

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический
университет»

Кафедра «Ракетные двигатели»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению курсовых работ по дисциплине
«Теплопередача» для студентов специальности 160700.65,
24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных
двигателей» очной формы обучения

Воронеж 2015

Составители: канд. техн. наук Д.П. Шматов
канд. техн. наук С.В. Дахин
асп. Т.С. Тимошинова

УДК 621.45.038

Методические указания к выполнению курсовых работ по дисциплине «Теплопередача» специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"; сост. Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Т.С. Тимошинова. Воронеж, 2015. 104 с.

Разработанные методические указания предназначены для студентов, выполняющих курсовые работы по дисциплине «Теплопередача».

Библиогр: 12 назв. Ил. 5.

Рецензент: д.т.н. А.В. Иванов.

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук проф. В.С. Рачук

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета.

© ФГБОУ ВПО "Воронежский
государственный технический
университет", 2015

Введение

Анализ современного состояния дел в области разработки сложных машиностроительных объектов указывает на значительное возрастание роли расчетно-теоретических методов исследования, и, в частности, математического моделирования на ЭВМ в процессах проектирования и производства. Активное использование современной электронно-вычислительной техники является сегодня необходимым условием совершенствования наукоемких и сложных изделий, поскольку позволяет освободить разработчиков от массы рутинной работы и направить их усилия на осмысленное восприятие и эффективное использование большого объема информации об исследуемом объекте. В настоящее время ведутся активные работы по созданию интеллектуальных систем более высокого уровня, в которых в рамках дружественной среды ЭВМ не требуется освоение огромного многообразия современных достижений в области математики, программирования и прикладных наук.

Расчет наружного охлаждения ЖРД

Под расчетом охлаждения двигателя будем понимать расчет, в результате которого получаем распределение температур стенки и охлаждающей жидкости вдоль камеры сгорания (КС) и сопла. В результате анализа этих данных можно дать заключение о надежности охлаждения данного двигателя.

На практике расчет охлаждения носит, как правило, поверочный характер, т.е. рассчитывается охлаждение двигателя, конструктивные параметры которого уже известны. Затем по результатам расчета вносят соответствующие изменения в конструкцию – изменяют зазор охлаждающего тракта, подбирают новые толщины стенки, изменяют интенсивность пристеночного слоя и соотношение компонентов в нем и т.д. Иногда в результате поверочного расчета охлаждения приходится даже в корне менять конструкцию, например вместо щелевой конструкции охлаждающего тракта в опасных зонах делают спиральный тракт и т.д.

В некоторых случаях, когда требуется хотя бы приближенно подобрать необходимые параметры двигателя, проводится и проектировочный расчет охлаждения. Рассмотрим порядок расчета охлаждения ЖРД, который пригоден как при поверочном, так и при проектировочном расчетах; некоторые особенности этих расчетов будут в соответствующих местах отмечены.

Определение геометрических параметров и составление основной расчетной таблицы

Вычерчивают в масштабе или в натуральную величину геометрические внутренние обводы КС и сопла, полученные в результате газодинамического профилирования. Камеру и сопло разбивают сечениями на ряд участков.

Первое сечение помещают в плоскость смесительной головки, другие – равномерно по длине и в характерных сечениях, как, например, в плоскостях поясов завесы, в местах изменения конструкции охлаждающего тракта, расхода охладителя и т.п. Сопло, особенно в области критического сечения делят на более мелкие участки.

Сечения, которые делят КС и сопло на участки, нумеруются по порядку, начиная с первого, например расположенного в плоскости головки. Обозначаются номерами и участки, расположенные между двумя последовательными сечениями. Удобно номер участка обозначать номером предыдущего сечения (рис. 1).

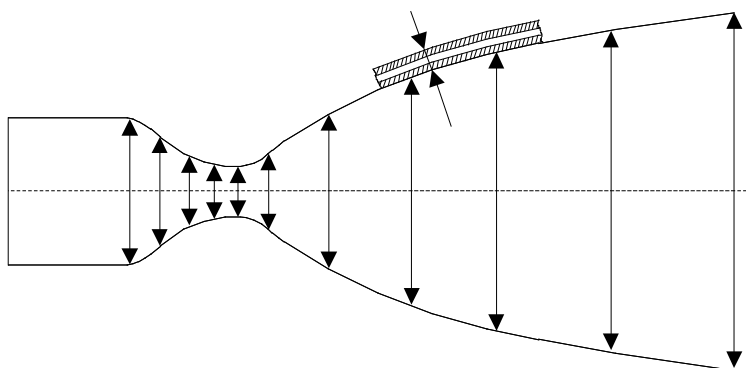


Рис. 1. Схема разбиения КС и сопла на сечения и участки

Составляется таблица, в которую заносят все основные исходные и расчетные данные по мере их вычисления. Прежде всего в таблицу заносят геометрические данные сечений и участков, которые необходимы для расчетов:

D_i – диаметр i -го сечения; $\bar{D}_i = D_i/d_{кр}$ – относительный диаметр i -го сечения; ΔX_i , ΔX_{i1} – длина участка соответственно по образующей и оси камеры (можно

находить прямым измерением с чертежа); $x_i = \sum_1^i \Delta x_i$;

$x_{1i} = \sum_1^i \Delta x_{1i}$ – координаты i -го сечения соответственно по

образующей и оси; $\Delta S_i = \pi \cdot 0,5 \cdot (D_i + D_{i+1}) \cdot \Delta x_i$ – величина боковой поверхности i -го участка со стороны газа; δ_{cti} – толщина стенки камеры на i -ом участке (в отдельной графе указывается материал стенки).

На чертеже или отдельных эскизах изображают форму и размеры сечения охлаждающего тракта на участках. Используя эти данные, вычисляют и заносят в таблицу: h_i – высота охлаждающего тракта (высота зазора между наружной и внутренней стенками); $D_{0,5h} = D_i [1 + (2\delta_{ct} + h) / D]_i$ – средняя окружность охлаждающего тракта в i -ом сечении; n_{pi} – число ребер (или отдельных каналов) в сечении; δ_{pi} – толщина ребра; $\cos \beta_i$ – косинус угла между направлением ребра и образующей; t_i, t_{Ni} – шаг между ребрами по средней окружности $t = \frac{\pi \cdot D_{0,5h}}{n_p}$ и по нормали к оси канала или ребра $t_N = t \cdot \cos \beta$; δ_{Hi} – толщина наружной стенки; $\delta_{pэi}$; $h_{эi}$ – толщина и высота эквивалентного ребра; f_i – площадь проходного сечения охлаждающего тракта; $d_{Гi}$ – гидравлический диаметр охлаждающего тракта.

Для некоторых форм охлаждающего тракта можно использовать следующие формулы.

1) Щелевой тракт без ребер:

$$f = \pi \cdot D_{0,5h} \cdot h = \pi \cdot D \cdot h [1 + (2\delta_{ct} + h) / D];$$

$$d_{\Gamma} = 2 \cdot h.$$

2) Тракт с продольными или винтовыми ребрами (рис. 2):

$$h_{\mathcal{D}} = a/2; \delta_{\mathcal{D}} = 2 \cdot \delta_H; f = t_N \cdot h \left(1 - \frac{\delta_p}{t_N} \right) \cdot n_p;$$

$$d_{\Gamma} = 2h \frac{(t_N - \delta_p)}{(t_N - \delta_p + h)}.$$

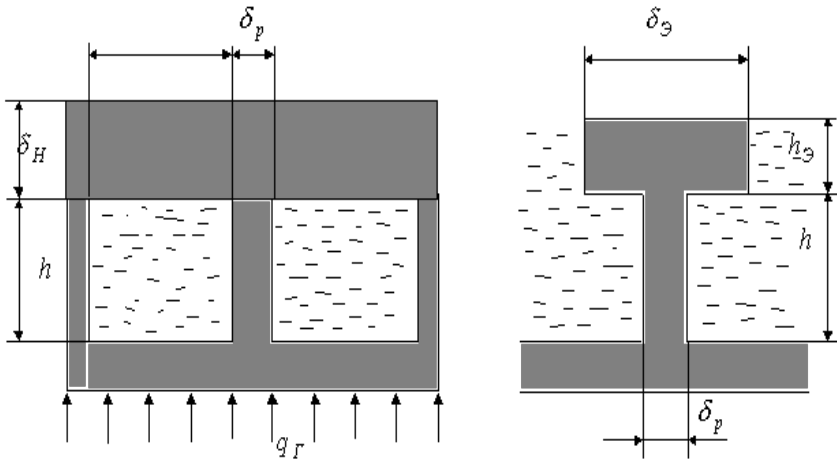


Рис.2. Расчетная схема теплоотдачи прямого ребра

3) Тракт с продольными или винтовыми гофрами (рис. 3)

$$h_{\mathcal{D}} = 0,5 \cdot t; \delta_{\mathcal{D}} = 2\delta_H;$$

$$f = n_p \left\{ t_N \cdot h - \delta_p \left[\sqrt{(h - \delta_p)^2 + (t_N - b)^2} + b \right] \right\};$$

$$d_{\Gamma} = 2h \frac{t_N - \left(\frac{\delta_p}{h} \right) \left[\sqrt{(h - \delta_p)^2 + (t_N - b)^2} + b \right]}{t_N + \sqrt{(h - \delta_p)^2 + (t_N - b)^2}}.$$

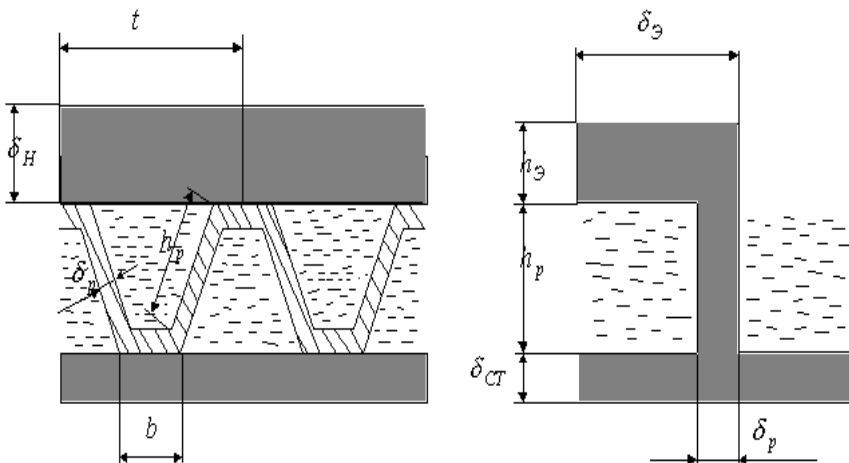


Рис. 3. Расчетная схема теплоотдачи ребра гофра

4) Трубчатый тракт:

$$h_3 = a/2; \delta_p = \delta_3,$$

где a – ширина канала, а δ_p равняется удвоенной толщине стенки трубки;

$$f = a \cdot h \cdot n_p; d_{\Gamma} = \frac{2h}{1 + h/a}.$$

Определение исходных параметров для расчета охлаждения

Над таблицей расчета охлаждения помещается схема организации наружного охлаждения с указанием наименования охлаждающего компонента, места его ввода в охлаждающий тракт, хода течения по тракту, секундного расхода охладителя $\dot{m}_{охл}$ и его изменения (если это происходит) по длине камеры.

Указывается T_{BX} – температура охлаждающего компонента на входе в охлаждающий тракт и $T_{ДОП}$ – максимально допустимая температура нагрева охлаждающего компонента в тракте.

Для расчета необходимо иметь зависимости для охладителя: вязкости $\mu = \mu(T)$, теплопроводности $\lambda = \lambda(T)$, теплоемкости $c_{ж} = c_{ж}(T)$, плотности $\rho = \rho(T)$ и комплекса теплофизических параметров

$$K = \frac{c_p^{0,4} \lambda^{0,6}}{\mu^{0,4}} = K(T).$$

Над таблицей помещаются данные:

- а) наименование двигателя и компонентов;
- б) P_K – давление в КС;
- в) α, k_m – коэффициент избытка окислителя и соотношение компонентов по КС в целом;
- г) $\alpha_{СТ}, k_{мСТ}$ – расчетные значения коэффициента избытка окислителя и соотношения компонентов в пристеночном слое;
- д) $T_{0Г}$ – эффективная температура газов (недиссоциированных) в пристеночном слое;
- е) S – функция физико-термодинамических параметров ПС в пристеночном слое, которая определяется родом топлива, соотношением компонентов $k_{мСТ}$ и температурой стенки.

Обычно в первом приближении рекомендуется принимать температуру стенки со стороны газов, равной некоторому постоянному вдоль камеры значению;

часто $T_{СТ.Г} = const = 1000 \text{ K}$.

В действительности эта температура может быть больше или меньше – это впоследствии уточняется.

Если функции S и температуры $T_{0Г}$ нет, то необходимо их найти. Для этого проводят термодинамический расчет состава недиссоциированных продуктов сгорания. Для углеводородного, азотнокислотного топлива недиссоциированные ПС будут содержать в пристенке следующий равновесный состав: H_2O , CO_2 , H_2 , CO , N_2 . Этот недиссоциированный газ характеризуется так называемой эффективной температурой, определяемой из соотношения:

$$T_{0Г} = \frac{T_{0Г}^D R_{0Г}^D}{R_{0Г}},$$

где $T_{0Г}^D$, $R_{0Г}^D$ – температура и газовая постоянная диссоциированных (действительных) ПС; $T_{0Г}$, $R_{0Г}$ – температура и газовая постоянная недиссоциированных ПС. Из этого соотношения следует, что поскольку у недиссоциированного газа газовая постоянная меньше, чем у диссоциированного, то будет иметь место неравенство $T_{0Г} > T_{0Г}^D$. Таким образом, увеличение интенсивности теплообмена при процессах диссоциации – рекомбинации в пограничном слое производится путем расчета теплообмена на более высокую разность температур или энтальпии недиссоциированного газа по сравнению с диссоциированным.

Функция $S = S(k_{mCT}, T_{CT})$ находится из результатов термодинамического расчета недиссоциированных ПС по формуле:

$$S = 2,06538 \frac{(I_{0Г} - I_{CT}) \mu_{0Г}^{0,15}}{(R_{0Г} T_{0Г})^{0,425} (1 + \bar{T}_{CT})^{0,595} (3 + \bar{T}_{CT})^{0,15}},$$

где $I_{0Г}$ – энтальпия недиссоциированных ПС при $k_{mCT}(T_{0Г})$;
 I_{CT} – энтальпия недиссоциированных ПС при T_{CT} ,

$\mu_{0Г}$, $R_{0Г}$, $T_{0Г}$ – молекулярная масса, газовая постоянная и температура торможения недиссоциированных ПС при $k_{mCT}(T_{0Г})$;

$$\bar{T}_{CT} = \frac{T_{CT}}{T_{0Г}} - \text{температурный фактор.}$$

Вычисление распределения конвективных тепловых потоков

а) основная, или «точная» формула:

$$q_K = \alpha_T \cdot \rho_X \cdot w_\infty (I_{0Г} - I_{CT}),$$

где α_T – безразмерный коэффициент теплоотдачи от газа к стенке;

ρ_X – вспомогательная величина – характерная плотность (изменяется по длине);

w_∞ – скорость недиссоциированных ПС на границе с погранслоем.

Вычисления по «точной» формуле согласно методики В.М.Иевлева проводятся в следующей последовательности.

1. Исходя из заданного полного давления в конце камеры сгорания, расчетного соотношения компонентов в пристеночном слое k_{mCT} и температуры стенки T_{CT} (в первом приближении =1000 К) определяют параметры потока $I_{0Г}$, I_{CT} , $R_{0Г}$, $\mu_{0Г}$, $T_{0Г}$, соответствующие недиссоциированному газу. Посчитав состав недиссоциированных ПС для среза сопла, можно оценить средний показатель процесса k .
2. По известной геометрии камеры строят вдоль контура функцию $\varphi_3(x)$:

$$\varphi_3 = \frac{1 - \beta^2}{\left[1 - \frac{\beta^2}{2(1 + \bar{T}_{CT})}\right]^{1,52} \left[1 - \frac{9\beta^2}{4(3 + \bar{T}_{CT})}\right]^{0,18} \bar{D}^{0,8}},$$

где $\bar{D} = 2R/d_{кр}$ – относительный текущий диаметр;

$$\beta = \frac{\lambda}{\sqrt{(k+1)(k-1)}} - \text{относительная скорость}$$

истечения (λ – коэффициент скорости), вычисляется для каждого расчетного сечения.

3. Определяют характерное число Рейнольдса течения:

$$\text{Re}_0 = \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \frac{P_K d_{кр} \varepsilon_k}{(RT)_{0\Gamma}^{0,5} \mu_{0\Gamma}}.$$

Затем рассчитывают распределение Z_T по длине камеры:

$$Z_T = \frac{4,42 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)} \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \text{Re}_0 \bar{x}}{\bar{D}^{1,2} (1 + \bar{T}_{CT})^{1,52} (3 + \bar{T}_{CT})^{0,18}} \int_0^{\bar{x}} \varphi_3(\bar{x}) d\bar{x},$$

где $\bar{x} = x/d_{кр}$ – относительная координата;

Z_T – вспомогательная функция, пропорциональная толщине потери энергии в погранслое.

Интеграл $\int_0^{\bar{x}} \varphi_3 d\bar{x}$ вычисляется любым численным методом

(либо графически) и заносится в расчетную таблицу.

4. Находим отношение Z_T/Z для всех расчетных сечений:

$$\frac{z_T}{z} \approx \left[1,769 \frac{1 - \beta^2 + \beta^2 \left(1 - 0,08696 \frac{1 - \beta^2}{1 - \bar{T}_{CT} + 0,1\beta^2} \right)}{1 - \bar{T}_{CT} + 0,1\beta^2} \right]^{0,54},$$

где z – вспомогательная функция, пропорциональная толщине потери импульса в погранслое. Зная $\frac{z_T}{z}$, можно найти распределение z по длине камеры.

5. Вычисляют безразмерный коэффициент теплоотдачи для участков:

$$\alpha_T = \frac{\left(\frac{z_T}{z} \right)^{0,089 \text{Pr}^{-0,56}} \left(1 - 0,21 \frac{1 - \text{Pr}}{\text{Pr}^{4/3}} \frac{\beta^2}{1 - \bar{T}_{CT}} \right)^{0,9225}}{\left[307,8 + 54,81 \text{g}^2 (\text{Pr}/19,5) \right] \text{Pr}^{0,45} z^{0,08} - 650}$$

или

$$\alpha_T = A \cdot z^{-n/2} z_T^{-n/2} \text{Pr}^{-m},$$

где $n=0,15$; $m=0,58$ – показатели степеней; A – постоянная. Pr с достаточной точностью можно принимать равным 0,75.

Для расчета в дальнейшем потерь удельного импульса на трение в этом пункте можно вычислить безразмерный коэффициент трения:

$$\alpha = \left(0,03327 \cdot z^{-0,224} + 3,966 \cdot 10^{-4} \right).$$

6. Находят распределение конвективных тепловых потоков по формуле:

$$q_K = a \frac{\alpha_T \varphi_1 P_K \varepsilon_K (I_{0\Gamma} - I_{CT})}{D^2 (R_{0\Gamma} T_{0\Gamma})^{0,5} (1 + \bar{T}_{CT})^{0,82} (3 + \bar{T}_{CT})^{0,18}},$$

где

$$a = 2^{1,18} \left[\frac{2}{k+1} \right]^{1/(k-1)} \sqrt{\frac{2k}{k+1}};$$

$$\varphi_1 = \frac{(1 - \beta^2)}{\left\{ \left[1 - \frac{\beta^2}{2(1 + \bar{T}_{CT})} \right]^{0,82} \left[1 - \frac{9\beta^2}{4(3 + \bar{T}_{CT})} \right]^{0,18} \right\}}.$$

Распределение напряжений трения в сечениях находят по формуле:

$$\tau = b \frac{\alpha \cdot \varphi_1 \cdot \beta \cdot P_K \cdot \varepsilon_\kappa}{\bar{D}^2 (1 + \bar{T}_{CT})^{0,82} (3 + \bar{T}_{CT})^{0,18}},$$

где

$$b = 2^{2,18} \left[\frac{2}{k+1} \right]^{1/(k-1)} \left(\frac{k}{\sqrt{k^2 - 1}} \right).$$

б) Вычисления по первой приближенной формуле:

$$q_K = B \frac{\varphi_1}{\left[\int_0^{\bar{x}} \varphi_3 d\bar{x} \right]^{0,15}} \frac{P_K^{0,85}}{\bar{D}^{1,82} d_{кр}^{0,15}} \frac{S}{Pr^{0,58}}.$$

Здесь $B = \bar{a} \bar{A} (1000)^{-0,105}$ – постоянная, зависящая только от \bar{T}_{CT} и k ;

$\bar{A} = A \left(\frac{z_T}{z} \right)_{кр}^{0,075}$, где $A=0,01352$ – постоянная. Зависящая от

T_{CT} ;

$$\bar{a} = \frac{2^{1,18}}{4,42^{0,15}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{0,85/(k-1)} \left(\frac{2k}{k+1} \right)^{0,425}.$$

в) вычисления по второй приближенной формуле:

$$q_K = B \frac{(1 - \beta^2) P_K^{0,85} S}{D^{1,82} d_{кр}^{0,15} Pr^{0,58}}.$$

Отметим, что при вычислениях конвективных потоков используются следующие размерности:

$$P_K - [Па], \quad R - \left[\frac{Дж}{(кг \cdot град)} \right], \quad \mu - \left[\frac{Н \cdot с}{м^2} \right],$$

$$I - \left[\frac{Дж}{кг} \right],$$

$$S - \left[\frac{Дж}{(м^2 \cdot с)} \right] \left[\frac{м \cdot с^{1,70}}{(кг^{0,85} \cdot град^{-0,105})} \right],$$

$$q - \left[\frac{Дж}{(м^2 \cdot с)} = \frac{Вт}{м^2} \right].$$

Определение лучистого и полного тепловых потоков

Лучистый тепловой поток в камере сгорания (в предположении, что «холодный» пристенок не влияет на его величину и температура стенки $T_{СТ}$ гораздо меньше температуры ПС T_K) можно посчитать по формуле:

$$q_L = \varepsilon_{ст.эф} \cdot \varepsilon_{Г} \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_K}{100} \right)^4.$$

Здесь $\varepsilon_{ст.эф} = \frac{(\varepsilon_{ст} + 1)}{2}$ – эффективная степень черноты стенки;

$\varepsilon_{ст}$ – степень черноты стенки (зависит от материала стенки и состояния ее поверхности). Для стенок камеры сгорания ЖРД, несколько загрязненных сажей, можно принимать $\varepsilon_{ст} \approx 0,8$;

$C_0 \approx 5,67 \frac{Вт}{М^2} \cdot К^4$ – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела.

Степень черноты ПС (в излучении учитываются только CO_2 и H_2O):

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{H_2O} \varepsilon_{CO_2},$$

где эмпирические зависимости $\varepsilon_{CO_2} = \varepsilon(\rho l, T)$ и $\varepsilon_{H_2O} = \varepsilon(\rho l, T, \rho)$ представлены в виде графиков и являются справочным материалом.

Эквивалентная длина луча определяется из таблицы (верхняя строка для цилиндрической камеры сгорания):

$I_{ц} / d$	1,0	1,5	2,5	4,0
$I_{э} / d$	0,6	0,75	0,85	0,9

Значение T_K определяется для соотношения компонентов в среднем по камере. Учет снижения лучистого теплового потока из-за поглощения в низкотемпературном пристеночном слое можно производить по формуле:

$$q_{л.кам} = \varphi \cdot q_{л.к_{м.ср}},$$

где $q_{л.к_{м.ср}}$ – лучистый тепловой поток от ПС, заполняющих камеру сгорания и соответствующих по составу и температуре среднему соотношению компонентов по камере $k_{м.ср}$; φ –

коэффициент, учитывающий уменьшение интенсивности излучения из-за «холодного пристенка».

При расходе в пристеночном слое $20 - 15\% \dot{m}_2$ следует брать $\varphi = 0,6 \div 0,7$; при расходе $15 - 10\% \dot{m}_2$ коэффициент $\varphi = 0,7 \div 0,8$. При очень тонком пристеночном слое, например, созданном пленочной завесой, коэффициент можно поднять до значений $\varphi = 0,9 \div 0,95$.

Посчитав максимальный лучистый поток в конце камеры сгорания, распределение q_L по длине камеры производят по эмпирическим соотношениям Л.Ф.Фролова: 1) начиная с расстояния 50—100 мм от головки камеры и до сечения в докритической части сопла с диаметром $1,2d_{кр}$ q_L постоянный и равный $q_{L.кам}$, вычисленный по средним параметрам газа в КС; 2) непосредственно возле головки $q_L = 0,25q_{L.кам}$; 3) в докритической части сопла (с относительным диаметром \bar{d}), $q_L = q_{L.кам} \left[1 - 12,5(1,2 - \bar{d})^2 \right]$; 4) в критическом сечении сопла $q_L = 0,5q_{L.кам}$; 5) в закритической части сопла $q_L = q_{L.кам} / 2\bar{d}^2$.

В расчетную таблицу заносят значения q_L и $q_G = q_K + q_L$, полученные в предположении $T_{СТ.Г} = const$ и соотношении компонентов в пристеночном слое $k_{мСТ} = k_{мСТ0}$. Если на КС и сопле специальных поясов завесы охлаждения нет, то полученные значения q используют в дальнейшем расчете. Если же на КС или сопле стоят специальные пояса завесы охлаждения, то полученные значения тепловых потоков необходимо уточнить, т.е. учесть влияние завесы охлаждения,

снизив в определенной степени тепловые потоки на соответствующих участках.

Расчет завесы охлаждения

Длину участка испарения жидкой пленки завесы можно определить по формуле:

$$l_{ж} = \eta \frac{\dot{m}_3}{\pi D} \left[\frac{c_{ж} (T_S - T_H)}{\alpha_{к} (T_{Г0} - T_{СР})} + \frac{Q_S}{\alpha_{к} (T_{Г0} - T_S)} \right],$$

где коэффициент устойчивости жидкой пленки $\eta < 1$ зависит от числа Рейнольдса жидкой пленки

$$\eta = \eta(\text{Re}_3) = \eta \left(\frac{\dot{m}_3}{\pi D \mu_{ж}} \right)$$

и является эмпирической величиной;

\dot{m}_3 – расход компонента (обычно, горючего) на завесу;

$c_{ж}$ – теплоемкость жидкости завесы при средней температуре $T_{СР} = 0,5(T_H + T_S)$;

T_H, T_S – начальная температура жидкости и температура ее кипения или разложения при данном давлении в камере;

$\alpha_{к}$ – конвективный коэффициент теплоотдачи при отсутствии завесы $\alpha_{к} = q_{к0} / (T_{Г0} - T_{СТ.Г})$;

$T_{Г0}, T_{СТ.Г}$ – температура газа в пристенке и температура стенки при отсутствии завесы.

Можно считать, что на протяжении жидкой завесы конвективный тепловой поток в стенку будет отсутствовать.

Расчет турбулентного перемешивания завесы сводится к расчету изменения соотношения компонентов в завесе после

того, как жидкая пленка полностью испарится и до того момента, как завеса полностью поглотится пристеночным слоем. Изменение расчетного соотношения компонентов по длине завесы рассчитывается по формуле:

$$k_{m, \text{расч}} = k_{m0} \xi / \left[1 + (1 + k_{m0}) \dot{m}_3 / \dot{m}_{CT} \right],$$

где ξ – коэффициент полноты турбулентного перемешивания, имеющий крайние значения: а) при $x=0$, в самом начале перемешивания, конец испарения завесы, $\xi = 0$ — перемешивание отсутствует; б) при $x = \infty$, далеко от начала перемешивания, $\xi = 1$ — произошло полное перемешивание.

Эмпирический коэффициент полноты турбулентного перемешивания обычно представляется в виде:

$$\xi = 1 - e^{-M \cdot \bar{x}^2},$$

где $\bar{x} = X / H_{CT}$, H_{CT} – начальная толщина пристеночного слоя (для однокомпонентной завесы из горючего ее условно можно считать как среднее по периметру головки расстояние от последнего ряда окислительных форсунок до стенки КС);

$$M = K \dot{m}_{CT} / \dot{m}_3, \text{ причем постоянная } K \text{ отражает}$$

факторы, влияющие на интенсивность турбулентности в пристеночном слое:

$$K \approx (0,05 \div 0,20) \cdot 10^{-2}.$$

Расчет конвективного теплового потока с учетом завесы охлаждения можно вести в следующем порядке:

1. Определяется конвективный тепловой поток без учета завесы охлаждения q_{K0} . При этом считают, что состав и

параметры пристеночного слоя определяются исходным соотношением компонентов в нем k_{m0} , а температуру стенки принимают $T_{CT.G} = 1000 \text{ K}$.

2. Рассчитывают завесу охлаждения, т.е. определяют длину участка испарения $l_{ж}$ и изменение соотношения компонентов вдоль стенки $k_{m.pасч}$.

3. Находят новые значения конвективных тепловых потоков в зоне участка турбулентного перемешивания завесы. Для этого используют формулу пересчета в виде:

$$q_K = q_{K.0} \frac{S}{S_0},$$

где S – функция S , найденная при $k_{m.pасч}$; S_0 – функция S , найденная при k_{m0} .

Заметим, что значения функции S при низких значениях $k_{m.pасч}$ в справочниках может не оказаться, так как расчет состава и температуры горения при низких соотношениях компонентов сопряжен с большими трудностями из-за наличия твердой фазы и значительной степени неравновесности.

Определение температуры нагрева жидкости

Температура жидкости на входе в охлаждающий тракт T_{BX} известна. Температура подогрева жидкости на i -ом участке:

$$\Delta T_i = 0,5(q_{Г.i} + q_{Г.i+1}) \Delta S_i / (\dot{m}_i \cdot c_{ж.i}),$$

где \dot{m}_i – расход охладителя на i -ом участке;

$c_{ж.i}$ – теплоемкость охлаждающей жидкости на i -ом участке;

$q_{Г.i}$, $q_{Г.i+1}$ – тепловые потоки, посчитанные для сечений i и $i+1$.

Если охлаждающая жидкость течет от сопла к головке, то при нумерации сечений от головки на выходе с i -го участка температура

$$T_{ж.i} = T_{ж.i+1} + \Delta T_i,$$

где $T_{ж.i+1}$ – температура на входе в i -ый участок; обычно равна температуре на выходе с $i+1$ участка.

Теплоемкость $c_{ж.i}$ надо брать соответствующей средней температуре жидкости на участке

$$T_{ж.ср.i} = 0,5(T_{ж.i} + T_{ж.i+1}) = T_{ж.i+1} + 0,5\Delta T_i.$$

Этот расчет на каждом участке проводится методом последовательных приближений. В первом приближении, задавшись предположительным подогревом жидкости на участке $\Delta T'_i$, находят $T'_{ж.i}$ и $T'_{ж.ср.i}$ и далее $c'_{ж.i}$. Затем вычисляют подогрев $\Delta T''_i$ и сравнивают его с $\Delta T'_i$. Расчет ведется вплоть до удовлетворительного совпадения последних.

Посчитав подогрев по всем участкам, находим температуру охладителя на выходе $T_{ж.вых}$. Эта температура не должна быть выше допустимой, определяемой, как известно, температурой кипения или разложения компонента при давлении порядка P_K .

Определение необходимых проходных сечений охлаждающего тракта

Этот пункт расчета выполняется при проектировании охлаждающего тракта. Из условий теплового баланса проходное сечение на i -ом участке:

$$f_i = \dot{m} \left\{ \frac{\left[0,023 K (T_{ст.ж} - T_{ж}) \eta_p \left(1 + \frac{2\delta_{ст}}{D_i} \right) \right]}{(q_{Г} d_{Г}^{0,2})} \right\}^{1,25},$$

где комплекс $K = \frac{(c_p^{0,4} \lambda^{0,6})}{\mu^{0,4}}$ определяется в соответствии с температурой $T_{ж.i}$;

η_p – коэффициент эффективности оребрения (см. следующий раздел);

температуру жидкой стенки можно оценить предварительно по формуле

$$T_{ст.ж} = T_{ст.Г} - \left(\frac{\delta_{ст}}{\lambda} \right) q_{Г}.$$

После определения f_i с учетом технологических и конструктивных требований производится проектирование тракта – устанавливаются зазоры, форму и конструкцию ребер связей, толщины стенок и другое в каждом сечении КС и сопла.

Определение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{ж}$, коэффициента эффективности оребрения η_p и скорости течения жидкости $w_{ж}$

Вычисления проводятся для каждого i -го сечения в следующем порядке:

а) определяем плотность тока $(\rho w) = \dot{m} / f$;

б) комплекс теплофизических параметров

$$K = \frac{(c_p^{0,4} \lambda^{0,6})}{\mu^{0,4}};$$

в) коэффициент теплоотдачи $\alpha_{ж} = 0,023(\rho w)^{0,8} \frac{K}{d_{\Gamma}^{0,2}}$

(формула Нуссельта-Крауссольда);

г) используя соотношение для ребра и эквивалентного ребра, произведение

$$(\mu h)_{p,э} = \left(h \sqrt{\frac{2\alpha_{ж}}{\lambda\delta}} \right)_{p,э};$$

д) коэффициент эффективности оребрения

$$\eta_p = 1 + \frac{1}{\cos \beta} \left[2 \frac{h_p}{t} \frac{th(\mu h)_p}{(\mu h)_p} \xi_p - \frac{\delta_p}{t} \right],$$

где для ребра

$$\xi_p = \frac{\left[1 + \frac{\mu_p}{\mu_э} \frac{th(\mu h)_э}{th(\mu h)_p} \right]}{\left[1 + \frac{\mu_p}{\mu_э} th(\mu h)_э th(\mu h)_p \right]};$$

для гофра

$$\xi_p = \frac{\left[1 + \frac{\mu_p}{2\mu_э} \frac{th(\mu h)_э}{th(\mu h)_p} \right]}{\left[1 + \frac{\mu_p}{2\mu_э} th(\mu h)_э th(\mu h)_p \right]};$$

для трубок $\xi_p = 1$.

Напомним, что ξ_p – это коэффициент, учитывающий повышение эффективности оребрения за счет теплоотдачи присоединенной поверхности наружной стенки. Следует отметить, что при $(\mu h)_p > 3$ влияние наружной оболочки на усиление эффекта оребрения практически исчезает и $\xi_p \rightarrow 1$.

е) скорость течения охлаждающей жидкости в сечении тракта $w = \frac{(\rho w)}{\rho}$, где плотность жидкости $\rho_{ж}$ находят в соответствии с ее температурой $T_{ж}$.

Определение действительных значений тепловых потоков и температуры стенки

Действительную температуру стенки со стороны газа можно найти аналитически на каждом i -ом участке по формуле

$$T_{ст.г} = \frac{\frac{T_{0г}}{(T_{0г} - 1000)} + \frac{T_{ж}}{[\delta_{ст}/\lambda + 1/(\alpha_{ж}\eta_p)]q_{к1000}} + \frac{q_l}{q_{к1000}}}{\frac{1}{(T_{0г} - 1000)} + \frac{1}{[\delta_{ст}/\lambda + 1/(\alpha_{ж}\eta_p)]q_{к1000}}}.$$

После определения новых $T_{ст.г}$ можно пересчитать конвективные тепловые потоки по формуле

$$\frac{q_k}{q_{к1000}} = \frac{(T_{0г} - T_{ст.г})}{(T_{0г} - 1000)}.$$

При желании получить более точный расчет можно снова рассчитать распределение температур жидкости исходя из новых значений конвективных, а, следовательно, и суммарных тепловых потоков, затем заново пересчитать

потоки и т.д. до достижения сходимости по температуре «газовой стенки».

Определение температуры поверхности стенки со стороны жидкости

Для определения $T_{ст.ж}$ используется уравнение теплопроводности для твердой стенки:

$$T_{ст.ж} = T_{ст.г} - \left(\frac{\delta_{ст}}{\lambda} \right) q_{г}.$$

Расчет $T_{ст.ж}$ проводится для всех расчетных сечений, при этом необходимо учитывать зависимость коэффициента теплопроводности стенки от ее температуры. За определяющую температуру стенки следует брать среднюю между температурами горячей и холодной поверхностей. Так как температура «жидкой стенки» – искомая величина, то здесь не обойтись без итерационного расчета.

Ориентировочно можно считать, что для надлежащего охлаждения требуется, чтобы температура стенки не превышала температуру кипения жидкостей больше чем на $100 - 150^{\circ}$. Что касается допустимой температуры стенки в случае, если охладитель разлагается (например, перекись водорода, гидразин и т.д.), то к значению допустимых температур перегрева стенки надо подходить очень осторожно, используя соответствующие экспериментальные данные.

Если в результате расчета окажется, что имеются участки, где температура стенки со стороны жидкости превышает допустимую температуру перегрева, то необходимо принять меры к ее снижению. Для этого следует либо уменьшить тепловые потоки (например, усилить внутреннее охлаждение), либо соответствующим образом подобрать материал и толщину стенки. В тех случаях, когда

изменяется тепловой поток, расчет необходимо проделать снова.

Пример вычисления конвективных тепловых потоков

Применим изложенные выше расчетные соотношения для определения конвективных тепловых потоков по длине камеры, как наиболее сложную часть расчета охлаждения. Исходными данными в этом случае являются:

компоненты топлива – $O_2 + H_2$; средний показатель адиабатического процесса – $k = 1,2$; коэффициент избытка окислителя в «пристенке» – $\alpha = 0,75$; давление в камере сгорания – $P_k = 100 \text{ Атм}$. Геометрия камеры задана парами (координата – диаметр):

№	1	2	3	4	5
$X, \text{ м}$	0	0,052	0,206	0,2625	0,2955
$D, \text{ м}$	0,138	0,138	0,138	0,122	0,095

6	7	8	9	10	11
0,319	0,3615	0,386	0,434	0,506	0,7095
0,073	0,0662	0,124	0,18	0,263	0,479

12	13	14	15	16	17
0,941	1,22	1,519	1,854	2,4205	3,205
0,68	0,87	1,053	1,221	1,444	1,675

Критическое (минимальное) сечение № 7. Далее необходимо посчитать распределение скорости по длине камеры. Скорость здесь принято представлять в виде относительной скорости истечения $\beta = \frac{\lambda}{\sqrt{(k+1)(k-1)}}$,

где λ – коэффициент скорости. Относительная скорость связана с относительным диаметром сечения $\bar{D} = \frac{D_i}{D_{кр}}$ при помощи газодинамического соотношения:

$$\frac{1}{\bar{D}^2} = \beta(1 - \beta^2)^{1/(k-1)} \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \left/ \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} \right.$$

В нашем случае, при $k=1,2$, это уравнение преобразуется к виду

$$\frac{1}{\bar{D}^2} = 5,34 \cdot \beta \cdot (1 - \beta^2)^5.$$

Таким образом, относительная скорость связана с относительным диаметром нелинейным уравнением, решать которое можно любым известным способом, в частности, методом Ньютона. В нашем случае:

$$f(\beta) = 5,34 \cdot \beta \cdot (1 - \beta^2)^5 - \frac{1}{\bar{D}^2};$$

$$f'(\beta) = 5,34 \cdot (1 - \beta^2)^4 (1 - 11\beta^2).$$

Итерационный процесс:

$$\beta^{(i+1)} = \beta^{(i)} - \frac{5,34 \cdot \beta^{(i)} \cdot (1 - \beta^{(i)2})^5 - \frac{1}{\bar{D}^2}}{5,34 \cdot (1 - \beta^{(i)2})^4 (1 - 11\beta^{(i)2})}.$$

При задании начального приближения следует помнить, что область значений относительной скорости от 0 до 1.

В результате получаем распределение скорости по длине камеры в зависимости от относительного диаметра сечения:

№	1	2	3	4	5
\bar{D}	2,08	2,08	2,08	1,84	1,43
β	0,0437	0,0437	0,0437	0,0558	0,0954
6	7	8	9	10	11
1,1	1	1,87	2,72	3,97	7,23
0,182	0,301	0,623	0,696	0,751	0,814
12	13	14	15	16	17
10,3	13,14	15,9	18,4	21,8	25,3
0,842	0,858	0,87	0,878	0,887	0,894

Далее нам необходимо посчитать температуру недиссоциированных ПС при соотношении компонентов в пристеночном слое. Сначала выполняем обычный термодинамический расчет.

Определяем массовое стехиометрическое соотношение компонентов

$$k_{m0} = -\frac{\mu_{ок} \sum b_{i,r} \nu_i}{\mu_r \sum b_{i,ок} \nu_i} = -\frac{32 \cdot 2 \cdot (-1)}{2 \cdot 2 \cdot 2} = 8 \frac{\text{кг.ок}}{\text{кг.гор}},$$

мольное стехиометрическое соотношение

$$k'_{m0} = k_{m0} \frac{\mu_r}{\mu_{ок}} = 8 \cdot \frac{1}{18} = 0.5 \frac{\text{МОЛЬ.ОК}}{\text{МОЛЬ.Г.}},$$

действительное мольное соотношение

$$k'_m = \alpha \cdot k'_{m0} = 0.75 \cdot 0.5 = 0.375 \frac{\text{МОЛЬ.ОК}}{\text{МОЛЬ.Г.}},$$

Условная формула топлива $H_{b_H} O_{b_O}$,

где $b_H = b_{Hr} + \alpha \cdot K'_{m0} \cdot b_{Ho} = 2 + 0 = 2$;

$b_O = \alpha \cdot K'_{m0} \cdot b_{Oo} = 0,375 \cdot 2 = 0,75$, т. е условная формула $H_2O_{0,75}$.

$$\text{Энтальпия топлива } i_T = \frac{-4353,9 - 6 \cdot 398,3}{7} = -963,4 \frac{\text{КДж}}{\text{кг}}$$

В результате решения системы химического равновесия получаем следующие параметры:

$$T = 3550 \text{ K};$$

$$P_{H_2O} = 66,646 \text{ Ат м}; P_{OH} = 3,9926 \text{ Ат м};$$

$$P_{H_2} = 25,3189 \text{ Ат м}; P_{O_2} = 0,3613 \text{ Ат м};$$

$$P_H = 3,325 \text{ Ат м}; P_O = 0,3567 \text{ Ат м}$$

$$\mu_{\text{ПС}} = 13,387 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}; R = \frac{8,314}{13,387} = 0,621 \frac{\text{КДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Для применения методики В.М.Иевлева необходимо заменить диссоциированные ПС недиссоциированными. Для расчета недиссоциированных ПС в составе необходимо учитывать лишь H_2O и H_2 . В этом случае система для расчета равновесного состава имеет вид:

$$M_T \cdot 2 = 2P_{H_2O} + 2P_{H_2} \Rightarrow P_{H_2O} = 3P_{H_2}$$

$$M_T \cdot 0,75 = P_{H_2O}$$

$$P_{H_2} = 25 \text{ Ат м.}$$

$$\Rightarrow P_{H_2O} = 75 \text{ Ат м.}$$

$$\mu_{\text{ПС}} = 14 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}; R = \frac{8,314}{14} = 0,59386 \frac{\text{КДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Температуру недиссоциированных ПС в камере сгорания находим по формуле:

$$T_{0\Gamma} = T_{0\Gamma}^D R_{0\Gamma}^D / R_{0\Gamma} = 3550 \cdot 621 / 594 = 3712 \text{ K}.$$

Принимая по длине температуру «газовой стенки» $T_{cr} = const = 1000 \text{ K}$, находим температурный фактор $\bar{T}_{cr} = 1000 / 3712 \approx 0,27$. Далее последовательность расчета следующая.

$$\left(\frac{z_T}{z}\right)_{кр} = \left[1,769 \frac{1 - \beta^2 + \beta^2 \left(1 - 0,08696 \frac{1 - \beta^2}{1 - \bar{T}_{cm} + 0,1\beta^2} \right)}{1 - \bar{T}_{cm} + 0,1\beta^2} \right]^{0,54} = 1,593$$

$\left. \begin{array}{l} \beta = 0,301 \\ \bar{T}_{cm} = 0,27 \end{array} \right\}$

$$\bar{A} = 0,01352 \cdot \left(\frac{z_T}{z}\right)_{кр}^{0,075} = 0,014.$$

$$\bar{a} = \frac{2^{1,18}}{4,42^{0,15}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{0,85/(k-1)} \left(\frac{2k}{k+1}\right)_{k=1,2}^{0,425} = 1,2547.$$

$$B = \bar{a} \cdot \bar{A} \cdot (1000)^{-0,105} \approx 8,51 \cdot 10^{-3}.$$

Далее находим распределение $\varphi_1(\bar{D})$ и $\varphi_3(\bar{D})$ по формулам:

$$\varphi_1 = \frac{(1 - \beta^2)}{\left\{ \left[1 - \frac{\beta^2}{2(1 + \bar{T}_{cr})} \right]^{0,82} \left[1 - \frac{9\beta^2}{4(3 + \bar{T}_{cr})} \right]^{0,18} \right\}},$$

$$\varphi_3 = \frac{1 - \beta^2}{\left[1 - \frac{\beta^2}{2(1 + \bar{T}_{CT})}\right]^{1,52} \left[1 - \frac{9\beta^2}{4(3 + \bar{T}_{CT})}\right]^{0,18} \bar{D}^{0,8}}.$$

На рис. 4 приведены указанные распределения.

Для вычисления конвективного теплового потока нам нужно

отношение $\frac{\varphi_1}{\left[\int_0^{\bar{x}} \varphi_3 d\bar{x}\right]^{0,15}}$, которое можно вычислить,

$$\left[\int_0^{\bar{x}} \varphi_3 d\bar{x}\right]^{0,15},$$

используя полученные распределения (рис. 4) либо применять

приближенную формулу $\frac{\varphi_1}{\left[\int_0^{\bar{x}} \varphi_3 d\bar{x}\right]^{0,15}} = 1 - \beta^2$.

$$\left[\int_0^{\bar{x}} \varphi_3 d\bar{x}\right]^{0,15}$$

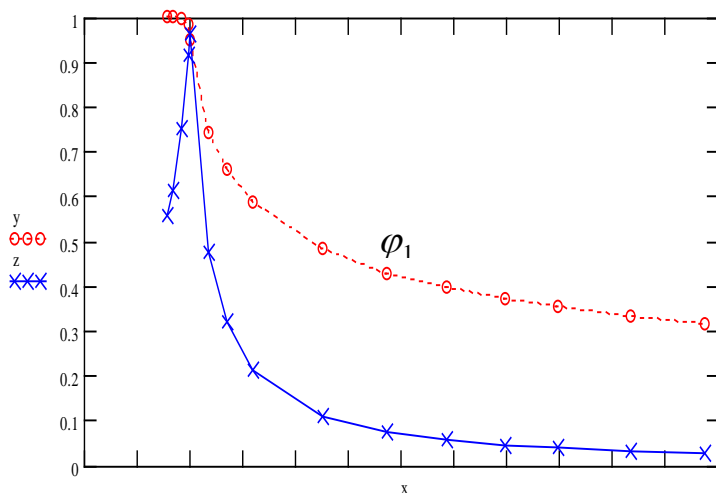


Рис. 4. Зависимость функций φ_1 и φ_3 от \bar{D} .

В итоге конвективный тепловой поток определяется по формуле:

$$q_K = B \frac{(1 - \beta^2) P_K^{0,85}}{\overline{D}^{1,82} d_{кр}^{0,15}} \frac{S}{Pr^{0,58}} = 103021300 \cdot \frac{1 - \beta^2}{\overline{D}^{1,82}}.$$

Распределение конвективного теплового потока по длине камеры представлено в следующей таблице:

№	1	2	3	4	5
$q \cdot 10^{-7}$ Вт/м ²	2,71	2,71	2,71	3,38	5,32
6	7	8	9	10	11
8,37	9,36	2,01	0,86	0,365	0,095
12	13	14	15	16	17
0,043	0,025	0,016	0,012	0,008	0,0057

В заключение отметим, что при рассмотрении последнего примера не предъявлялось слишком высоких требований к точности вычислений, однако при выполнении курсового и дипломного проектирования она вполне приемлема.

Пример расчёта кожухотрубчатого теплообменного аппарата

Задание.

Провести тепловой и гидравлический расчёты кожухотрубчатого теплообменного аппарата с внутренними перегородками при следующих исходных данных:

Греющая среда	вода
Температура на входе, t_1' , °C	90
Температура на выходе, t_1'' , °C	30

Расход, G_1 , кг/с	-
Нагреваемая среда	вода
Температура на входе, t_2' , °C	10
Температура на выходе, t_2'' , °C	50
Расход, G_2 , кг/с	5
Внутренний диаметр теплообменных трубок, $d_{в}$, м	0,016
Толщина стенки трубок, δ_c , м	0,001
Материал трубок	латунь

Расчёт.

1. Так как греющий и нагреваемый теплоносители одинаковы, то для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду направим греющий теплоноситель в трубное пространство, а нагреваемый – в межтрубное пространство.

2. Определяем средние температуры теплоносителей как среднее арифметическое температур на входе и выходе теплоносителей:

$$\bar{t}_1 = \frac{90 + 30}{2} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\bar{t}_2 = \frac{10 + 50}{2} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3. В табл. П-7 Приложения 3 по средним температурам теплоносителей определяем их теплофизические свойства:

$$v_1 = 0,478 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda_1 = 0,659 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); c_{p1} = 4179 \text{ Дж}/(\text{кгК});$$

$$v_2 = 0,805 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda_2 = 0,618 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); c_{p2} = 4174 \text{ Дж}/(\text{кгК}).$$

4. По (3) вычисляем тепловую мощность ТОА

$$Q = G_2 \cdot c_{p2} (t_2'' - t_2') = 5 \cdot 4174 \cdot (50 - 10) = 834800 \text{ Вт}.$$

5. Вычисляем неизвестный расход греющего теплоносителя

$$G_1 = \frac{Q}{c_{p1}(t'_1 - t''_1)\eta_{\text{п}}} = \frac{834800}{4179(90 - 30)0,96} = 3,47 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

6. Из таблицы ниже задаёмся средней скоростью движения теплоносителей. Как правило, скорость в межтрубном пространстве меньше чем в трубном.

Теплоноситель	Скорость, м/с
Вязкие жидкости	≤ 1
Маловязкие жидкости и вода	1 – 3
Запылённые газы	6 – 10
Чистые газы	12 – 16
Пар насыщенный	30 – 50
Пар перегретый	50 – 75

Принимаем: $\overline{w}_1 = 2 \text{ м/с}; \overline{w}_2 = 1 \text{ м/с}$.

7. Определим режим течения теплоносителей.

$$Re_1 = \frac{\overline{w}_1 d_{\text{в}}}{\nu_1} = \frac{2 \cdot 0,016}{0,478 \cdot 10^{-6}} = 66946 > 10000$$

Для греющего теплоносителя режим – турбулентный.

Так как в межтрубном пространстве имеются поперечные перегородки, то течение там поперечно-продольное и для нагреваемого теплоносителя определяющим размером является наружный диаметр теплообменных трубок

$$d_{\text{н}} = d_{\text{в}} + 2\delta_{\text{с}} = 0,016 + 2 \cdot 0,001 = 0,018 \text{ м}$$

$$Re_2 = \frac{\overline{w_2} d_{\text{в}}}{\nu_2} = \frac{1 \cdot 0,018}{0,805 \cdot 10^{-6}} = 22360 > 2000$$

8. С учётом п. 7 вычисляем коэффициенты теплоотдачи обоих теплоносителей, задавшись в первом приближении температурой стенки трубки равной среднему арифметическому между средними температурами теплоносителей.

$$\overline{t_{1c}^I} = \frac{\overline{t_1} + \overline{t_2}}{2} = \frac{60 + 30}{2} = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Из табл. П-7 определим: по средней температуре теплоносителей - $Pr_{ж1} = 2,98$, $Pr_{ж2} = 5,42$, по средней температуре стенки - $Pr_{c1} = 3,93$, $Pr_{c2} = 3,93$.

Для греющего теплоносителя воспользуемся критериальным уравнением М.А. Михеева (16).

$$\overline{Nu_1} = 0,021 Re_1^{0,8} \cdot Pr_{ж1}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж1}}{Pr_{c1}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_1$$

$$\overline{Nu_1} = 0,021 \cdot 66946^{0,8} \cdot 2,98^{0,43} \left(\frac{2,98}{3,93} \right)^{0,25} \cdot 1 = 227,34$$

Для нагреваемого теплоносителя используем критериальное уравнение продольно-поперечного обтекания трубного пучка (27)

$$\overline{Nu_2} = 0,19 Re_2^{0,6} \cdot Pr_{ж2}^{0,33} \left(\frac{Pr_{ж2}}{Pr_{c2}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_{\text{п}}$$

$$\overline{Nu_2} = 0,19 \cdot 22360^{0,6} \cdot 5,42^{0,33} \left(\frac{5,42}{3,93} \right)^{0,25} \cdot 0,82 = 120,05$$

Здесь $\varepsilon_{\Pi} = 0,82$ (определяем по табл. 6, полагая, что расстояние между перегородками равно диаметру кожуха ТОА).

Вычисляем коэффициенты теплоотдачи:

$$\overline{\alpha}_1 = \frac{\overline{Nu}_1 \cdot \lambda_1}{d_{\text{в}}} = \frac{227,34 \cdot 0,659}{0,016} = 9364 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})},$$

$$\overline{\alpha}_2 = \frac{\overline{Nu}_2 \cdot \lambda_2}{d_{\text{н}}} = \frac{120,05 \cdot 0,618}{0,018} = 4122 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}.$$

9. Вычисляем коэффициент теплопередачи по (7) предварительно определив в табл. П-3 по средней температуре стенки коэффициент теплопроводности материала стенки $\lambda_2 = 112,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ и в табл. П-1 величину термического сопротивления загрязнений $R_{\text{заг}} = 0,0007 \text{ (м}^2\text{К)}/\text{Вт}$.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\overline{\alpha}_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\overline{\alpha}_2} + R_{\text{заг}}}.$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{9364} + \frac{0,001}{112,3} + \frac{1}{4122} + 0,0007} = 945 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}.$$

10. Для определения среднелогарифмического температурного напора графически изобразим изменение температуры по длине ТОА (рис. 1) и определим большую и меньшую разность температуры для противоточной схемы течения теплоносителей:

$$\Delta t_{\text{б}} = 90 - 50 = 40 \text{ К},$$

$$\Delta t_{\text{м}} = 30 - 10 = 20 \text{ К}.$$

Затем по формуле (58) определяем

$$\overline{\Delta t_n} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{40 - 20}{\ln \frac{40}{20}} = 28,9 \text{ К.}$$

11. Из уравнения теплопередачи (1) определяем площадь поверхности теплообмена

$$F = \frac{Q}{k \Delta t_n} = \frac{834800}{945 \cdot 28,9} = 30,6 \text{ м}^2.$$

12. Уточняем температуру стенки по (2):

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{834800}{30,6} = 27281 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$\overline{t_{c1}} = \overline{t_1} - q \frac{1}{\alpha_1} = 60 - 27281 \frac{1}{9364} = 57,09 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\overline{t_{c2}} = \overline{t_2} + q \frac{1}{\alpha_2} = 30 + 27281 \frac{1}{4122} = 36,62 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\overline{t_c^{II}} = \frac{\overline{t_{c1}} + \overline{t_{c2}}}{2} = \frac{57,09 + 36,62}{2} = 46,86 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\Delta_\varepsilon = \frac{|\overline{t_c^I} - \overline{t_c^{II}}|}{\overline{t_c^I}} \cdot 100\% = \frac{|45 - 46,86|}{45} \cdot 100\% = 4,1 \text{ } \%.$$

13. Так как погрешность превышает 1 %, то возвращаемся к п. 7, где вместо $\overline{t_{1c}^I} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ принимаем за среднюю температуру стенки $\overline{t_c^{II}} = 46,86 \text{ }^\circ\text{C}$. По новым

температурам стенки, $\overline{t_{c1}} = 57,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\overline{t_{c2}} = 36,62 \text{ }^{\circ}\text{C}$, определяем критерий Прандтля стенки для греющего и нагреваемого теплоносителей - $Pr_{c1} = 3,14$, $Pr_{c2} = 4,69$. После чего расчёт повторяем:

$$\overline{Nu}_1 = 0,021 \cdot 66946^{0,8} \cdot 2,98^{0,43} \left(\frac{2,98}{3,14}\right)^{0,25} \cdot 1 = 240,46$$

$$\overline{Nu}_2 = 0,19 \cdot 22360^{0,6} \cdot 5,42^{0,33} \left(\frac{5,42}{4,69}\right)^{0,25} \cdot 0,82 = 114,86$$

$$\overline{\alpha}_1 = \frac{240,46 \cdot 0,659}{0,016} = 9904 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})},$$

$$\overline{\alpha}_2 = \frac{114,86 \cdot 0,618}{0,018} = 3944 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})},$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{9904} + \frac{0,001}{112,3} + \frac{1}{3944} + 0,0007} = 940 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})},$$

$$\overline{\Delta t_n} = 28,9 \text{ К},$$

$$F = \frac{834800}{940 \cdot 28,9} = 30,7 \text{ м}^2,$$

$$q = \frac{834800}{30,7} = 27192 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

$$\overline{t_{c1}} = 60 - 27192 \frac{1}{9904} = 57,25 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\overline{t_{c2}} = 30 + 27192 \frac{1}{3944} = 36,90 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\overline{t_c^{III}} = \frac{\overline{t_{c1}} + \overline{t_{c2}}}{2} = \frac{57,25 + 36,90}{2} = 47,08 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta_t = \frac{|\overline{t_c^{II}} - \overline{t_c^{III}}|}{\overline{t_c^{II}}} \cdot 100\% = \frac{|46,86 - 47,08|}{46,86} \cdot 100\% = 0,47 \text{ } \%$$

Так как относительная погрешность не превышает 1 % (точность расчётов задаётся преподавателем), считаем тепловой расчёт выполненным верно.

14. При построении графика изменения температуры теплоносителей по поверхности теплообмена необходимо рассчитать три промежуточных точки. Для этого разобьём поверхность теплообмена на четыре примерно равные части по $7,7 \text{ м}^2$. Затем по формулам (63) рассчитаем по три промежуточных температуры для каждого теплоносителя.

$$C_1 = c_{p1} \cdot G_1 = 4179 \cdot 3,47 = 14501 \frac{\text{Вт}}{\text{К}},$$

$$C_2 = c_{p2} \cdot G_2 = 4174 \cdot 5 = 20870 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}.$$

Для греющего теплоносителя:

$$F_{11} = 7,7 \text{ м}^2; F_{12} = 15,4 \text{ м}^2; F_{13} = 23,1 \text{ м}^2.$$

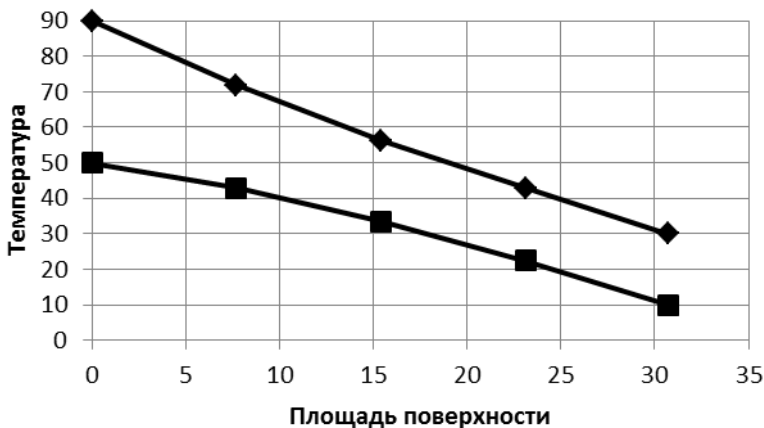
$$t_{11} = 72 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{12} = 56 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{13} = 43 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Для нагреваемого теплоносителя:

$$F_{21} = 23,1 \text{ м}^2; F_{12} = 15,4 \text{ м}^2; F_{13} = 7,7 \text{ м}^2.$$

$$t_{21} = 43 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{12} = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{13} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

По определённым площадям и соответствующей температуре строим график изменения температуры теплоносителей.



◆ - греющий; ■ – нагреваемый.

Рис. 5. График изменения температуры теплоносителей

15. Предварительно полагая, что рассчитываемый ТОА одноходовой, определяем количество теплообменных трубок по (41).

$$n = \frac{4G_1}{\pi \cdot d_{\text{в}}^2 \cdot \rho_1 \cdot w_1} = \frac{4 \cdot 3,47}{3,14 \cdot 0,016^2 \cdot 983,2 \cdot 2} = 8,78 = 9 \text{ шт.}$$

Здесь $\rho_1 = 983,2 \text{ кг/м}^3$ определяется по средней температуре греющего теплоносителя из табл. П-11.

16. Из (40) определяем длину трубок.

$$l = \frac{F}{\pi \cdot d_{\text{в}} \cdot n} = \frac{30,7}{3,14 \cdot 0,016 \cdot 9} = 67,9 \text{ м.}$$

17. Так как трубки в ТОА не рекомендуется применять более 7 м в длину, то принимаем длину трубок теплообмена – 6 м. Тогда число трубок в одном ходе будет равно

$$n_0 = \frac{4G_1}{\pi \cdot d_{\text{в}}^2 \cdot \rho_1 \cdot w_1} = \frac{4 \cdot 3,47}{3,14 \cdot 0,016^2 \cdot 983,2 \cdot 2} = 8,78 = 9 \text{ шт.}$$

общее количество трубок в аппарате

$$n = \frac{F}{\pi \cdot d_{\text{в}} \cdot l} = \frac{30,7}{3,14 \cdot 0,016 \cdot 6} = 101,8 = 102 \text{ шт.}$$

18. Определяем число ходов в ТОА по (42)

$$Z_{\text{тр}} = \frac{n}{n_0} = \frac{102}{9} = 11,33 = 12.$$

Принимаем число ходов – 12.

19. Воспользовавшись формулой (43) и табл. 18 определим диаметр кожуха ТОА.

Принимаем:

$$\text{шаг труб } s = 1,6d_{\text{в}} = 1,6 \cdot 0,018 = 0,029 \text{ м}; k = 0,006 \text{ м.}$$

Из табл. 18 определяем

$$\frac{D'}{s} = 12.$$

Откуда $D' = 12s = 12 \cdot 0,029 = 0,348 \text{ м.}$

Тогда по (43) получаем

$$D = D' + d_{\text{в}} + 2k = 0,348 + 0,018 + 2 \cdot 0,006 = 0,378 \text{ м.}$$

Округляя до ближайшего стандартного значения (смотри пояснения к формуле 67), окончательно получаем $D = 0,400$ м.

20. Определяем потери давления в трубном пространстве за счёт гидравлического сопротивления.

Коэффициент гидравлического сопротивления при изотермическом течении определяем по (56)

$$\lambda_{\tau 1} = 0,3164 Re_1^{-0,25}.$$

$$\lambda_{\tau 1} = 0,3164 \cdot 66946^{-0,25} = 0,0197.$$

Влияние неизотермичности потока в данном случае несущественно.

Потери давления вычисляем по формуле (см. 73)

$$\Delta P_{\text{тр}1} = \lambda_{\tau} \left(\frac{l}{d_{\text{в}}} \right) \left(\frac{\rho_1 w_1^2}{2} \right), \text{Па.}$$

$$\Delta P_{\text{тр}1} = 0,0197 \left(\frac{72}{0,016} \right) \left(\frac{983,2 \cdot 2^2}{2} \right) = 174322 \text{ Па.}$$

Здесь $\rho_1 = 983,2$ кг/м³ - определяем из табл. П-11 по средней температуре теплоносителя; $L = l \cdot Z_{\text{тр}} = 6 \cdot 12 = 72$ м - общая длина трубы.

21. Определяем потери давления на местных сопротивлениях.

Местные сопротивления находим, используя принципиальную схему течения теплоносителей в рассчитываемом ГОА (необходимо изобразить) и табл. 23:

$\xi_{\text{вх}} = 1,5 \cdot 2 = 3$ - входная и выходная камера (удар и поворот);

$\xi_{\text{вбк}} = 1,0 \cdot 24 = 24$ - вход в трубное пространство и выход из него;

$\xi_{180^\circ} = 2,5 \cdot 11 = 27,5$ - поворот на 180° из одной секции в другую через промежуточную камеру.
Суммарные местные сопротивления

$$\sum \xi_1 = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + \xi_{180^\circ} = 3 + 24 + 27,5 = 54,5.$$

Потери давления вычисляем по формуле

$$\Delta P_{\text{м1}} = \sum \xi_1 \cdot \left(\frac{\rho_1 w_1^2}{2} \right) = 54,5 \frac{983,2 \cdot 2^2}{2} = 107169 \text{ Па.}$$

22. Потери давления для трубного пространства определяются по формулам п 3.7 данного учебного пособия.

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\text{пт1}} + \Delta P_{\text{м1}} = 87161 + 107169 = 194330 \text{ Па.}$$

23. Определяем потери давления в межтрубном пространстве.

Поскольку сопротивление трения составляет ничтожную долю местных сопротивлений, то им пренебрегаем, полагая, что полное сопротивление пучков труб складывается только из местных сопротивлений:

$\xi_{\text{вх}90^\circ} = 1,5$ - вход в межтрубное пространство под углом 90° к рабочему потоку;

$\xi_{\text{вых}90^\circ} = 1,0$ - выход из межтрубного пространства под углом 90° ;

$\xi_{\text{пов}180^\circ} = 1,5 \cdot 15 = 22,5$ - поворот на 180° через перегородку в межтрубном пространстве.

Число рядов труб по ходу потока определяем как максимальное (см. табл. 18 и п. 17 примера расчёта)

$$m = \frac{D'}{s} = 12.$$

Тогда по табл. 18 имеем:

$$\xi_{\text{поп1}} = \frac{3m}{Re_2^{0.25}} = \frac{3 \cdot 12}{22360^{0.25}} = 2,94.$$

Так как поперечных ходов в данном ТОА – 16, то

$$\xi_{\text{поп}} = \xi_{\text{поп1}} \cdot 16 = 2,94 \cdot 16 = 47,04.$$

Суммарные местные сопротивления

$$\sum \xi_2 = \xi_{\text{вх.90}^\circ} + \xi_{\text{вых.90}^\circ} + \xi_{\text{пов.180}^\circ} + \xi_{\text{поп}}.$$
$$\sum \xi_2 = 1,5 + 1,0 + 22,5 + 47,04 = 72,04.$$

Определяем потери давления

$$\Delta P_2 = \Delta P_{\text{м2}} = \sum \xi_2 \cdot \left(\frac{\rho_2 w_2^2}{2} \right).$$
$$\Delta P_2 = 72,04 \frac{995,7 \cdot 1^2}{2} = 35865 \text{ Па.}$$

Здесь $\rho_2 = 995,7 \text{ кг/м}^3$ - определяем из табл. П-11 по средней температуре теплоносителя.

22. Определяем потребную мощность насоса для прокачки греющего теплоносителя по формуле (78)

$$N_1 = \frac{G_1 \Delta P_1}{\rho_1 \eta} = \frac{3,47 \cdot 194330}{983,2 \cdot 0,7} = 980 \text{ Вт.}$$

23. Определяем потребную мощность насоса для прокачки нагреваемого теплоносителя по формуле (78)

$$N_2 = \frac{G_2 \Delta P_2}{\rho_2 \eta} = \frac{5 \cdot 35865}{995,7 \cdot 0,7} = 257 \text{ Вт.}$$

На этом расчёт закончен.

Приложение 1

Зависимость газовой постоянной R от вида топлива и коэффициента
избытка окислителя

Таблица 2

Топливные пары		АК + керосин Т – 1	АК + тонка	АК – 27 + тонка	АК – 27 + НДМГ	АК – 40 + керосин Т –1
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	520	520	540	595	532
	0,3	472	480	505	570	480
	0,4	443	454	452	491	440
	0,5	405	412	410	448	408
	0,6	380	376	372	412	373
	0,7	352	352	350	385	348
	0,8	340	335	330	367	331
	0,9	325	327	320	353	320
	1	315	318	315	342	316
	1,1	311	316	-	335	313
	1,2	306	313	-	331	300
	1,4	-	-	-	-	-
1,6	-	-	-	-	-	

Продолжение табл. 2

Топливные пары		АК – 40 + тонка	N_2O_4 + ММГ	N_2O_4 + НДМГ	N_2O_4 + аэрозин – 50	Кислород + спирт 93,5 %	Кислород + керосин Т – 1
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	540	610	600	628	540	640
	0,3	494	560	550	560	520	570
	0,4	450	500	487	505	490	510
	0,5	400	450	440	460	440	430
	0,6	374	420	408	428	400	390
	0,7	350	395	380	400	380	360
	0,8	330	375	360	384	360	340
	0,9	320	360	348	370	348	329
	1	317	355	340	358	340	320
	1,1	314	340	330	-	332	312
	1,2	311	335	322	-	326	305
	1,4	-	325	316	-	313	292
	1,6	-	318	313	-	305	285
	1,8	-	310	300	-	296	280
	2	-	308	296	-	290	275
2,4	-	-	290	-	-	270	

Окончание табл. 2

Топливные пары		Кислород + углевод. горючее	Кислород + керосин	Кислород + НДМГ	Кислород + водород	Фтор + водород	H ₂ O ₂ + НДМГ
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	620	620	645	1600	950	620
	0,3	580	580	595	1200	825	550
	0,4	492	495	530	960	725	500
	0,5	420	420	475	850	650	470
	0,6	390	383	440	750	600	440
	0,7	360	360	412	650	550	420
	0,8	341	347	387	600	525	410
	0,9	332	333	374	560	502	400
	1	320	321	362	520	482	395
	1,1	312	312	350	500	475	390
	1,2	307	306	346	480	455	386
	1,4	295	295	330	450	445	381
	1,6	-	-	320	420	430	380
	1,8	-	-	310	400	425	378
	2	-	-	300	380	425	376
2,4	-	-	-	360	-	-	

Зависимость комплекса S от вида топлива, температуры и коэффициента
избытка $\alpha_{ок}$
АК + керосин Т – 1

Таблица 3

Температура Т, °К		500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,15	1,40	1,16	0,85	0,74	0,5	0,28	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,2	1,45	1,20	0,95	0,75	0,52	0,30	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,25	1,55	1,25	1,03	0,80	0,6	0,42	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,3	1,75	1,5	1,13	1,0	0,78	0,55	0,35	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,35	2,1	1,78	1,5	1,26	1,02	0,85	0,65	0,45	0,25	0,00	0,00
	0,4	2,5	2,24	1,98	1,65	1,45	1,2	0,99	0,75	0,51	0,27	0,15
	0,5	3,74	3,45	3,03	2,75	2,5	2,25	2,0	1,75	1,5	1,29	1,1
	0,6	4,5	4,24	3,90	3,56	3,3	3,05	2,78	2,5	2,3	2,1	1,85
	0,7	5,05	4,75	4,5	4,24	4,0	3,74	3,48	3,2	2,97	2,75	2,5
	0,8	5,51	5,25	5,0	4,75	4,48	4,25	4,0	3,75	3,5	3,26	3,05
	0,9	5,92	5,70	5,47	5,21	4,94	4,74	4,48	4,25	4,0	3,77	3,58
	0,95	6,2	5,90	5,71	5,45	5,2	4,94	4,72	4,48	4,25	4,02	3,82
	1	6,25	6,00	5,76	5,5	5,25	5,08	4,77	4,52	4,3	4,15	3,97
	1,05	6,05	5,85	5,6	5,28	5,05	4,82	4,6	4,33	4,18	4,0	3,78
	1,1	5,80	5,6	5,28	5,1	4,85	4,62	4,42	4,21	4,02	3,75	3,00
1,2	5,35	5,15	4,85	4,15	4,4	4,22	3,98	3,75	3,5	3,28	3,1	

АК + тонка

Таблица 4

Температура T, °K	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,15	1,62	1,36	1,08	0,86	0,62	0,41	0,25	0,01	0,00	0,00	0,00
	0,2	1,7	1,42	1,12	0,92	0,64	0,48	0,28	0,05	0,00	0,00	0,00
	0,25	1,8	1,5	1,22	0,98	0,74	0,5	0,3	0,12	0,00	0,00	0,00
	0,3	1,98	1,65	1,32	1,1	0,82	0,66	0,46	0,25	0,00	0,00	0,00
	0,35	2,25	2,0	1,56	1,45	1,15	0,95	0,75	0,5	0,25	0,12	0,00
	0,4	2,8	2,25	2,24	2,0	1,75	1,5	1,25	1,0	1,86	1,64	1,5
	0,5	3,78	3,5	3,24	3,0	2,75	2,48	2,21	1,92	1,75	1,5	1,3
	0,6	4,72	4,38	4,0	3,75	3,49	3,23	3,0	2,72	2,5	2,25	2,02
	0,7	5,5	4,95	4,65	4,4	4,1	3,78	3,6	3,33	3,17	2,9	2,72
	0,8	5,65	5,28	5,08	4,8	4,55	4,27	4,1	3,78	3,6	3,3	3,15
	0,9	6,0	5,74	5,5	5,25	5,0	4,75	4,5	4,25	4,0	3,75	3,55
	0,95	6,28	5,98	5,75	5,49	5,24	4,99	4,75	4,5	4,25	4,02	3,78
	1	6,42	6,15	5,88	5,6	5,4	5,15	4,9	4,71	4,49	4,25	4,0
	1,05	6,2	5,97	5,74	5,45	5,25	4,96	4,74	4,49	4,25	4,0	3,75
	1,1	5,92	5,72	5,45	5,2	4,99	4,7	4,45	4,25	3,98	3,72	3,4
1,2	5,49	5,25	5,0	4,75	4,52	4,25	3,98	4,73	3,45	3,3	2,79	

АК – 27 + тонка

Таблица 5

Температура Т, °К		500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,15	1,6	1,27	1,08	0,8	0,6	0,42	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,2	1,7	1,4	1,2	0,95	0,75	0,5	0,35	0,1	0,00	0,00	0,00
	0,25	1,8	1,5	1,24	1,0	0,75	0,52	0,4	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,3	2,0	1,73	1,47	1,2	0,98	0,74	0,51	0,3	0,1	0,00	0,00
	0,35	2,4	2,01	1,75	1,5	1,27	1,04	0,78	0,58	0,46	0,22	0,00
	0,4	2,9	2,52	2,25	2,02	1,8	1,55	1,33	1,16	1,0	0,72	0,5
	0,5	3,9	3,7	3,3	3,05	2,77	2,53	2,25	2,0	1,83	1,67	1,49
	0,6	3,75	4,48	4,2	3,85	3,6	3,32	3,12	2,8	2,64	2,4	2,24
	0,7	5,32	5,0	4,75	4,5	4,25	4,0	3,75	3,5	3,25	3,1	2,82
	0,8	5,8	5,53	5,27	5,0	4,75	4,5	4,25	4,0	3,8	3,6	3,4
	0,9	6,3	6,05	5,75	5,5	5,25	5,0	4,75	4,51	4,28	4,1	3,83
	0,95	6,5	6,25	6,0	5,74	5,5	5,25	5,0	4,75	4,5	4,25	4,05
	1	6,62	6,35	6,1	5,86	5,68	5,37	5,2	4,88	4,65	4,42	4,21
	1,05	6,5	6,27	6,05	5,77	5,55	5,3	5,11	4,85	4,6	4,4	4,2
	1,1	6,3	6,1	5,8	5,68	5,4	5,23	4,9	4,74	4,49	4,25	4,0
1,2	5,48	5,3	5,12	4,88	4,75	4,5	4,26	4,0	3,76	3,5	3,25	

АК – 27 + НДМГ

Таблица 6

Температура T, °К		500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,15	1,8	1,5	1,25	1,05	0,8	0,6	0,35	0,18	0,01	0,00	0,00
	0,2	2,0	1,7	1,45	1,2	0,95	0,75	0,5	0,3	0,1	0,00	0,00
	0,25	2,25	1,85	1,6	1,4	1,2	0,9	0,75	0,5	0,3	0,1	0,00
	0,3	2,5	2,24	1,95	1,7	1,4	1,2	0,95	0,75	0,5	0,3	0,15
	0,35	3,0	2,75	2,48	2,1	1,8	1,55	1,28	1,05	0,9	0,75	0,5
	0,4	3,75	3,4	3,05	2,75	2,25	2,23	1,98	1,75	1,5	1,25	1,08
	0,5	4,45	4,05	3,75	3,48	3,23	2,95	2,73	2,5	2,25	2,0	1,8
	0,6	5,0	4,7	4,32	4,05	3,78	3,59	3,28	3,15	2,8	2,65	2,4
	0,7	5,47	5,18	4,8	4,6	4,3	4,1	3,78	3,65	3,38	3,18	2,8
	0,8	5,78	5,55	5,23	5,08	4,75	4,58	4,27	4,12	3,8	3,68	3,35
	0,9	6,25	6,01	5,75	5,5	5,25	5,02	4,75	4,55	4,3	4,17	3,8
	0,95	6,5	6,12	6,0	5,75	5,49	5,24	5,0	4,75	4,5	4,28	4,12
	1	6,62	6,27	6,05	5,75	5,5	5,25	5,07	4,77	4,58	4,32	4,23
	1,05	6,35	6,02	5,75	5,5	5,25	5,0	4,78	4,6	4,35	4,15	4,0
1,1	6,11	5,77	5,51	5,28	5,05	4,78	4,67	4,35	4,23	3,95	3,75	
1,2	5,75	5,42	5,25	4,97	4,75	4,48	4,26	4,05	3,77	3,62	3,36	

АК – 40 + керосин

Таблица 7

Температура Т, °К		500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,15	1,25	0,98	0,76	0,52	0,38	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,2	1,5	1,25	1,0	0,75	0,52	0,37	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,25	1,78	1,55	1,27	1,06	0,85	0,62	0,46	0,25	0,02	0,00	0,00
	0,3	2,22	0,93	1,66	1,45	1,1	0,99	0,75	0,5	0,4	0,26	0,00
	0,35	2,6	2,4	2,05	1,78	1,52	1,35	1,1	0,92	0,75	0,55	0,4
	0,4	3,98	3,1	2,75	2,5	2,25	2,0	1,75	1,5	1,28	1,05	0,9
	0,5	4,5	3,8	3,5	3,25	3,0	2,71	2,45	2,23	1,99	1,75	1,5
	0,6	4,75	4,5	4,2	3,85	3,6	3,35	3,07	2,8	2,6	2,4	2,24
	0,7	5,35	5,1	4,76	4,5	4,25	4,0	3,75	3,51	3,3	3,1	2,8
	0,8	5,78	5,6	5,28	5,05	4,78	4,52	4,31	4,15	3,82	3,65	3,42
	0,9	6,35	6,12	5,77	5,55	5,3	4,8	4,78	4,65	4,4	4,2	3,99
	0,95	6,53	6,25	6,0	5,75	5,5	5,25	5,05	4,77	4,58	4,4	4,18
	1	6,62	6,27	6,02	5,77	5,52	5,28	5,1	4,81	4,62	4,43	4,2
	1,05	6,45	6,15	5,85	5,6	5,4	5,15	4,9	4,7	4,5	4,25	4,03
	1,1	6,0	5,8	5,6	5,3	5,12	4,8	4,72	4,45	4,28	4,05	3,8
1,2	5,65	5,45	5,25	5,0	4,75	4,53	4,3	4,12	3,9	3,75	3,5	

АК – 40 + тонка

Таблица 8

Температура Т, °К		500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	1,55	1,25	1,05	0,78	0,58	0,44	0,25	0,05	0,00	0,00	0,00
	0,25	1,73	1,45	1,2	0,9	0,74	0,52	0,37	0,12	0,00	0,00	0,00
	0,3	2,0	1,74	1,48	1,22	0,99	0,76	0,55	0,4	0,25	0,00	0,00
	0,4	2,99	2,7	2,4	2,1	1,85	1,6	1,4	1,2	1,0	0,75	0,6
	0,5	4,02	3,7	3,47	3,11	2,9	2,62	2,4	2,17	2,0	1,75	1,5
	0,6	5,0	4,62	4,3	4,01	3,75	3,5	3,24	3,0	2,76	2,55	2,37
	0,7	5,5	5,2	4,92	4,65	4,31	4,1	3,78	3,65	3,4	3,21	2,98
	0,8	6,0	5,75	5,5	5,26	5,1	4,8	4,58	4,27	4,1	3,75	3,58
	0,9	6,5	6,2	5,92	5,7	5,42	5,24	5,0	4,75	4,5	4,24	4,05
	0,95	6,65	6,27	6,05	5,78	5,55	5,3	5,1	4,85	4,6	4,4	4,25
	1	6,8	6,65	6,3	6,1	5,78	5,6	5,4	5,13	4,82	4,73	4,5
	1,05	6,4	6,22	6,0	5,75	5,5	5,28	5,15	4,9	4,7	4,48	4,27
	1,1	6,0	5,85	5,7	5,49	5,27	5,1	4,8	4,75	4,45	4,25	4,0
1,2	5,8	5,5	5,2	5,03	4,9	4,75	4,55	4,35	4,12	3,85	3,7	

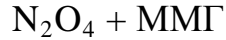


Таблица 9

Температура T, °K		600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Коэффициент избытка ОКИСЛИТЕЛЯ $\alpha_{\text{ок}}$	0,2	1,42	1,27	1,05	0,75	0,58	0,4	0,2	0,00	0,00	0,00
	0,3	2,99	2,7	2,48	2,25	2,0	1,75	1,55	1,45	1,2	0,8
	0,4	3,92	3,6	3,47	3,1	2,93	2,75	2,5	2,29	2,03	1,8
	0,5	4,4	4,2	3,98	3,7	3,47	3,22	2,95	2,75	2,5	2,28
	0,6	5,0	4,75	4,5	4,25	4,0	3,78	3,5	3,28	3,1	2,8
	0,7	5,5	5,3	5,08	4,88	4,62	4,41	4,25	3,9	3,73	3,48
	0,8	6,9	6,7	6,4	6,2	5,96	5,73	5,5	5,25	5,1	4,78
	0,9	6,5	6,25	6,0	5,75	5,52	5,28	5,05	4,8	4,65	4,42
	1,0	6,9	6,7	6,4	6,2	5,96	5,73	5,5	5,25	5,1	4,78
	1,1	6,5	6,25	6,0	5,75	5,52	5,28	5,05	4,8	4,65	4,42
	1,2	6,2	5,83	5,67	5,45	5,2	4,98	4,75	4,5	4,29	4,1
	1,4	5,5	5,25	5,05	4,8	4,6	4,35	4,2	3,9	3,71	3,5
	1,6	4,99	4,75	4,52	4,38	4,12	3,85	3,68	3,48	3,25	3,1
	1,8	4,5	4,3	4,1	3,8	3,6	3,48	3,24	3,05	2,85	2,72
2,0	4,2	3,93	3,75	3,5	3,28	3,07	2,88	2,72	2,5	2,35	

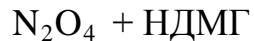


Таблица 10

Температура T, °K		500	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	2,74	2,47	1,8	1,25	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,3	2,78	2,52	2,05	1,6	1,25	0,8	0,42	0,00	0,00
	0,4	3,75	3,5	3,0	2,52	2,15	1,75	1,4	0,97	0,5
	0,6	5,5	5,0	4,5	4,0	3,6	3,2	2,5	2,25	2,0
	0,8	6,5	6,2	5,7	5,22	4,75	4,3	3,8	3,5	3,3
	1,0	7,45	4,2	6,7	6,53	5,75	5,25	4,77	4,4	4,0
	1,3	6,0	5,82	5,5	5,0	4,6	4,23	3,75	3,36	3,0
	1,6	5,15	4,85	4,6	4,2	3,75	3,35	3,0	2,65	2,25
	1,9	4,5	4,27	4,0	3,53	3,18	2,75	2,4	2,1	1,73
	2,2	4,0	3,78	3,47	3,1	2,62	2,3	2,0	1,62	1,25
	2,5	3,5	3,33	3,05	2,65	2,25	1,85	1,6	1,25	0,8
2,8	3,15	3,08	2,7	2,28	1,92	1,6	1,28	0,9	0,65	

N_2O_4 + аэрозин – 50

Таблица 11

Температура T , °К	800	1000	1200	1400	
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	1,8	1,25	0,78	0,00
	0,25	2,05	1,6	1,25	0,8
	0,3	3,0	2,52	2,15	1,75
	0,4	4,5	4,0	3,6	3,2
	0,5	5,7	5,22	4,75	4,3
	0,6	6,7	6,53	5,75	5,25
	0,7	5,5	5,0	4,6	4,23
	0,8	4,6	4,2	3,75	3,35
	0,9	4,0	3,53	3,18	2,75
	1,0	3,47	3,1	2,62	2,3

О₂ж + спирт 93,5 %

Таблица 12

Температура T, °К		500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	1,96	1,7	1,4	1,1	0,8	0,6	0,4	0,15	0,00	0,00	0,00
	0,4	3,5	3,0	2,7	2,4	2,1	1,78	1,5	1,25	1,0	0,75	0,51
	0,6	5,5	5,2	4,85	4,55	4,28	4,0	3,75	3,5	3,25	3,0	2,75
	0,8	7,2	6,8	6,55	6,27	6,0	5,75	5,48	5,2	4,9	4,7	4,5
	1,0	8,5	8,25	8,0	7,72	7,47	7,22	6,9	6,65	6,35	6,2	5,8
	1,2	7,7	7,4	7,1	6,85	6,6	6,35	6,1	5,8	5,6	5,35	5,15
	1,4	6,9	6,65	6,35	6,2	5,9	5,7	5,45	5,22	4,95	4,72	4,5
	1,6	6,3	6,05	5,78	5,56	5,3	5,15	4,85	4,7	4,4	4,2	3,95
	1,8	5,8	5,5	5,28	5,08	4,86	4,62	4,45	4,22	4,0	3,75	3,5
	2,0	5,35	5,1	4,85	4,6	4,36	4,22	3,95	3,8	3,6	3,4	3,2

О₂ж +керосин Т – 1

Таблица 13

57

Температура Т, °К		500	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	2,74	2,35	1,65	1,06	0,5	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,3	2,75	2,5	1,97	1,5	1,12	0,6	0,00	0,00	0,00
	0,4	3,6	3,4	2,9	2,42	2,0	1,55	0,8	0,5	0,25
	0,6	6,15	5,85	5,4	4,9	4,48	4,15	3,65	3,2	2,75
	0,8	8,2	7,9	7,42	6,92	6,45	5,95	5,5	5,1	4,6
	1,0	10,1	9,75	9,24	8,74	8,23	7,74	7,25	6,75	6,25
	1,2	8,75	8,5	8,0	7,5	7,0	6,6	6,15	5,7	5,25
	1,4	7,8	7,6	7,1	6,65	6,15	5,7	5,25	4,75	4,35
	1,6	7,0	6,78	6,28	5,85	5,4	5,0	4,5	4,1	3,75
	1,8	6,4	6,15	5,7	5,2	4,75	4,3	3,9	3,5	3,2
	2,0	5,85	5,65	5,15	4,7	4,28	3,85	3,42	3,1	2,75
	2,2	5,45	5,2	4,65	4,25	3,85	3,4	3,1	2,65	2,35
	2,4	5,0	4,75	4,3	3,9	3,5	3,15	2,65	2,35	2,0
	2,6	4,7	4,4	3,97	3,58	3,22	2,78	2,4	2,08	1,75
2,8	4,4	4,15	3,65	3,25	2,85	2,5	2,15	1,8	1,5	

O_2 ж + углеводородное горючее ($C_{10}H_{12}$)

Таблица 14

Температура $T, ^\circ K$	600	800	1000	1200	1400	1600	
$\alpha_{ок}$	0,4	4,0	3,5	3,0	2,55	2,2	1,75
	0,6	6,8	6,2	5,6	5,1	4,7	4,25
	0,8	8,9	8,25	7,65	7,1	6,7	6,2
	1,0	10,4	9,8	9,25	8,75	8,25	7,75
	1,2	9,0	8,5	8,0	7,5	7,05	6,6
	1,4	7,9	7,45	7,0	6,5	6,1	5,65
	1,5	7,6	7,1	6,65	6,25	5,78	5,3

О₂ж + керосин

Таблица 15

Температура T, °К	600	800	1000	1200	1400	1600	
$\alpha_{ок}$	0,4	4,0	3,5	3,0	2,60	2,2	1,77
	0,6	6,8	6,2	5,65	5,05	4,7	4,25
	0,8	8,9	8,3	7,75	7,22	6,72	6,2
	1,0	10,4	9,7	9,27	8,75	8,25	7,75
	1,2	9,05	8,5	8,0	7,5	7,15	6,6
	1,4	7,95	7,5	7,0	6,55	6,2	5,70
	1,5	7,6	7,15	6,7	6,25	5,78	5,3

О₂ж + НДМГ

Таблица 16

Температура T, °К		500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,15	1,8	1,5	1,3	1,0	0,8	0,65	0,4	0,2	0,00	0,00	0,00
	0,2	2,25	2,0	1,65	1,47	1,22	0,98	0,75	0,5	0,00	0,00	0,00
	0,3	3,0	2,72	2,49	2,24	1,99	1,75	1,5	1,25	1,05	0,85	0,7
	0,4	4,5	4,2	3,8	3,5	3,25	2,95	2,72	2,5	2,25	2,0	1,8
	0,6	6,7	6,3	6,0	5,72	5,4	5,15	4,8	4,55	4,3	4,10	3,8
	0,8	8,15	7,8	7,5	7,25	7,0	6,7	6,4	6,2	5,9	5,6	5,4
	1,0	9,5	9,2	8,9	8,65	8,36	8,15	7,8	7,6	7,3	7,1	6,8
	1,2	8,45	8,2	7,9	7,72	7,4	7,15	6,9	6,65	6,4	6,2	5,9
	1,4	7,25	7,0	6,75	6,5	6,25	6,0	5,78	5,55	5,35	5,1	4,8
	1,6	6,85	6,7	6,4	6,2	5,95	5,75	5,5	5,25	5,0	4,75	4,55
	1,8	6,35	6,05	5,85	5,7	5,4	5,2	4,95	4,75	4,5	4,25	4,08
	2,0	5,85	5,65	5,4	5,25	4,95	4,75	4,5	4,3	4,15	3,5	3,75

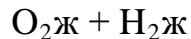


Таблица 17

Температура T, °K		600	700	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{\text{ок}}$	0,2	3,5	3,1	2,75	1,75	1,05	0,4	0,00	0,00	0,00
	0,3	5,0	4,6	4,25	3,5	2,8	2,16	1,5	0,98	0,4
	0,4	6,2	5,75	5,45	4,75	4,05	3,48	2,75	2,2	1,5
	0,5	7,0	6,75	6,4	5,75	5,0	4,46	3,77	3,25	2,7
	0,6	7,9	7,5	7,23	6,55	5,8	5,25	4,75	4,2	3,65
	0,8	9,28	8,99	8,65	8,0	7,3	6,75	6,2	5,55	5,0
	1,0	10,5	10,2	9,75	9,15	8,5	7,95	7,3	6,75	6,22
	1,3	9,1	8,27	8,0	7,5	7,0	6,4	5,85	5,35	4,8
	1,6	7,28	7,0	6,75	6,25	5,75	5,25	4,75	4,25	3,78
	1,9	6,35	6,2	5,85	5,35	4,85	4,4	4,0	3,5	3,0
	2,2	5,7	5,4	5,2	4,7	4,2	3,73	3,25	2,8	2,4
	2,5	5,0	4,75	4,5	4,05	3,6	3,15	2,7	2,25	1,85
	2,8	4,55	4,25	4,1	3,6	3,15	2,7	2,3	1,9	1,5
3,0	4,3	4,1	3,8	3,4	2,97	2,56	2,2	1,8	1,4	

Фтор + водород

Таблица 18

Температура T, °K		600	700	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,3	7,35	6,8	6,47	6,18	5,91	5,53	5,27	5,1	4,8
	0,4	8,0	7,55	7,25	7,0	6,75	6,5	6,25	6,0	5,75
	0,6	9,2	8,75	8,5	8,25	8,0	7,78	7,5	7,35	7,15
	0,8	10,0	9,5	9,25	9,0	8,8	8,6	8,35	8,15	7,95
	1,0	10,5	10,0	9,75	9,6	9,35	9,2	8,9	8,75	8,55
	1,1	9,7	9,25	9,0	8,8	8,65	8,4	8,15	7,9	7,75
	1,2	9,0	8,55	8,4	8,2	7,95	7,72	7,5	7,35	7,15
	1,4	8,0	7,6	7,4	7,25	7,0	6,78	6,6	6,5	6,3
	1,6	7,0	6,7	6,45	6,25	6,05	5,9	5,75	5,55	5,4
	1,8	6,0	5,6	5,4	5,25	5,0	4,85	4,72	4,6	4,45

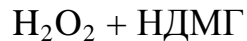


Таблица 19

Температура T, °K		600	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	1,68	1,2	0,95	0,7	0,4	0,04	0,00	0,00	0,00
	0,3	2,8	2,35	2,0	1,75	1,48	1,2	0,00	0,00	0,00
	0,4	3,85	3,25	2,99	2,71	2,35	2,1	1,9	1,73	1,48
	0,6	4,8	4,35	4,1	3,8	3,55	3,25	3,0	2,78	2,6
	0,8	5,55	5,0	4,75	4,5	4,22	3,9	3,72	3,5	3,25
	1,0	6,1	5,5	5,25	4,95	4,75	4,5	4,25	4,0	3,75
	1,2	5,6	5,0	4,75	4,5	4,25	4,0	3,75	3,5	3,27
	1,4	5,1	4,5	4,25	4,05	3,75	3,5	3,25	3,0	2,8
	1,6	4,72	4,15	3,85	3,7	3,4	3,15	2,85	2,7	2,45
	1,8	4,4	3,85	3,65	3,35	3,15	2,8	2,65	2,4	2,25
	2,0	4,2	3,7	3,4	3,2	2,9	2,7	2,45	2,25	2,05

Температура ядра в зависимости от вида топлива и коэффициента избытка окислителя

Таблица 20

Топливные пары		АК + керосин Т – 1	АК + тонка	АК – 27 + тонка	АК – 27 + НДМГ	АК – 40 + керосин Т –1
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	1100	1210	600	1340	1200
	0,3	1300	1300	1000	1600	1300
	0,4	1600	1700	1800	2070	1800
	0,5	2140	2200	2300	2450	2300
	0,6	2580	2610	2680	2740	2700
	0,7	2900	2900	2940	2950	3000
	0,8	3000	3060	3080	3080	3150
	0,9	3050	3100	3110	3100	3180
	1	3020	3030	3090	3080	3150
	1,1	2950	3000	-	3050	3100
	1,2	2900	2950	-	3000	3050
	1,4	-	-	-	-	-
	1,6	-	-	-	-	-

Продолжение табл. 20

Топливные пары		АК – 40 + тонка	N_2O_4 + ММГ	N_2O_4 + НДМГ	N_2O_4 + аэрозин – 50	Кислород + спирт 93,5 %	Кислород + керосин Т – 1
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	1250	1400	1500	1300	800	800
	0,3	1350	1950	1800	1900	1300	1400
	0,4	1800	2400	2300	2330	1800	2200
	0,5	2400	2720	2700	2670	2400	2920
	0,6	2800	3000	3010	2930	2850	3680
	0,7	3040	3200	3220	3140	3180	3750
	0,8	3150	3300	3350	3230	3300	3760
	0,9	3200	3310	3380	3280	3340	3760
	1	3150	3300	3350	3300	3380	3750
	1,1	3100	3280	3300	-	3340	3720
	1,2	3080	3220	3250	-	3310	3680
	1,4	-	3100	3120	-	3150	3580
	1,6	-	3000	3000	-	3080	3490
	1,8	-	2900	2900	-	3030	3395
	2	-	2780	2800	-	3000	3300
2,4	-	-	2550	-	-	3100	

Топливные пары		Кислород + углевод. горючее	Кислород + керосин	Кислород + НДМГ	Кислород + водород	Фтор + водород	H ₂ O ₂ + НДМГ
Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$	0,2	1500	1500	1700	1500	3100	1300
	0,3	1700	1700	1850	2140	3400	1800
	0,4	2700	2700	2500	2600	3780	2200
	0,5	3260	3280	3000	2910	4100	2500
	0,6	3580	3600	3340	3200	4350	2680
	0,7	3720	3720	3480	3350	4500	2800
	0,8	3750	3750	3550	3460	4630	2900
	0,9	3745	3740	3570	3470	4720	2920
	1	3720	3720	3560	3475	4750	2900
	1,1	3700	3700	3550	3470	4755	2880
	1,2	3660	3660	3500	3460	4750	2800
	1,4	3580	3580	3400	3400	4600	2700
	1,6	-	-	3310	3300	4200	2600
	1,8	-	-	3220	3200	4000	2500
	2	-	-	3180	3120	3500	2400
2,4	-	-	-	3000	-	-	

Зависимость теплоёмкости охладителя C_p от температуры T_{ox}

Таблица 21

Компонент		АК	АК – 27	Керосин $T - 1$	Тонка	НДМГ	N_2O_4
Температура охладителя T_{ox}	233	1775	1700	1900	2150	2700	1620
	253	1765	1900	1950	2180	2750	1780
	273	1755	2100	2000	2230	2795	1930
	293	1745	2300	2050	2290	2810	2100
	313	1735	-	2100	2340	2850	2395
	333	-	-	2200	2400	2920	2730
	353	-	-	2280	2490	3000	3200
	373	-	-	2360	2580	3080	-
	393	-	-	2440	2700	3160	-
	413	-	-	2550	2830	3290	-
	433	-	-	2660	2960	3470	-
	453	-	-	2800	-	3730	-
473	-	-	2900	-	4220	-	

Продолжение табл. 11

Компонент	Аэрозин	Вода	АК - 40	ММГ	Спирт 93,5 %	C ₁₀ H ₁₆	Керосин	
Температура охладителя T _{ох}	233	2870	4210	1640	2190	2300	1820	2260
	253	2902	4200	1860	2206	2400	1890	2380
	273	2940	4180	2100	2215	2600	1955	2490
	293	2970	4180	2300	2222	2800	2130	2600
	313	-	4200	-	2234	3020	2210	2630
	333	-	4210	-	-	3300	-	2690
	353	-	4240	-	-	3600	-	2750
	373	-	4280	-	-	3940	-	2825
	393	-	4350	-	-	-	-	2920
	413	-	4410	-	-	-	-	3020
	433	-	4500	-	-	-	-	-
	453	-	-	-	-	-	-	-
	473	-	-	-	-	-	-	-

Окончание табл. 21

Кислород		Фтор		H ₂ O ₂		H ₂ Ж	
Тох	Ср	Тох	Тох	Ср	Ср	Тох	Ср
70	1694	53	273	2615	1509	15	6800
80	1687	63	373	2730	1509	20	9170
90	1681	73	-	-	1505	25	12580
100	1709	83	-	-	1495	30	23260
110	1780	93	-	-	1500	50	12180
120	1311	103	-	-	1516	100	13700
150	1039	113	-	-	1532	200	16140
200	957	400	-	-	869	500	14530
300	934	600	-	-	928	1000	14980
400	949	1000	-	-	979	2000	17330
600	1006	-	-	-	-	-	-
1000	1091	-	-	-	-	-	-

Зависимость вязкости охладителя от температуры

Таблица 22

Компонент		АК	АК – 27	Керосин Т – 1	Тонка	НДМГ	N ₂ O ₄
Температура охладителя T _{ох}	233	11	120	120	200	23	5,3
	253	8	55	36	32	12	4,2
	273	6	30	21	17	7,5	3,3
	293	-	20	15	10	5,6	2,6
	313	-	-	10	7,5	4	2
	333	-	-	8,7	5	3,3	1,5
	353	-	-	7,5	5	2,5	1
	373	-	-	6,2	5	2	0,6
	393	-	-	5	-	1,8	-
	413	-	-	5	-	1,5	-
	433	-	-	5	-	1	-
	453	-	-	-	-	-	-
473	-	-	-	-	-	-	

Продолжение табл. 22

Компонент	Аэрозин	Вода	АК - 40	ММГ	Спирт 93,5 %	C ₁₀ H ₁₆	H ₂ O ₂	Керосин	
Температура охладителя T _{ох}	233	18	18	95	72	28	140	18,2	215
	253	8,8	10	45	25	18	60	12,8	85
	273	6,5	6,8	23	13	12	30	9,3	40
	293	5	4,8	15	9	8,3	20	7,2	24
	313		3,6	10	8	6	14	5,8	16
	333		2,9			4,4	10	4,9	12
	353		2,4			3,2	8	4,4	10
	373		2			2,6	7,5	3,9	9
	393		1,8			2			8
	413		1,6			1,6			7
	433		1,5			1,1			6
	453					1			5
	473								4,5

Окончание табл. 12

Водород		Кислород		Фтор	
T _{ox}	μ	T _{ox}	μ	T _{ox}	μ
15	0,235	93	2,4	68	4,4
18	0,17	123	1,1	83	2,6
21	0,132	153	0,4	88	2,58
30	0,064	173	0,3	-	-
60	0,0291	-	-	-	-
80	0,036	-	-	-	-
100	0,0421	-	-	-	-
150	0,0557	-	-	-	-
200	0,0678	-	-	-	-
250	0,079	-	-	-	-
300	0,0894	-	-	-	-
400	0,109	-	-	-	-
500	0,127	-	-	-	-
600	0,145	-	-	-	-
800	0,177	-	-	-	-
1000	0,207	-	-	-	-
1500	0,276	-	-	-	-
2000	0,336	-	-	-	-

Зависимость плотности и коэффициента теплопроводности от температуры

Таблица 23

Жидкость	Температура, Т (К)	Плотность, ρ (кг/м ³)	Коэф. Теплопровод ности, λ (Вт/(м*К))
Керосин	273	825	0,156
	323	788	0,144
	373	750	0,133
	423	712	0,121
	473	676	0,109
Спирт	273	840	0,186
	323	750	0,193
	373	660	0,200
	423	570	0,207
	473	480	0,214
Азотная кислота	273	1500	0,334
	323	1420	0,324
	373	1340	0,312

Окончание табл. 23

Жидкость	Температура, Т (К)	Плотность, ρ (кг/м ³)	Коэф. Теплопровод ности, λ (Вт/(м*К))
	423	1260	0,295
Вода	273	1000	0,558
	323	990	0,644
	373	960	0,682
	423	915	0,678
	473	870	0,663
	83	1175	0,160
Жидкий кислород	103	1079	0,1341
	123	964	0,1082
	143	783	0,0826
	273		
НДМГ	283	783	0,2012
	293		
	303		
	313		

Теплофизические свойства металлов

Таблица 24

Материал	T, (K)	C_p , КДж/(кг*К)	λ , Вт/(м*К)
Алюминий	273	0,879	201,2
	373	0,942	204,7
	473	0,990	229,2
	573	1,038	230,3
	673	1,059	318,7
	773	1,101	374,5
Медь	293	0,381	395
	373	0,399	392
	473	0,410	382
	573	0,422	373
	673	0,433	363
	773	0,445	354
	873	0,456	344
	973	0,465	336
	1073	0,473	329
	1173	0,482	321

Продолжение табл. 24

Материал	T, (К)	C_p , КДж/(кг*К)	λ , Вт/(м*К)
Титан	293	0,528	15,1
	373	0,544	15,7
	473	0,565	16,3
	573	0,586	16,9
	673	0,601	17,45
	773	0,616	18,0
	873	0,616	18,6
	973	0,616	19,2
	1073	0,620	19,9
	1173	0,624	20,6
Никель	273	0,457	67,5
	373	0,470	62,8
	473	0,486	58,2
	673	0,516	52,3
	873	0,540	57,3
	1073	0,558	65,1

Продолжение табл. 24

Материал	T, (К)	C_p , КДж/(кг*К)	λ , Вт/(м*К)
Сталь 1Х18Н9Т	373	0,502	16,0
	473	-	17,6
	573	-	19,2
	673	-	20,8
	773	-	22,3
	873	-	23,8
	973	-	25,5
	1073	-	27,6
Латунь Л62	698	0,387	133,7
Бронза	848	0,396	104,67
Молибден	273	0,247	134,0
	373	0,272	138,16
	473	0,283	133,79
	573	0,294	129,41
	673	0,305	125,04
	773	0,327	120,67

Продолжение табл. 24

Материал	T, (K)	C_p , КДж/(кг*К)	λ , Вт/(м*К)
Молибден	873	0,3397	116,29
	973	0,3391	111,92
	1073	0,3386	107,55
	1173	0,338	103,18
	1273	0,3374	98,81
	1373	0,3368	98,14
	1473	0,3362	97,47
	1573	0,3356	96,8
	1673	0,335	96,13
	1773	-	95,46
	1873	-	94,79
	1973	-	94,12
	2073	-	93,45
	2173	-	92,78
	2273	-	92,11
	-	-	-

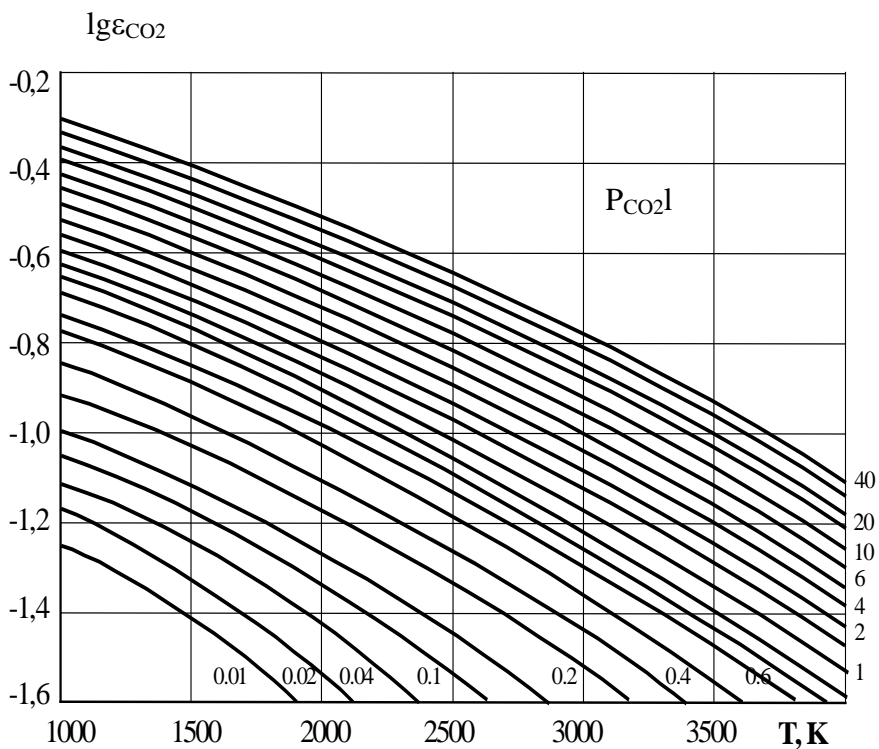
Продолжение табл. 24

Материал	T, (К)	C_p , КДж/(кг*К)	λ , Вт/(м*К)
Вольфрам	273	0,134	129,46
	373	0,136	127,85
	473	0,138	126,23
	573	0,1401	124,62
	673	0,142	123,0
	773	0,144	121,39
	873	0,1456	119,77
	973	0,1479	118,15
	1073	0,1499	118,15
	1173	0,1518	116,54
	1273	0,1557	113,56
	1373	0,1569	112,20
	1473	0,1582	110,75
	1573	0,1595	109,31
	1673	0,1612	108,27
1773	0,163	107,23	

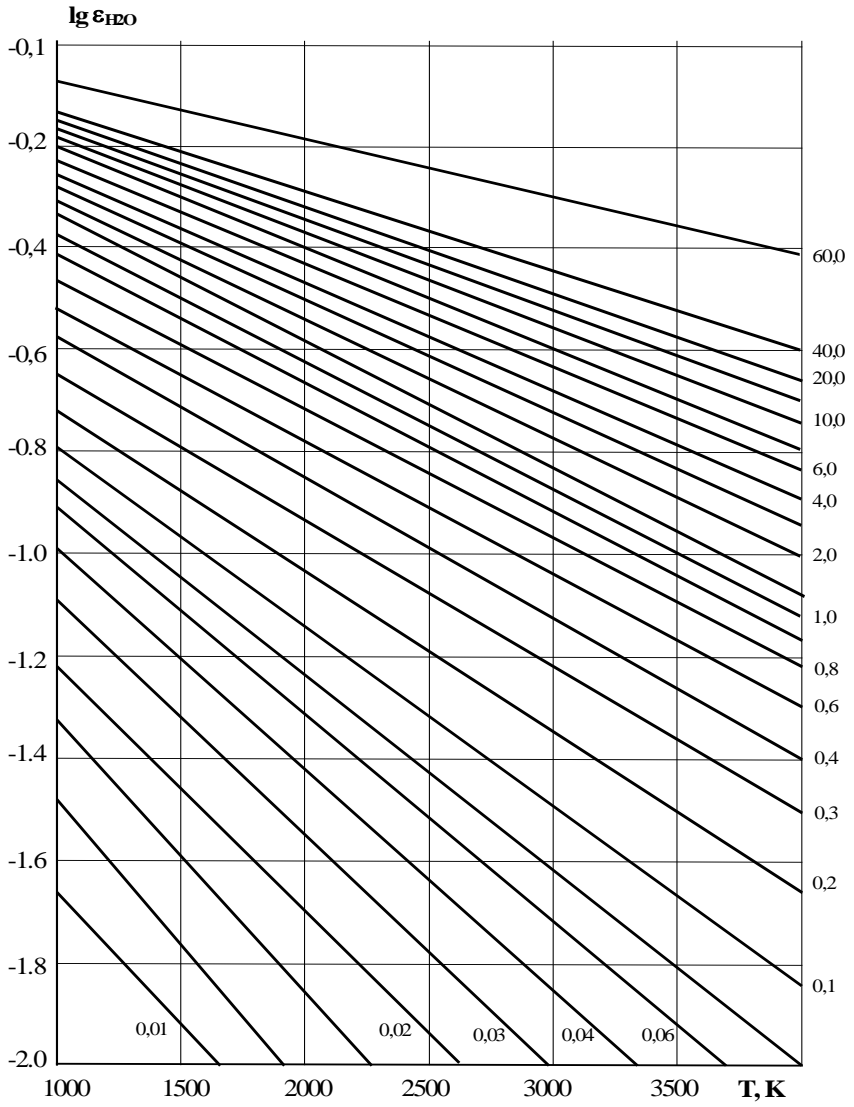
Окончание табл. 24

Материал	T, (К)	C_p , КДж/(кг*К)	λ , Вт/(м*К)
Вольфрам	1873	0,1648	106,19
	1973	-	103,48
	2073	-	110,85
	2173	-	118,23
	2273	-	125,60

Степень черноты двуокиси углерода



Степень черноты водяного пара



Условные обозначения, не указанные в Приложении 1

R – удельная газовая постоянная $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$;

$S \times 10^3$ – комплекс $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{ с}} \frac{\text{м} \cdot \text{с}^{1,7}}{\text{кг}^{0,85} \text{ град}^{-0,105}} \right]$;

$\alpha_{\text{ок}}$ – коэффициент избытка окислителя $[-]$;

T – температура по абсолютной шкале $[^{\circ}\text{К}]$;

C_p – изобарная теплоёмкость $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$;

$\mu \times 10^{-4}$ – динамический коэффициент вязкости $\left[\frac{\text{Па}}{\text{с}} \right]$;

λ – коэффициент теплопроводности $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right]$;

ρ – плотность $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$.

Приложение 2

Данное приложение представлено в качестве программы и находится на магнитном диске в файле Termo.zip (файл программа_Теплопередача.mcd).

Приложение 3

Таблица П-1

Средние значения коэффициента теплопередачи и
термического сопротивления слоя отложений

Трубное пространство	Межтрубное пространство	Термическое сопротивление слоя отложений, (м ² К)/Вт	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² К)
1	2	3	4
Жидкость - жидкость			
Химочищенная вода	Вода	0,00023	1750 - 2900
Соляровое масло	Вода	0,0016	87 - 140
Соляровое масло	Масло	0,0019	58 - 87
Газолин	Вода	0,0007	350 - 580
Тяжелые масла	Вода	0,0012	87 - 300
Керосин	Вода	0,0012	150 - 300
Керосин	Масло	0,0012	120 - 200
Охлаждающая вода	Вода	0,0005	1400 - 1750
Машинное масло (низкой вязкости)	Вода	0,0005	150 - 300
Машинное масло (высокой вязкости)	Вода	0,0007	250 - 470
Машинное масло	Масло	0,0014	60 - 120
Лигроин	Вода	0,0012	300 - 400
Лигроин	Масло	0,0012	150 - 200
Органические растворители	Вода	0,0007	300 - 900
Органические растворители	Хладоноситель	0,0007	200 - 500
Органические растворители	Органические растворители	0,0005	120 - 350
Вода	Вода	0,0007	1200 - 1500
Вода	Масло	0,0012	80 - 140
Высокикопящие нефтепродукты, растительные масла	Вода	0,0009	120 - 300

Продолжение табл. П-1

1	2	3	4
Конденсирующийся пар - жидкость			
Пары спирта	Вода	0,0005	600 – 1200
Высокикопящие углеводороды	Вода	0,0007	220 - 300
Низкокипящие углеводороды	Вода	0,0007	470 – 1200
Пары углеводородов	Масло	0,0009	150 – 250
Органические растворители	Вода	0,0007	600 – 1200
Керосин	Вода	0,0009	180 – 400
Керовин	Масло	0,012	120 – 180
Лигроин	Вода	0,012	300 – 450
Водяной пар	Вода	0,00012	2500 – 5900
Водяной пар	Соляровое масло	0,0013	90 – 150
Высокикопящие нефтепродукты, растительные масла	Вода	0,0009	120 – 420
Газ – жидкость			
Воздух, азот и др. (под давлением)	Вода или хладоноситель	0,0012	250 – 460
Воздух, азот и др. (вакуум)	Вода или хладоноситель	0,0012	60 – 300
Вода или хладоноситель	Воздух, азот и др. (под давлением)	0,0012	120 – 250
Вода или хладоноситель	Воздух, азот и др. (вакуум)	0,0012	30 – 120
Вода	Водород	0,0007	500 – 750
Испарители			
Безводный аммиак	Конденсирующийся водяной пар	0,00035	900 – 1750
Хлор	Конденсирующийся водяной пар	0,00035	900 – 1750
Пропан, бутан и т.д.	Конденсирующийся водяной пар	0,00035	1200 – 1750
Вода	Конденсирующийся водяной пар	0,00035	1450 – 2300

Таблица П-2

Коэффициенты теплопроводности сталей λ , Вт/(м·К),
в зависимости от температуры

Наименование и марка стали	Температура, °С								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Углеродистая 15	54,4	50,2	46,0	41,9	37,7	33,5	—	—	—
Углеродистая 30	50,2	46,0	41,9	37,7	33,5	29,3	—	—	—
Хромомолибденовая X10C2M (ЭИ107)	18,4	—	21,7	—	—	24,6	25,5	—	—
Хромоникель- вольфрамовая 4X14NB2M (ЭИ69)	15,5	16,9	19,2	20,2	21,2	22,0	—	—	—
Хромоникелевая 1X18Н9Т (ЭЯ1Т)	16,0	17,6	19,2	20,8	22,3	23,8	25,5	27,6	—
Хромоникелевая X25H20C2 (ЭИ283)	14,6	—	—	—	21,6	23,5	25,1	27,1	28,8
Хромистая нержавеющая:									
1X13 (Ж ₁)	24,0	23,6	23,3	23,3	23,7	24,4	—	—	—
2X13 (Ж ₂)	24,3	25,8	26,3	26,4	26,6	26,4	26,2	26,7	27,6
3X13 (Ж ₃)	25,1	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	24,6	—	—
4X13 (Ж ₄)	28,0	29,1	29,3	29,2	28,8	28,4	28,0	—	—
X17 (Ж ₁₇)	24,4	—	—	—	—	—	—	—	—
X28 (Ж ₂₇)	20,9	21,7	22,7	23,4	24,3	25,0	—	—	—
* Значения λ для различных образцов стали 1X18Н9Т изменяются в пределах $\pm 20\%$. Здесь приведены средние значения λ .									

Таблица П-3

Коэффициент теплопроводности сталей λ , Вт/(м·К), металлов
и сплавов в зависимости от температуры

Наименование металла или сплава	Температура, °С							
	0	20	100	200	300	400	500	600
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Алюминий	202	—	206	229	272	319	371	422
Алюминиевые сплавы:								
92% Al, 8% Mg	102	106	123	148	—	—	—	—
80% Al, 20% Si	158	160	169	174	—	—	—	—
Дюралюминий: 94-96% Al, 3-5% Cu, 0,5% Mg	159	165	181	194	—	—	—	—
Латунь:								
90% Cu, 10% Zn	102	—	117	134	149	166	180	195
70% Cu, 30% Zn	106	—	109	110	114	116	120	121
67% Cu, 33% Zn	100	—	107	113	121	128	135	151
60% Cu, 40% Zn	106	—	120	137	152	169	186	200
Медь (99,9%)	393	—	385	378	371	365	359	354
Монель-металл: 29% Cu, 67% Ni, 2% Fe	—	22,1	24,4	27,6	30	34	—	—
Нейзильбер: 62% Cu, 15% Ni, 22% Zn	—	25,0	31	40	45	49	—	—
Нихром:								
90% Ni, 10% Cr,	17,1	17,4	19,0	20,9	22,8	24,6	—	—
80% Ni, 20% Cr	12,2	13,6	13,8	15,6	17,2	19,0	—	22,6

Продолжение табл. П-3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нихром железистый: 61% Ni, 15% Cr, 20% Fe, 4% Mn 61% Ni, 16% Cr, 23% Fe	—	11,6	11,9	12,2	12,4	12,7	—	13,1
	11,9	12,1	13,2	14,6	16,0	17,4	—	—
Сталь мягкая	63	—	57	52	46	42	36	31

Таблица П-4

Коэффициенты теплопроводности сплавов

Сплав	t, °C	λ , Вт/(м·К)
1	2	3
Алюминиевая бронза: 95% Cu, 5% Al	20	82
Бронза: 90% Cu, 10% Sn 75% Cu, 25% Sn 88% Cu, 10% Sn, 2% Zn	20	42
	20	26
	20	48
Бронза фосфористая: 92,8% Cu, 5% Sn, 0,15% P, 2% Zn 91,7% Cu, 8% Sn, 0,3% P 87,2% Cu, 12,4% Sn, 0,4% P	20	79
	20	45
	20	36
Инвар: 35% Ni, 65% Fe	20	11,0
Константан: 60% Cu, 40% Ni 60% Cu, 40% Ni	20	22,7
	100	25,6
Манганин: 84% Cu, 4% Ni, 12% Mn 84% Cu, 4% Ni, 12% Mn	20	21,3
	100	26,4

Продолжение табл. П-4

1	2	3
Магниевые сплавы: 92% Mg, 8% Al 88% Mg, 10% Al, 2% Si 92% Mg, 8% Cu	20-200 20-200 20-200	62-79 58-76 126-132
Медные сплавы: 70% Cu, 30% Mg 90% Cu, 10% Ni 80% Cu, 20% Ni 40% Cu, 60% Ni	20 20-100 20-100 20-100	13 58-76 34-41 22-26
Металл Розе: 50% Bi, 25% Pb, 25% Sn	20	16
Металл Вуда: 48% Bi, 26% Pb, 13% Sn, 13% Cd	20	13
Никелевые сплавы: 70% Ni, 28% Cu, 2% Fe 62% Ni, 12% Cu, 26% Fe	20 20	35 13,5
Никелевое серебро	0	29,3
То же	100	37
Платиноиридий: 90% Pt, 10% Ir	0-100	30,9-31
Электрон: 93% Mg, 4% Zn, 0,5% Cu	20	116
Платинородий: 90% Pt, 10% Rh	0-100	30-30,6

Таблица П-5

Физические свойства сухого воздуха
($B=760$ мм рт. ст. $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Па)

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723

Продолжение табл. П-5

1	2	3	4	5	6	7	8
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,5	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,036	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Таблица П-6

Температура кипения воды в зависимости от давления

$p \cdot 10^{-5}$, Па	t_s , °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	t_s , °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	t_s , °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	t_s , °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	t_s , °C
1	99,64	28	230,04	80	294,98	134	333,18	188	360,56
2	120,23	29	231,96	82	296,71	136	334,34	190	361,44
3	133,54	30	233,83	84	298,40	138	335,49	192	362,31
4	143,62	32	237,44	86	300,07	140	336,63	194	363,17
5	151,84	34	240,88	88	301,71	142	337,75	196	364,02
6	158,84	36	244,16	90	303,32	144	338,86	198	364,87
7	164,96	38	247,31	92	304,90	146	339,96	200	365,71
8	170,42	40	250,33	94	306,45	148	341,04	202	366,54
9	175,35	42	253,24	96	307,98	150	342,11	204	367,37
10	179,88	44	256,05	98	309,49	152	343,18	206	368,18
11	184,05	46	258,75	100	310,96	154	344,23	208	368,99
12	187,95	48	261,37	102	312,42	156	345,27	210	369,79
13	191,60	50	263,91	104	313,86	158	346,30	212	370,58
14	195,04	52	266,38	106	315,28	160	347,32	214	371,4
15	198,28	54	268,77	108	316,67	162	348,33	216	372,2
16	201,36	56	271,10	110	318,04	164	349,32	218	372,9
17	204,30	58	273,36	112	319,39	166	350,31	220	373,7
18	207,10	60	275,56	114	320,73	168	351,29	Критическое состояние	
19	209,78	62	277,71	116	322,05	170	352,26		
20	212,37	64	279,80	118	323,35	172	353,21		
21	214,84	66	281,85	120	324,63	174	354,17	221,29	374,15
22	217,24	68	283,85	122	325,90	176	355,11		
23	219,55	70	285,80	124	327,15	178	356,04		
24	221,77	72	287,71	126	328,39	180	356,96		
25	223,93	74	289,58	128	329,61	182	357,87		
26	226,03	76	291,41	130	330,81	184	358,78		
27	228,06	78	293,22	132	332,00	186	359,67		

Таблица П-7

Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^5, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$i, \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{K}^{-1}$	$\sigma \cdot 10^4, \text{Н/м}$	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	1,013	999,9	0,00	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	+0,70	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,013	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,013	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,4	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,2	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	434,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	1037,5	4,766	62,8	16,2	114,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,94	984,0	1135,1	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,1	237,4	0,87
270	55,05	967,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,90	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11

Продолжение табл. П-7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,74	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35
370	210,53	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	264	4,709	6,79

Таблица П-8

Физические свойства водяного пара на линии насыщения

t , °C	$p \cdot 10^5$, Па	ρ'' , кг/м ³	i'' , кДж/кг	r , кДж/кг	c_{p1} , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
100	1,013	0,598	26,75	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	26,91	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,4	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,394	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,291	0,658	17,76	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,512	0,544	18,25	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796,5	1661,4	4,468	4,803	0,453	18,84	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2789,8	1604,4	4,815	5,106	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2779,7	1542,9	5,234	5,489	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766,4	1476,3	5,694	5,827	0,261	20,60	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749,2	1404,3	6,280	6,268	0,216	21,29	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727,4	1325,2	7,118	6,838	0,176	21,97	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700,2	1238,1	8,206	7,513	0,141	22,86	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2665,9	1139,7	9,881	8,257	0,108	23,94	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,304	0,0811	25,21	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564,5	893,1	16,24	10,70	0,0580	26,58	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481,2	719,7	23,03	12,79	0,0386	29,14	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2330,9	438,4	56,52	17,10	0,0150	33,75	0,166	11,10

Таблица П-9

Физические свойства двуокиси углерода при давлении

$$p = 100 \cdot 10^5 \text{ Па}^*$$

T, К	$\frac{\rho}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}$	$\frac{i}{\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}$	$\frac{c_p}{\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}}$	$\frac{\lambda \cdot 10^2}{\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}}$	$\frac{a \cdot 10^8}{\frac{\text{м}^2}{\text{с}}}$	$\mu \cdot 10^5$, Па·с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8	9
275	964,6	502,0	2,20	11,9	5,59	11,1	52,9	2,06
280	938,1	513,1	2,28	11,3	5,31	10,3	58,4	2,07
285	909,6	524,8	2,38	10,8	5,01	9,52	65,6	2,09
290	878,2	537,0	2,51	10,3	4,67	8,76	75,4	2,14
295	843,0	550,0	2,70	9,77	4,30	8,00	89,4	2,21
300	802,1	564,1	2,99	9,23	3,85	7,23	111	2,34
301	793,0	567,1	3,06	9,11	3,75	7,07	117	2,38
302	783,6	570,2	3,15	9,00	3,65	6,91	123	2,42
303	773,7	573,4	3,24	9,88	3,55	6,75	131	2,46
304	763,3	576,7	3,35	8,76	3,43	6,58	139	2,51
305	752,4	580,1	3,47	8,64	3,31	6,41	149	2,57
306	740,9	583,7	3,61	8,52	3,19	6,24	160	2,64
307	728,7	587,3	3,76	8,39	3,06	6,06	173	2,72
308	715,7	591,2	3,95	8,26	2,92	5,88	188	2,81
309	701,8	595,3	4,17	8,12	2,77	5,69	206	2,92
310	686,7	599,5	4,23	7,97	2,62	5,50	228	3,05
311	670,4	604,1	4,74	7,81	2,46	5,29	254	3,21
312	652,5	609,0	5,11	7,65	2,29	5,08	286	3,39
313	632,9	614,4	5,55	7,47	2,12	4,86	326	3,61
314	611,2	620,2	6,08	7,27	1,96	4,63	373	3,87
315	587,2	626,6	6,68	7,05	1,80	4,38	428	4,15
316	561,0	633,5	7,28	6,81	1,67	4,13	487	4,42
317	532,9	641,1	7,79	6,54	1,58	3,89	538	4,63
318	504,0	649,0	8,05	6,26	1,54	3,65	571	4,69
319	475,9	657,1	7,98	5,98	1,57	3,44	575	4,57
320	449,7	664,9	7,63	5,71	1,66	3,25	553	4,35

Продолжение табл. П-9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
321	426,2	672,2	7,10	5,46	1,80	3,10	516	4,03
322	405,7	679,1	6,52	5,24	1,98	2,97	472	3,70
323	387,9	685,3	5,96	5,04	2,18	2,87	429	3,39
324	372,3	691,0	5,46	4,87	2,40	2,78	389	3,12
325	358,8	696,2	5,01	4,72	2,62	2,71	354	2,88
326	346,8	701,1	4,63	4,59	2,86	2,66	324	2,68
327	336,3	705,5	4,30	4,47	3,09	2,61	297	2,51
328	326,8	709,7	4,02	4,37	3,33	2,56	275	2,36
329	318,3	713,6	3,77	4,28	3,56	2,53	255	2,23
330	310,5	717,2	3,56	4,19	3,80	2,50	238	2,12
331	303,4	720,7	3,37	4,12	4,03	2,47	223	2,02
332	296,9	724,0	3,21	4,05	4,25	2,44	210	1,94
333	290,9	727,1	3,07	3,99	4,47	2,42	198	1,86
334	285,4	730,1	2,94	3,94	4,70	2,40	188	1,79
335	280,2	733,0	2,82	3,88	4,91	2,39	179	1,73
336	275,4	735,8	2,72	3,84	5,12	2,37	170	1,68
337	270,8	738,4	2,63	3,79	5,33	2,36	163	1,63
338	266,5	741,0	2,54	3,75	5,54	2,34	156	1,59
339	262,5	743,5	2,47	3,71	5,74	2,33	150	1,55
340	258,7	746,0	2,40	3,68	5,94	2,32	144	1,51
341	255,1	748,3	2,33	3,65	6,13	2,31	139	1,48
342	251,6	750,6	2,27	3,62	6,33	2,30	134	1,45
343	248,3	752,9	2,22	3,59	6,51	2,30	128	1,42
344	245,2	755,1	2,17	3,56	6,70	2,29	125	1,39
345	242,2	757,2	2,12	3,54	6,90	2,28	121	1,37
346	239,3	759,3	2,08	3,51	7,07	2,28	118	1,35
347	236,6	761,4	2,04	3,49	7,25	2,27	114	1,33
348	233,9	763,4	2,00	3,47	7,43	2,27	111	1,31
349	231,4	765,3	1,96	3,45	7,60	2,26	108	1,29
350	228,9	767,3	1,93	3,43	7,77	2,26	105	1,27
352	224,3	771,1	1,87	3,40	8,11	2,25	100	1,24
354	219,9	774,8	1,82	3,37	8,44	2,25	95,5	1,21
356	215,9	778,4	1,77	3,35	8,76	2,24	91,3	1,19

Продолжение табл. П-9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
358	212,0	781,9	1,73	3,32	9,08	2,24	87,6	1,16
360	208,4	785,3	1,69	3,30	9,39	2,24	84,2	1,14
370	193,0	801,4	1,54	3,23	10,9	2,24	71,0	1,07
380	180,6	816,2	1,44	3,20	12,3	2,25	61,8	1,02
390	170,4	830,3	1,38	3,19	13,6	2,27	55,0	0,979
400	161,7	843,8	1,33	3,20	14,9	2,29	49,7	0,950
450	131,7	906,6	1,21	3,39	21,3	2,44	34,6	0,871
500	113,1	965,8	1,17	3,69	27,9	2,62	27,2	0,830
550	99,9	1024	1,16	4,04	34,5	2,80	22,7	0,803
600	89,9	1082	1,16	4,40	42,2	2,97	19,6	0,784
650	82,0	1140	1,17	4,77	49,8	3,15	17,4	0,770
700	75,5	1199	1,18	5,14	57,8	3,31	15,7	0,760
750	70,0	1258	1,19	5,51	66,0	3,47	14,3	0,752
800	65,4	1318	1,21	5,87	74,5	3,63	13,2	0,746
* $p_k = 73,9 \cdot 10^5$ Па; $T_k = 304$ К. При $\rho = 100 \cdot 10^5$ Па $T_m \approx 318$ К.								

Таблица П-10

Физические свойства дымовых газов

($B = 760$ мм рт. ст. $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Па; $\bar{p}_{CO_2} = 0,13$; $\bar{p}_{H_2O} = 0,11$; $\bar{p}_{N_2} = 0,76$)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/}$ $(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/}$ $(\text{м} \cdot \text{К})$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61

Продолжение табл. П-10

1	2	3	4	5	6	7	8
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,301	1,290	10,0	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Таблица П-11

Физические свойства трансформаторного масла в зависимости от температуры

t , °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	Pr
0,0	892,5	1,549	0,1123	629,8	70,5	8,14	6,80	866
10	886,4	1,620	0,1115	335,5	37,9	7,83	6,85	484
20	880,3	1,666	0,1106	198,2	22,5	7,56	6,90	298
30	874,2	1,729	0,1008	128,5	14,7	7,28	6,95	202
40	868,2	1,788	0,1090	89,4	10,3	7,03	7,00	146
50	862,1	1,846	0,1082	65,3	7,58	6,80	7,05	111
60	856,0	1,905	0,1072	49,5	5,78	6,58	7,10	87,8
70	850,0	1,964	0,1064	38,6	4,54	6,36	7,15	71,3
80	843,9	2,026	0,1056	30,8	3,66	6,17	7,20	59,3
90	837,8	2,085	0,1047	25,4	3,03	6,00	7,25	50,5
100	831,8	2,144	0,1038	21,3	2,56	5,83	7,30	43,9
110	825,7	2,202	0,1030	18,1	2,20	5,67	7,35	38,8
120	819,6	2,261	0,1022	15,7	1,92	5,50	7,40	34,9

Таблица П-12

Физические свойства масла МС-20 в зависимости от температуры

t , °С	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$a \cdot 10^8$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	Pr
-10	990,3	1,951	0,136	—	—	7,75	6,24	—
0	903,6	1,980	0,135	—	—	7,58	6,24	—
+10	897,9	2,010	0,135	—	—	7,44	6,31	—
20	892,3	2,043	0,134	10026	1125	7,30	6,35	15400
30	886,6	2,072	0,132	4670	526	7,19	6,38	7310
40	881,0	2,106	0,131	2433	276	7,08	6,42	3890
50	875,3	2,135	0,130	1334	153	7,00	6,46	2180
60	869,6	2,165	0,129	798,5	91,9	6,86	6,51	1 340
70	864,0	2,198	0,128	498,3	58,4	6,75	6,55	865
80	858,3	2,227	0,127	336,5	39,2	6,67	6,60	588
90	852,7	2,261	0,126	234,4	27,5	6,56	6,64	420
100	847,0	2,290	0,126	171,7	20,3	6,44	6,69	315
110	841,3	2,320	0,124	132,4	15,7	6,36	6,73	247
120	835,7	2,353	0,123	101,0	12,1	6,25	6,77	193
130	830,0	2,382	0,122	79,76	9,61	6,17	6,82	156
140	824,4	2,420	0,121	61,80	7,50	6,08	6,87	123
150	818,7	2,445	0,120	53,17	6,50	6,00	6,92	108

Таблица П-13

Физические свойства масла МК в зависимости от температуры

t , °С	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$a \cdot 10^8$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	911,0	1,645	0,1510	35414	3883	9,94	8,56	39 000
20	903,0	1,712	0,1485	18560	1514	9,58	8,64	15 800
30	894,5	1,758	0,1461	6180	691,2	9,28	8,71	7450
40	887,5	1,804	0,1437	3031	342,0	8,97	8,79	3810
50	879,0	1,851	0,1413	1638	186,2	8,69	8,86	2140
60	871,5	1,897	0,1389	961,4	110,6	8,39	8,95	1320
70	864,0	1,943	0,1363	603,3	69,3	8,14	9,03	858
80	856 0	1,989	0,1340	399,3	46,6	7,89	9,12	591

Продолжение табл. П-13

1	2	3	4	5	6	7	8	9
90	848,2	2,035	0,1314	273,7	32,3	7,61	9,20	424
100	840,7	2,081	0,1290	202,1	24,0	7,33	9,28	327
110	838,0	2,127	0,1264	145,2	17,4	7,11	9,37	245
120	825,0	2,173	0,1240	110,4	13,4	6,92	9,46	193,5
130	817,0	2,219	0,1214	87,31	10,7	6,69	9,54	160,0
140	809,2	2,265	0,1188	70,34	8,70	6,53	9,65	133,3
150	801,6	2,311	0,1168	56,90	7,10	6,25	9,73	113,5

Таблица П-14

Физические свойства ртути и некоторых расплавленных металлов

Металл	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$a\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\text{Pr}\cdot 10^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
Ртуть Hg $t_{\text{пл}} = -38,9^\circ\text{C};$ $t_{\text{кип}} = 357^\circ\text{C};$ $r_{\text{пл}} = 11,72$ кДж/кг $r_{\text{ис}} = 291,8$ кДж/кг	20	13550	7,90	0,1390	4,36	11,4	2,72
	100	13350	8,95	0,1373	4,89	9,4	1,92
	150	13230	6,35	0,1373	5,30	8,6	1,62
	200	13120	10,3	0,1373	5,72	8,0	1,40
	300	12280	11,7	0,1373	6,64	7,1	1,07
Олово Sn $t_{\text{пл}} = 231,9^\circ\text{C};$ $t_{\text{кип}} = 2270^\circ\text{C};$ $r_{\text{пл}} = 58,2 \text{ кДж/кг};$ $r_{\text{ис}} = 3015 \text{ кДж/кг}$	250	6980	34,1	0,255	19,2	27,0	1,41
	300	6940	33,7	0,255	19,0	24,0	1,26
	400	6865	33,1	0,255	18,9	20,0	1,06
	500	6790	32,6	0,255	18,8	17,3	0,92
Висмут Bi $t_{\text{пл}} = 271^\circ\text{C};$ $t_{\text{кип}} = 1477^\circ\text{C};$ $r_{\text{пл}} = 50,2 \text{ кДж/кг};$ $r_{\text{ис}} = 855,4$ кДж/кг	300	10030	13,0	0,151	8,61	17,1	1,98
	400	9910	14,4	0,151	9,72	14,2	1,46
	500	9785	15,8	0,151	10,8	12,2	1,13
	600	9660	17,2	0,151	11,9	10,8	0,91

Продолжение табл. П-14

1	2	3	4	5	6	7	8
Литий Li $t_{\text{пл}}=179\text{ }^{\circ}\text{C};$ $t_{\text{кип}}=1317\text{ }^{\circ}\text{C};$ $r_{\text{пл}}=661,5\text{ кДж/кг}$ $r_{\text{ис}}=19595\text{ кДж/кг}$	200	515	37,2	4,187	17,2	111,0	6,43
	300	5050	39,0	4,187	18,3	92,7	5,03
	400	495	41,9	4,187	20,3	81,7	4,04
	500	484	45,3	4,187	22,3	73,4	3,28
Сплав 56,5% Bi+ +43,5% Pb; $t_{\text{пл}}=123,5\text{ }^{\circ}\text{C};$ $t_{\text{кип}}=1670\text{ }^{\circ}\text{C};$	150	10550	9,8	0,146	6,39	28,9	4,50
	200	10490	10,3	0,146	6,67	24,3	3,64
	300	10360	11,4	0,146	7,50	18,7	2,50
	400	10240	12,6	0,146	8,33	15,7	1,87
Сплав 25% Na+75% K; $t_{\text{пл}}=-11\text{ }^{\circ}\text{C};$ $t_{\text{кип}}=784\text{ }^{\circ}\text{C};$	500	10120	14,0	0,146	9,44	13,6	1,44
	100	852	23,2	1,143	23,9	60,7	2,51
	200	828	24,5	1,072	27,6	45,2	1,64
	300	808	25,8	1,038	31,0	36,6	1,18
	400	778	27,1	1,005	34,7	30,8	0,89
	500	753	28,4	0,967	39,0	26,7	0,69
	600	729	29,6	0,934	43,6	23,7	0,54
700	704	30,9	0,900	48,8	21,4	0,44	
Натрий Na $t_{\text{пл}}=97,8\text{ }^{\circ}\text{C};$ $t_{\text{кип}}=883\text{ }^{\circ}\text{C};$ $r_{\text{пл}}=113,26\text{ кДж/кг}$ $r_{\text{ис}}=4208\text{ кДж/кг}$	150	916	84,9	1,356	68,3	59,4	0,87
	200	903	81,4	1,327	67,8	50,6	0,75
	300	878	70,9	1,281	63,0	39,4	0,63
	400	854	63,9	1,273	58,9	33,0	0,56
500	829	57,0	1,273	54,2	28,9	0,53	

Библиографический список

1. Курпатенков В.Д., Кесаев Х.В. Расчет камеры жидкостного ракетного двигателя: Учеб. пособие.- М.: Изд-во МАИ, 1993. – 112с.
2. Методические указания для дипломного проектирования по выбору и расчету основных параметров схемы двигателя с турбонасосной подачей топлива/ Березанская Е.Л., Кесаев Х.В., Кудрявцева Л.В., Курпатенков В.Д.; МАИ. М., 1979
3. Расчет параметров и характеристик камеры двигателя: Учебное пособие/ Дорофеев А.А., Лоскутникова Г.Т., Филимонов Л.А., Чернухин В.А.; Под ред. А.И.Бабкина.; МГТУ. М., 1990
4. Расчет теплового состояния камеры ЖРД: Учебное пособие/ Булыгин Ю.А., Кретинин А.В., Рачук В.С., Фалеев С.В.: Под ред. В.П.Козелкова; Воронеж. гос. техн. ун-т. Воронеж, 1997
5. Дьяконов В. Mathcad 2001: учебный курс. – СПб.:Питер, 2001. – 624 с.
6. Глушаков А.Н. Гидрогазодинамика теплообменных аппаратов: учебное пособие / А.Н. Глушаков. Воронеж: ВПИ, 1985. 77 с.
7. Краснощёков Е.А. Задачник по теплопередаче. 4-е изд. / Е.А. Краснощёков, А.С. Сукомел. М.: Энергия, 1980. 288 с.
8. Майоров В.В. Конструктивный расчёт рекуперативных теплообменных аппаратов непрерывного действия: учебное пособие / В.В. Майоров. Воронеж: ВПИ, 1978. 106 с.
9. Справочник по теплообменникам: справочное издание: в 2-х т. / пер. с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 1. 560 с.
10. Справочник по теплообменникам: справочное издание: в 2-х т. / пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2. 352 с.

11. Исаченко В.П. Теплопередача: 3-е изд. перераб. и доп. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - М.: Энергия, 1975. 488 с.
12. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочное издание - 2-е изд. перераб. / под общ. ред. чл.-корр. АН СССР В.А. Григорьева, В.М. Зорина. - М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.

Содержание

Введение.....	1
Расчет наружного охлаждения ЖРД.....	2
Определение геометрических параметров и составление основной расчетной таблицы.....	2
Определение исходных параметров для расчета охлаждения.....	6
Вычисление распределения конвективных тепловых потоков.....	9
Определение лучистого и полного тепловых потоков.....	13
Расчет завесы охлаждения.....	16
Определение температуры нагрева жидкости.....	18
Определение необходимых проходных сечений охлаждающего тракта.....	19
Определение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{ж}$, коэффициента эффективности охлаждения η_p и скорости течения жидкости $w_{ж}$	20
Определение действительных значений тепловых потоков и температуры стенки.....	22
Определение температуры поверхности стенки со стороны жидкости.....	23
Пример вычисления конвективных тепловых потоков.....	24
Пример расчёта кожухотрубчатого теплообменного аппарата.....	30
Приложение 1.....	44
Приложение 2.....	84
Приложение 3.....	85
Библиографический список.....	102

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Теплопередача» для студентов специальности 160700.65,
24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных
двигателей» очной формы обучения

Составители: Шматов Дмитрий Павлович
Дахин Сергей Викторович
Тимошинова Татьяна Сергеевна

В авторской редакции

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский пр., 14