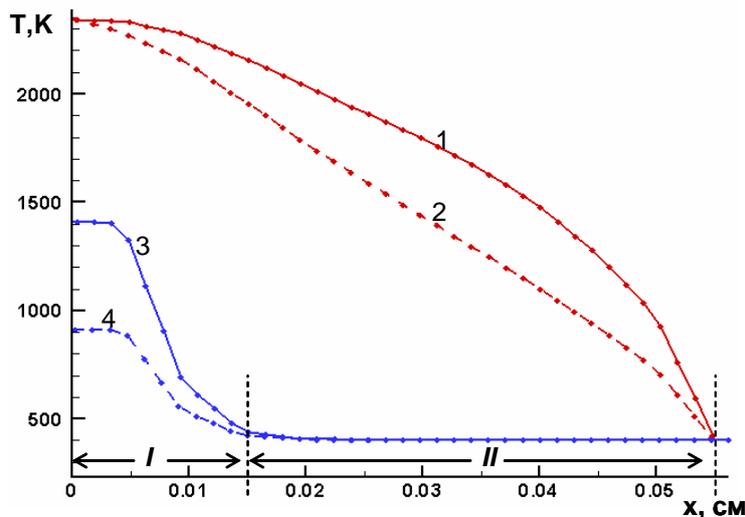


Рис. 7. Осевые распределения температуры от начала головной части (*I* – острие головной части и *II* – труба (4)) до охлаждаемого экрана (6) для вариантов, приведенных на рис. 5 и 6: 1 – изотропный, 2 – ортотропный графит, 3 – конвективное охлаждение через трубу (4), 4 – конвективное охлаждение через трубу (4) и коническую головную часть (2)

4. Заключение

Обзор литературы показал, что в подавляющем числе публикаций в аэродинамических расчетах ГЛА предполагается пассивная тепловая защита. Такие математические модели оперируют со сложными и многочисленными химическими реакциями при высоких температурах, которые описывают химическое разрушение и унос защитных слоев головной части ГЛА в процессе полета. В то же время, работ, посвященных способам активной тепловой защиты, крайне мало и они слишком сложны для инженерных расчетов и необходимых оценок (см. [11]). Тем не менее, способам активной тепловой защиты посвящен ряд значимых патентов, например, связанных с термоэмиссионным [3] и конвективным охлаждением [6], но где расчетное обоснование ограничено использованием известных аналитических формул.

Рассмотренный в данной работе подход является более простым и весьма подходящим для инженерных расчетов и оценок различного рода инноваций, касающихся способов активной тепловой защиты. Его основной особенностью является использование данных расчета теплового поля вне ГЛА (распределения и максимальных значений температуры в области ударной волны) в качестве входных параметров для последующего расчета теплового поля внутри ГЛА. В начале была получена зависимость E_{\max} (М) путем решения задачи внешнего обтекания (невязким и вязким газом), а затем конфигурация и значения теплового поля были использованы в качестве входных данных при расчете теплового поля внутри ГЛА. Расчетная методика и программа были разработаны авторами на основе метода конечных элементов [10]. Возможности данного подхода были продемонстрированы для обтекания ГЛА при $M=6$ в случаях изотропного и ортотропного материала головной оболочки ГЛА, а также было показано, что применение головной конусной части из ортотропного материала в сочетании с прокачкой через неё охлаждающего теплоносителя существенно снижает её температуру.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований РАН и, частично, в рамках грантов РФФИ №14-08-00454 и 15-02-01794.

Литература

1. Никитин П.В. Тепловая защита: Учебник. М.: Изд-во МАИ. 2006. 512 с.
2. Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Захаров А.А., Сыздыков Е.К. Развитие метода ленточно-адаптивных сеток на основе схем TVD для решения задач газовой динамики // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2011. №2. С. 87–97.
3. Керножицкий В.А., Колычев А.В., Охочинский Д.М. Патент РФ №2404087: Термоэмиссионный способ тепловой защиты частей летательных аппаратов при их аэродинамическом нагреве. Роспатент. 2010.
4. Керножицкий В.А., Колычев А.В., Макаренко А.В. Разработка методики расчета многоэлементной термоэмиссионной тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 75. С. 1–23.
5. Гришин А.М., Голованов А.Н., Зинченко В.И., Ефимов К.Н., Якимов А.С. Математическое и физическое моделирование тепловой защиты. Томск: Изд-во Том. ун-та. 2011. 358 с.
6. Носочёв Л.В. Патент РФ № 2558525: Устройство активной теплозащиты и модуляции аэродинамического сопротивления гиперзвукового БПЛА. Роспатент. 2014.
7. Котов М.А., Рулева Л.Б., Козлов П.В., Суржиков С.Т. Предварительные экспериментальные исследования обтекания моделей в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т. 14, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2013-14-2/articles/394/>
8. Thomas J.L., Salas M.D. Far field boundary conditions for transonic lifting solutions to the Euler equations // AIAA Journal. 1986. V. 24. Pp. 1074–1080.
9. Котов М.А., Крюков И.А., Рулева Л.Б., Солодовников С.И., Суржиков С.Т. Расчетно-экспериментальное исследование структуры гиперзвукового потока в плоском канале сложной конфигурации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. №1. С. 4–21.
10. Простомолотов А.И., Вerezуб Н.А., Ильясов Х.Х. Дистанционное и сопряженное моделирование тепломассопереноса и дефектообразования в технологических процессах // Изв. ВУЗов. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 1. С. 31–36.
11. Лу Х.Б., Лю В.Ц. Комбинированная система тепловой защиты на основе обращенной вперед полости и встречной струи // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 5. С. 561–569.

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2016 г.