

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	2
1. Постановка задачи и идентификация объекта расчета (сопла).....	4
1.1. Расчетная схема	4
1.2. Контур сопла.....	4
1.3. Исходные данные задачи.....	5
1.4. Теплофизические свойства продуктов сгорания.....	5
2. Термогазодинамический расчет течения продуктов сгорания	6
3. Вычисление распределения коэффициента теплоотдачи по длине проточной части сопла ...	7
4. Вычисление коэффициента массопереноса	15
5. Основные требования к отчетности.....	16
Перечень вопросов к защите.....	16
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	17
Приложение 1	18
Приложение 2	19

ВВЕДЕНИЕ

Высокий уровень значений термогазодинамических параметров рабочих процессов в ракетных двигателях на твердом топливе (РДТТ), приводящих к предельно высоким значениям удельных тепловых потоков в стенку требуют применения специальных мер тепловой защиты элементов конструкции двигателя для обеспечения его надежной работы. На практике используются различные способы теплозащиты, основанные на тех или иных физических явлениях, обеспечивающих сток или блокирование тепловых потоков в материал несущих конструкций [1].

В общем случае техническое решение узла теплозащиты представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из различных материалов с определенными физическими свойствами и механизмами переноса, описываемых различными моделями. В связи с этим, решение задачи теплозащиты обычно носит сопряженный характер и осуществляется последовательными решениями по отдельным областям с последующим их сшиванием на сходимость граничных условий.

Доказательной базой принимаемого технического решения тепловой защиты является расчет термомеханического состояния конструкции. Определяющими факторами термомеханического состояния конструкции являются механизмы взаимодействия продуктов сгорания с материалом стенки, поэтому исходным этапом расчета теплозащиты конструкции является определение коэффициентов тепло-и массопереноса в газовых трактах двигателя.

Полученное распределение коэффициента теплоотдачи по контуру проточной части двигателя используется в качестве граничного условия для решения задачи теплового состояния стенки конструкции. Определение коэффициента массопереноса необходимо для расчета уноса массы материала с поверхности стенки, подвергающейся химической эрозии.

Целью домашнего задания является приобретение навыков расчета коэффициентов тепло-и массопереноса в сопле и газовых трактах РДТТ.

В качестве объекта расчета принимается классическое сопло Лавалья, как типичный случай проточной части двигателя. На последующих этапах обучения, выполнения курсового и дипломного проектирования этот опыт позволяет рассчитывать конкретные технические решения.

Домашнее задание включает в себя следующие основные разделы-этапы расчета.

1. Постановка задачи и идентификация объекта расчета.
2. Термогазодинамический расчет течения.
3. Вычисление распределения коэффициента теплоотдачи по длине проточной части сопла.

[Оглавление](#)

4. Вычисление коэффициента массопереноса по длине сопла.

5. Выводы.

При выполнении домашнего задания следует придерживаться следующих общих рекомендаций по его выполнению.

- Все расчеты проводятся в системе размерности СИ. Представление результатов допускается в кратных или дольных единицах (десятичная система мер – 10^n).
- Каждому шагу решения предшествуют расчетные формулы с комментариями, результаты также комментируются, а по каждому этапу формулируются выводы.
- По итогам расчета делается заключение и предлагаются рекомендации в случае необходимости.
- Расчеты могут вестись с помощью различных инструментов, включая ручной счет, электронные таблицы, MATCAD, специализированные программы и др.
- Выполненное домашнее задание представляется на проверку в виде текста и иллюстраций, подготовленного и распечатанного в текстовом редакторе Word. Листинги компьютерных программ и редакторов символьных вычислений прикладываются в приложении к домашнему заданию.

условно отнести начало координаты s от сечения входа в сопло на некоторое расстояние ($1...2 R_{кр}$) вверх по потоку для избежания неестественных результатов решения для этой области.

Расчет ведется дискретно по задаваемым сечениям. Частота расположения сечений определяется из условной интенсивности изменения параметров течения и теплоотдачи, особенностей конструктивного исполнения сопла и ряда других факторов. При выполнении домашнего задания рекомендуется задавать 20...30 сечений по примеру рисунка 1. Координаты точек контура заносятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Построение координат контура сопла

№ сечения, i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
x , мм															
\bar{x}															
y , мм															
\bar{y}															
s , мм															
№ сечения, i	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
x , мм															
\bar{x}															
y , мм															
\bar{y}															
s , мм															

1.3. Исходные данные задачи

Исходными данными для рабочего тела, как правило, являются: вид топлива, адиабатическая температура продуктов сгорания (ПС), температура торможения T_k^* , давление торможения p_k^* , соответственно перед входом в сопло, показатель адиабаты k , газовая постоянная R_k ПС. Плотность ρ_k^* при параметрах торможения определяется из уравнения

$$\text{состояния } \rho_k^* = \frac{p_k^*}{R_k T_k^*}.$$

1.4. Теплофизические свойства продуктов сгорания

Теплофизические свойства ПС могут быть получены из термодинамического расчета состояния, например, с помощью программы «Терра» или заданы по другим источникам в зависимости от температуры (таблица 2).

Таблица 2 – Теплофизические свойства ПС топлива

T, К	2000	2400	2800	3000	3200	3400	3700
$\mu \cdot 10^4, \text{Па} \cdot \text{с}$							
$C_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$							
Pr							

Примечание. Приводятся значения для равновесного расширения ПС.

2. Термогазодинамический расчет течения продуктов сгорания

Термогазодинамический расчет течения ПС в заданных сечениях сопла рекомендуется выполнять в соответствии с теорией ракетных двигателей с использованием газодинамических функций (ГДФ) [3]. При расчете термогазодинамических параметров потока принимается допущение одномерного адиабатического течения идеального газа. Вычисляются текущие значения давления p , термодинамической температуры T , плотности ρ , скорости течения U и числа Маха.

Газодинамическая функция расходонапряженности $q_{(\lambda)}$ характеризует собой текущую относительную плотность потока при постоянстве расхода в сопле $q_{(\lambda)} = \frac{(\rho U)}{(\rho U)_{\text{кр}}} = \frac{F_{\text{кр}}}{F} = \frac{1}{y^2}$ и определяется зависимостью:

$$q_{(\lambda)} = \lambda \left(1 - \frac{\lambda^2 (k-1)}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

По значениям ГДФ $q_{(\lambda)}$ в текущих сечениях по этой формуле определяется приведенная скорость $\lambda = f(q_{\lambda})$ любым из известных способов (табличным, графическим или математическим).

По текущим значениям λ определяется ГДФ давления $\pi(\lambda)$, температуры $\tau(\lambda)$ и плотности $\varepsilon(\lambda)$ в соответствующих сечениях:

$$\pi(\lambda_i) = (p_i/p_0) = \left[1 - \lambda_i^2 \left(\frac{k-1}{k+1} \right) \right]^{\frac{k}{k-1}},$$

$$\tau(\lambda_i) = (T_i/T_0) \left[1 - \lambda_i^2 \left(\frac{k-1}{k+1} \right) \right],$$

$$\varepsilon(\lambda_i) = (\rho_i/\rho_0) \left[1 - \lambda_i^2 \left(\frac{k-1}{k+1} \right) \right]^{\frac{1}{k-1}}.$$

Далее по текущим значениям ГДФ определяются текущие значения давления $a_{кр}$ температуры и плотности. Скорость течения ПС рассчитывается по формуле $U = a_{кр} \cdot \lambda$, где

$a_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R_0 T_0}$ – скорость ПС в критическом сечении. Число Маха определяется по формуле

$M = U/a$, где $a = \sqrt{kRT}$ – местная скорость звука, $R = R_K$.

Результаты термогазодинамического расчета представляются в таблице 3, а также в графическом виде (рисунок 2).

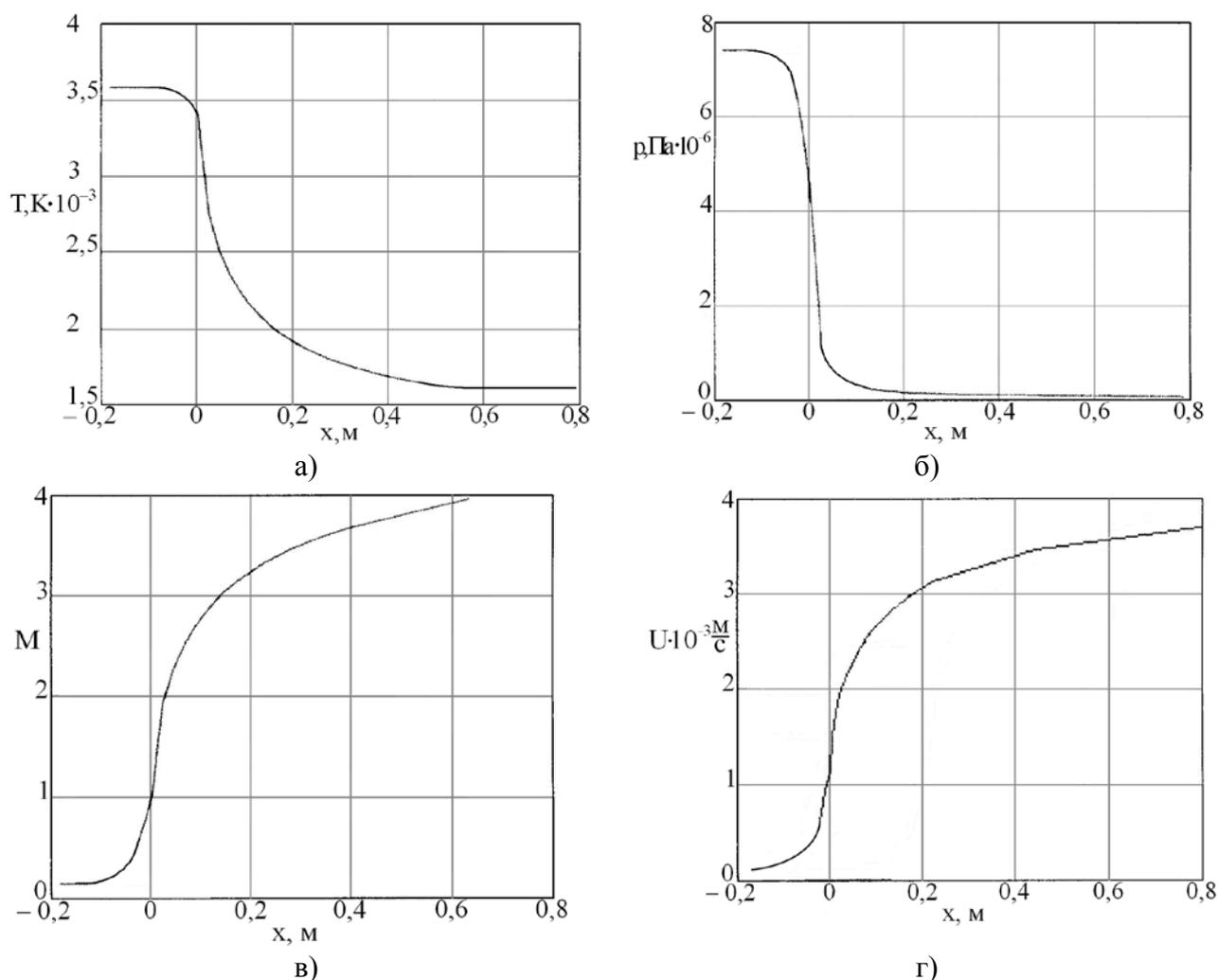


Рисунок 2 – Распределение основных параметров газового потока по длине сопла: а) – термодинамическая температура; б) – давление; в) – число Маха; г) скорость ПС

3. Вычисление распределения коэффициента теплоотдачи по длине проточной части сопла

В практике инженерных решений тепловых задач используются два подхода: полуэмпирическое решение по дифференциальным уравнениям пограничного слоя в интегральных параметрах и решение по феноменологическим моделям, полученным

[Оглавление](#)

эмпирическим или полуэмпирическим путем и представляемых алгебраическими формулами, как правило, в обобщенных переменных (критериальными формулами). Среди различных моделей второй группы наибольшей популярностью в расчетах РДТТ пользуется модель В.С. Авдеевского, полученная для плоской непроницаемой пластины или цилиндра [4]

$$St_w = 0,0326 Re_{ws}^{-0,2} Pr_w^{-0,6} \left(\frac{h_w}{h_r} \right)^{0,39} \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} r M^2 \right)^{0,11},$$

где: $St_w = \frac{\alpha}{\rho_w U c_{pw}}$ – число Стантона (безразмерный коэффициент теплоотдачи); $Re_{ws} = \frac{\rho_w U s}{\mu_w}$ –

число Рейнольдса; $Pr = \frac{\mu_w c_{pw}}{\lambda_w}$ – число Прандтля; $\varepsilon_t = \left(h_w / h_r \right)^{0,39}$ – функциональная поправка на

переменность свойств потока по толщине пограничного слоя; $\varepsilon_m = \left(1 + \frac{k-1}{2} r M^2 \right)^{0,11}$ –

функциональная поправка на сжимаемость потока; r – коэффициент восстановления температуры на адиабатической стенке, $h_r = c_{pr} T_r$ – энтальпия восстановления на адиабатической стенке, $T_r = T \left(1 + \frac{k-1}{2} r M^2 \right)$ – температура восстановления на адиабатической стенке.

Подстрочный индекс w указывает на то, что данная величина определяется по температуре газа на стенке, индекс r – что величина определяется по температуре адиабатической стенки.

Плотность ПС в расчетных сечениях при T_w определяется с помощью уравнения состояния в допущении постоянства по сечению давления и газовой постоянной:

$$\rho_w = \rho \frac{T}{T_w}$$

Остальные свойства газового потока при температуре T_w берутся из таблицы свойств продуктов сгорания (таблица № 2) путем аппроксимации.

Неизвестная априори температура стенки на границе контакта с рабочим телом принимается исходя из практики применяемых материалов теплозащиты, и может быть условно оценена величиной температурного фактора $\bar{T}_w = T_w / T_r = 0,85$. Действительная температура стенки может быть найдена только из решения задачи теплопроводности в сопряженной области – стенке.

Значение коэффициента восстановления можно оценить по следующей рекомендации [5]:

$$r = \sqrt{Pr} \text{ – для ламинарного потока;}$$

[Оглавление](#)

$r = \sqrt[3]{Pr}$ – для турбулентного потока;

Коэффициент теплоотдачи α определяется по значению числа Стантона.

$$\alpha_w = St_w \cdot \rho_w U c_{pw}$$

Результаты промежуточных и конечных результатов заносятся в таблицу № 4.

На основании табличных данных строятся графики распределения Re_w , St_w , α_w , а так же ε_t , ε_M в сопле по продольной координате x (рисунки 3, 4 и 5).

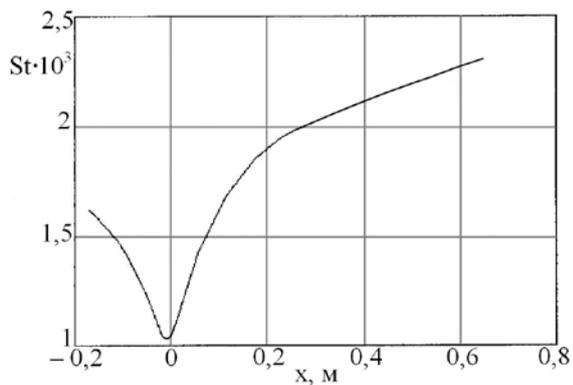
Таблица № 3 – Результаты термогазодинамического расчета

i	$x, \text{ м}$	$\overline{y^2}$	$q(\lambda)$	λ	M	$T, \text{ К}$	$p, \text{ МПа}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$a, \text{ м/с}$	$U, \text{ м/с}$
1	- 160	5,05	0,279	0,174	0,167	3591	6,887	8,394	1094	183
2	- 125	1,74	0,576	0,38	0,367	3559	6,473	7,902	1089	399
...										
6	0	1,0	1	1	1,001	3317	3,988	5,732	1052	1053
...										
...										
30										

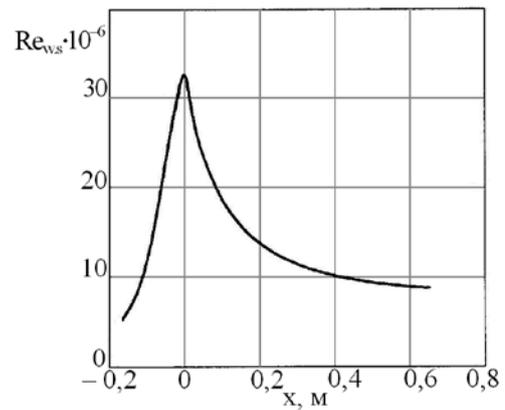
Таблица № 4 – Результаты расчета коэффициента теплоотдачи

i	$x, \text{ м}$	$s, \text{ м}$	Pr	r	$T_r, \text{ К}$	$\frac{c_{pr}, \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{h_r, \text{ МДж}}{\text{кг}}$	$T_w, \text{ К}$	$\frac{c_{pw}, \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{h_w, \text{ МДж}}{\text{кг}}$	$\mu_w 10^4, \text{ Па} \cdot \text{ с}$	$\rho_w, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$Re_{ws} 10^{-6}$	Pr_w	$St_w \cdot 10^3$	$\frac{\alpha_w, \text{ кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\left(\frac{\alpha}{c_p}\right)_w, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$
1	- 160	0,100	0,488	0,787	3598	1,918	5167	2879	1,89	6459	0,133	8,394	5,200	0,457	1,58	5080	2,688
2	- 125	0,186	0,485	0,786	3593	1,918	5159	2874	1,89	6449	0,132	7,902	7,500	0,456	1,51	6100	3,239
...																	
6	0	0,260	0,481	0,784	3548	1,916	6369	2839	1,82	6369	0,131	4,929	32,500	0,455	1,03	17210	9,798
...																	
...																	
30																	

[Оглавление](#)



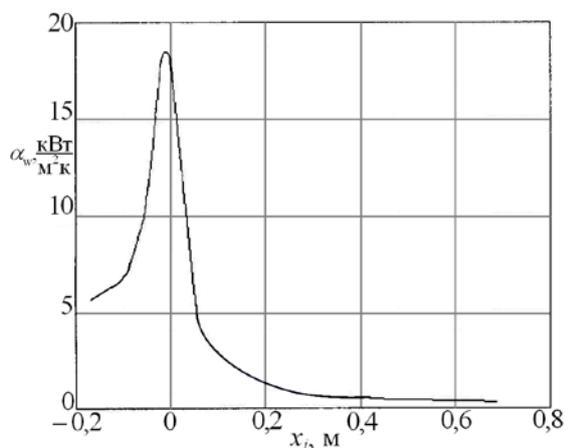
а)



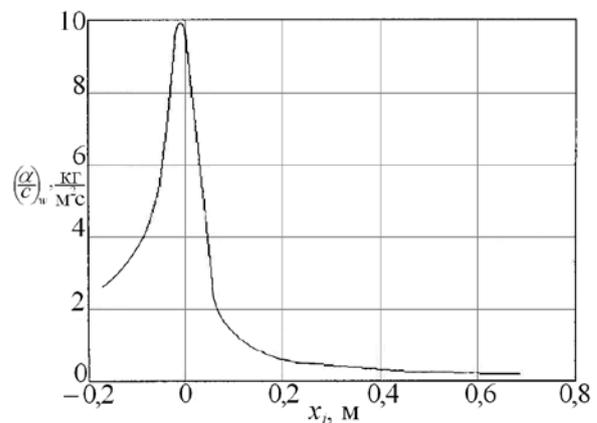
б)

Рисунок 3

Распределение чисел Стантона (а) и Рейнольдса (б) по длине сопла



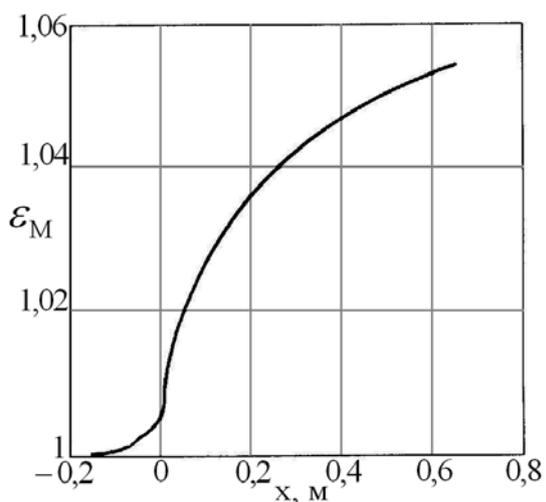
а)



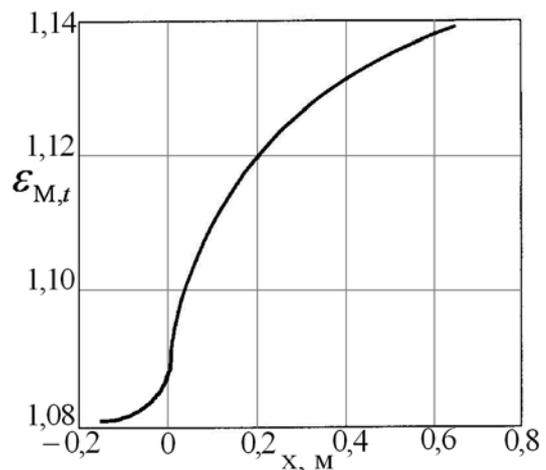
б)

Рисунок 4

Распределение коэффициентов тепло-и массообмена по длине сопла:
а) – коэффициент теплоотдачи; б) – коэффициент массопереноса



а)



б)

Рисунок 5

График распределения функциональных поправок:

а) – функциональная поправка на сжимаемость потока; б) – функциональная поправка на

сжимаемость потока и переменность свойств по толщине пограничного слоя $\varepsilon_{M,t} = \varepsilon_M \cdot \varepsilon_t$

Данная модель коэффициента теплоотдачи может рассматриваться в качестве первого приближения решаемой задачи. С целью усовершенствования методики решения и для повышения точности расчета можно рекомендуется наряду с учетом факторов сжимаемости ε_M и переменности свойств газа ε_t дополнительно учесть и другие факторы воздействия на переносные свойства течения.

Для расчета теплоотдачи в трактах переменного сечения В.С. Авдудевским была предложена методика учета градиентного характера течения (отрицательного градиента давления) с использованием эффективной длины пути $s_{эф}$, соответствующей условию равенства интегральных значений тепловых потоков в градиентном и безградиентном течениях. Эффективная длина текущей координаты взамен физической s для развитого турбулентного пограничного слоя может быть рассчитана по формуле:

$$s_{эф} = \frac{\int_0^s \rho_w U_y^{1,25} ds}{\rho_w U_y^{1,25}}$$

Расчет интеграла можно осуществить либо геометрическим либо численным методом.

Учитывая возможность учета влияния на конвективную теплоотдачу других возмущающих факторов, таких, например, как вдув продуктов пиролиза и гетерогенного окисления композиционных материалов, воздействие конденсированной фазы, шероховатости и прочих специфических явлений, предложенную выше формулу расчета теплоотдачи можно представить в более полном виде:

$$St_w^* = 0,0326 Re_{w,s_{эф}}^{-0,2} Pr_w^{-0,6} \left(\frac{h_w}{h_r} \right)^{0,39} \left(1 + \frac{k-1}{2} rM^2 \right)^{0,11} \cdot \varepsilon_\Sigma,$$

где: ε_Σ – функциональная поправка на действующие факторы. Эта поправка может быть представлена произведением отдельных независимых поправочных коэффициентов, получаемых на основании опытных или иных рекомендаций и учитывающих действие независимо друг от друга отдельных факторов [5], например,

$$\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_{вд} \cdot \varepsilon_{к-ф} \cdot \varepsilon_{ш} \dots$$

Среди разнообразных факторов, влияющих в той или иной мере на конвективный теплообмен, можно отметить: вдув газообразных продуктов деструкции материалов теплозащиты, шероховатость поверхности, наличие в ПС конденсированной фазы, турбулентность ядра потока и др.

Фактор вдува обычно учитывается поправочным коэффициентом $\varepsilon_{\text{вд}} = 1 - \gamma B_{\text{п}}$, где:

$$B_{\text{п}} = \frac{\rho_v v}{\rho U St_o} - \text{тепловой параметр вдува, } \gamma = 0,19 (M_e / M_v)^n, M_e - \text{молярная масса газа на}$$

внешней границе пограничного слоя, M_v – молярная масса вдуваемого газа, ρ_v, v – плотность и скорость вдуваемого газа соответственно, n – показатель степени, зависящий от отношения (M_e / M_v) :

- $n = 0,35$ при $0,22 < (M_e / M_v) \leq 1$;
- $n = 0,7$ при $1 < (M_e / M_v) < 8$;
- $n = 1,0$ при $(M_e / M_v) = 14,5$.

При малом газовыделении, характерном для сопел из углеродных материалов и композитов, влияние вдува на уменьшение конвективных тепловых потоков не превышает $\approx 3\%$. Для материалов теплозащиты корпусов с большим газовыделением уменьшение теплоотдачи из-за вдува может составлять 8...11%.

Для оценки влияния фактора шероховатости поверхности рекомендуется зависимость

$$\varepsilon_{\text{ш}} = 1 + 0,151 \kappa_s^{0,29}$$

где: κ_s – эквивалентная шероховатость в диапазоне $\kappa_s = 0 \dots 0,33$, измеряемая в мкм. При достижении $\kappa_s = 0,33$ теплоотдача стабилизируется, тогда как гидравлическое сопротивление продолжает увеличиваться.

Влияние конденсированной фазы ПС на теплообмен может быть учтено поправочным коэффициентом $\varepsilon_{\text{к-ф}} = 1 + A Re^m Z^n$, где $A = 0,0246$; $m = -0,3$; $n = 2,45$ в диапазоне массового содержания к-фазы $Z = 0,25 \dots 0,6$.

Аналогично могут вводиться поправочные коэффициенты и по другим возможным факторам влияния.

Как уже отмечалось, коэффициент теплоотдачи используется для расчета термомеханического состояния материала конструкции либо непосредственно в качестве граничного условия (ГУ) III рода, либо для определения удельных тепловых потоков в стенку – ГУ II рода.

Удельные конвективные тепловые потоки в стенку определяются согласно Ньютону-Рихману зависимостью:

$$q = \alpha (T_r - T_w).$$

В совокупности с удельными конвективными потоками удельные лучистые тепловые потоки могут быть учтены в виде суммы $q_{\Gamma} = q + q_{\text{л}}$ в уравнении баланса падающего на стенку

теплового потока от ПС и блокируемого ею посредством механизмов термодеструкции материала теплозащитного покрытия (ТЗП) $q_r = q_{\text{дестр}}$.

Так, при поверхностном стационарном уносе материала ТЗП это балансовое уравнение с учетом основных факторов, таких как догрев материала до температуры деструкции и фазовые превращения, имеет вид:

$$q_r = \rho_n u_s c_{pn} (T_s - T_n) + \rho_n u_s Q_s,$$

где: ρ_n , c_{pn} – плотность и теплоемкость исходного материала покрытия соответственно; u_s – скорость перемещения поверхности деструкции; T_n – начальная температура ТЗП; T_s – температура деструкции материала покрытия; Q_s – теплота фазового превращения.

Решая уравнение относительно скорости движения поверхности u_s можно определить скорости линейного и массового стационарного уноса материала ТЗП m с единицы поверхности:

- $u_s = \frac{q_r}{(\rho c_p)_n (T_s - T_n - Q_s/c_{pn})}$;
- $m = \rho_n u_s = \frac{q_r}{c_{pn} (T_s - T_n + Q_s/c_{pn})}$.

Использование значений α в совокупности с T_r и лучистыми потоками q_l в качестве ГУ краевой задачи теплопроводности позволяет определить термомеханическое состояние конструкции узла теплозащиты.

Уравнение энергии для сопряженной с ПС области стенки может быть представлено в следующем виде в осесимметричной постановке

$$\rho c_p \frac{\partial T_{\text{ст}}}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \cdot \lambda_{RR} \frac{\partial T_{\text{ст}}}{\partial R} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \cdot \lambda_{RZ} \frac{\partial T_{\text{ст}}}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda_{ZZ} \frac{\partial T_{\text{ст}}}{\partial Z} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda_{ZR} \frac{\partial T_{\text{ст}}}{\partial Z} \right) + q_w$$

при ГУ III рода со стороны ПС: $-\lambda_{wn} \frac{\partial T}{\partial R_n} = \alpha (T_r - T_w) + \varepsilon_{\text{эф}} \cdot \sigma_o (T^4 - T_w^4)$,

где: ρ , c_p – плотность и теплоемкость материала конструкции соответственно; λ_{ij} – тензор теплопроводности материала; q_w – объемное тепловыделение в материале конструкции; R – текущая координата контура поверхности; λ_{wn} – коэффициент теплопроводности материала ТЗП на поверхности по нормали; $R_n = R_w \cos \varphi$; $R_w = R_o + \int_o^t u_{wn} dt$ – текущая координата перемещаемой во времени границы стенки; $\varepsilon_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент излучательной способности ПС, T – термодинамическая статическая температура ПС, σ_o – постоянная в законе Стефана-Больцмана.

Граничные условия на наружной, сопряженной с соседней областью, поверхности стенки назначаются с учетом конкретных механизмов взаимодействия. Решение подобных

[Оглавление](#)

задач теплопереноса осуществляется по соответствующим методикам расчета аналитического типа или численными машинными методами, иногда в соответствующих приближениях.

4. Вычисление коэффициента массопереноса

Коэффициент массопереноса в тракте двигателя необходимо знать для расчета уноса массы углеродсодержащего материала стенки при его гетерогенном окислении кислородосодержащими компонентами ПС, поскольку он характеризует скорость поступления последних в зону реакции.

В соответствии с тройной аналогией Рейнольдса

$$\frac{1}{2}c_f / S = St = St_D$$

где: c_f – коэффициент трения; S , – фактор аналогии Рейнольдса; $St_D = \frac{f_k}{\rho_w U (c_{k\infty} - c_{kw})} = \frac{D_w}{\rho_w U}$ – диффузионное число Стантона; f_k – плотность потока вещества к-го компонента концентрации c_k ; D – коэффициент массопереноса; c_k – концентрация к-го компонента.

Установленное этой аналогией равенство чисел St и St_D приводит к зависимостям:

$$\frac{\alpha_w}{\rho_w U c_{pw}} = \frac{D_w}{\rho_w U}; \quad \frac{\alpha_w}{c_{pw}} = D_w.$$

Это означает, что коэффициент массопереноса D_w определяется по приведенному значению коэффициента теплоотдачи $(\alpha/c_p)_w$. Результаты расчета величины этого коэффициента также представляются в таблице № 4 и на графике.

Полученное распределение $D_w = (\alpha/c_p)_w$ по длине сопла по своему характеру близко к распределению коэффициента теплоотдачи и может быть использовано при расчете поверхностного уноса материала стенки за счет химической эрозии. Так, например, при диффузионном стационарном режиме уноса его величина составит $m = D_w B_m (Le_k)^{0,7}$, где

$B_m = M_c \sum \frac{c_k}{M_k}$ – окислительный потенциал ПС; M_c и M_k – молярные массы углерода и к-го

кислородсодержащего компонента ПС твердого топлива соответственно; $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$, $z = \frac{D}{a}$,

$Le = \frac{\rho D c_p}{\lambda}$ – число Льюиса (соотношение интенсивностей диффузионного и кондуктивного

переносов энергии), обычно принимаемое равным единице.

5. Основные требования к отчетности

Отчет по выполненному домашнему заданию представляется в распечатанном с использованием текстового редактора виде на листах А4 с титульным листом и оглавлением по образцам, приведенным в Приложениях 1 и 2. В Приложении к отчету можно поместить распечатки из редакторов символьных вычислений, например Math Cad, Maple.

Выполненное и проверенное преподавателем домашнее задание подлежит защите в форме ответов на вопросы с использованием только отчета по домашнему заданию.

Перечень вопросов к защите.

1. Цель определения коэффициента теплоотдачи?
2. Назначение коэффициента массопереноса?
3. Физический смысл функции расходонапряженности?
4. Каким способом определялась приведенная скорость?
5. В чем смысл смещения вверх по потоку начала координаты s ?
6. Как определялась координата s ?
7. Что такое температура восстановления, энтальпия восстановления?
8. Какие температуры рассматриваются в текущем сечении?
9. Что характеризует собой число Стантона St ?
10. Что означает диффузионное число Стантона St_D ?
11. Какова связь между St и St_D , чем она определяется?
12. Что принимается за определяющую температуру расчета коэффициента теплоотдачи?
13. В чем смысл функциональных поправок в формуле Авдуевского?
14. Какие факторы учитывает модель теплоотдачи Авдуевского?
15. В чем суть методики приведенной длины Авдуевского?
16. Как влияет радиационный тепловой поток на стационарную линейную скорость уноса массы ТЗП?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Газодинамические и теплофизические процессы в РДТТ/А.М. Губертов, В.В. Миронов, Д.М. Борисов и др.; Под ред. А.С. Коротеева. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
2. Основы проектирования ракетных двигательных установок на твердом топливе: Метод. указания к выполнению курсового и дипломного проектов по специальности «Ракетные двигатели»/ Д.А. Ягодников, Е.А. Андреев, В.Н. Эйхенвальд, В.А. Козлов; Под ред. Д.А. Ягодникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 168 с.: ил.
3. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн. 1. Учеб. для авиац. спец. вузов/А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др.; Под ред. Кудрявцева В.М., 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1993, - 383 с.: ил.
4. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: Учеб. для авиац. спец. вузов/В.С. Авдудевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебов и др.; Под общ. ред. В.С. Авдудевского, В.К. Кошкина. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1992, - 528 с.: ил.
5. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. Справочник/ С.Д. Панин, Б.В. Румянцев, А.А. Шишков - М.: Машиностроение, 1989, - 420 с.

Приложение 1

Пример титульного листа отчета

Московский Государственный Технический Университет
им. Н.Э. Баумана
Факультет «Энергомашиностроение»

Кафедра Э1

Отчёт

по домашнему заданию

«Расчет коэффициентов тепломассообмена в сопле Лавалья РДТТ»

по дисциплине:

«Теплозащита и прочность конструкций РДТТ»

Выполнил –

Группа –

Проверил –

Результаты защиты –

20__ г.

[Оглавление](#)

Александренков В.П., Ягодников Д.А. «Расчет коэффициентов тепломассообмена в сопле Лавалья РДТТ»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	
Основные условные обозначения.....	
1. Постановка задачи и идентификация объекта расчета (сопла).....	
1.1 Расчетная схема задачи.....	
1.2 Контур сопла	
1.3 Исходные данные задачи.....	
1.4 Теплофизические свойства продуктов сгорания.....	
2. Термогазодинамический расчет течения продуктов сгорания.....	
3. Вычисление распределения коэффициента теплоотдачи по длине проточной части сопла.....	
4. Вычисление коэффициента массопереноса.....	
Список использованных источников.....	
Приложение.....	