

Оглавление

Предисловие	2
Введение	3
Основные условные обозначения.....	7
1. Идентификация объекта расчета	8
1.1 Исходные данные.....	8
1.2. Дополнительные условия и ограничения.	8
1.2.1. Пристеночный слой.	9
1.2.2. Выбор охладителя.	10
1.2.3. Выбор материала.	12
1.2.4. Ограничения.	12
1.2.5. Расчетная схема СПО.	14
1.3. Расчет геометрических параметров СПО.	16
1.3.1. Параметры проточной части камеры.	16
1.3.2. Параметры охлаждающего тракта.....	17
2. Расчёт тепловых потоков в камере.....	20
2.1. Расчёт конвективных тепловых потоков.	20
2.2. Расчет лучистых тепловых потоков.	22
3. Расчет теплоотдачи в тракте охлаждения.....	24
3.1. Расчёт распределения температуры охладителя по длине тракта.	24
3.2. Расчёт коэффициента теплоотдачи.	25
3.3. Расчет коэффициента оребрения.	26
4. Определение температурного состояния стенки.	28
4.1. Условия баланса процесса теплообмена в проточной системе охлаждения.....	28
4.2. Расчет $T_{ст.г}$ первого приближения.	29
4.3. Расчет $T_{ст.г}$ при наличии локальной завесы.	29
4.4. Определение $T_{ст.г}$ второго приближения.	34
4.5. Определение $T_{ст.охл.}$	35
5. Расчет потерь давления охладителя в тракте охлаждения.....	35
6. Заключение	39
7. Основные требования к отчетности.....	40
Список использованных источников	41
Приложение А. Теплофизические свойства некоторых охладителей	42
Приложение Б. Теплопроводность различных конструкционных материалов	70
Приложение В. Пример титульного листа отчета	73
Приложение Г. Пример оглавления отчета	74

Предисловие

Домашнее задание по расчету охлаждения камеры ЖРД является важным этапом освоения курса «Теплозащита и прочность конструкций ЖРД», поскольку в нем отражены основные теоретические положения лекционного материала. Кроме того, домашнее задание – хороший практикум по приобретению основных навыков проектирования и расчета систем теплозащиты конструктивных элементов двигателя, в частности, одной из основных её технологий – наружного проточного охлаждения камеры. Расчет охлаждения камеры – обязательная составная часть курсового и дипломного проектов.

В тоже время домашнее задание по расчету охлаждения, как учебная работа, в отличие от нормативных отраслевых методик расчета имеет свою специфику, обусловленную уровнем профессиональной подготовленности студентов к решению инженерных задач, ресурсом времени и располагаемым арсеналом технических средств расчета. Акцент в задании делается на основных определяющих факторах проектирования и расчета системы охлаждения камеры. Методические указания концентрируют внимание студента на физико-технических аспектах механизма теплозащиты конструкции и логике построения алгоритма её расчета с широким привлечением необходимых знаний по теплофизике протекающих процессов, а также рекомендаций конструкторско-технологического характера.

При разработке данных методических указаний использовались известные материалы ранее опубликованных работ на данную тему [1...4] и многолетний опыт расчета охлаждения с использованием различных методик и программ в исследовательских и учебных целях. Изложенная ниже методика не привязана к какому-либо конкретному инструменту расчета (ручной счет, универсальные или специализированные машинные программы и т.п.). В современных условиях выбор подходящего расчетного инструмента не представляет особых проблем, тогда как свобода выбора значительно расширяет возможности вариантных расчетов и проектирования системы охлаждения в целом. По сравнению с предшествующими методическими разработками в данной работе предлагается алгоритм увязки процедур расчета наружного проточного охлаждения стенки с её защитой с помощью локальной завесы, приводятся новые данные по теплофизическим свойствам охладителей. Автор выражает благодарность Ушаковой О.Ю. студентке кафедры Э-1 за помощь в работе по оформлению и представлению материалов по теплофизическим свойствам охладителей (Приложение А).

Введение

Предельно высокие значения термогазодинамических параметров рабочих процессов в ЖРД требуют применения специальных мер теплозащиты элементов конструкции двигателя, особенно его камеры, для обеспечения работоспособности применяемых материалов и двигателя в целом. Наружное проточное охлаждение камеры – основная технология теплозащиты ЖРД. Система проточного охлаждения камеры рассматривается в качестве одной из основных подсистем двигателя, интегрированных в нем функционально и конструктивно, в том числе встроенных тем или иным способом в его пневмо-гидросистему (ПГС).

Система проточного охлаждения (СПО) в узком смысле представляет собой набор конструктивных элементов охлаждающего тракта: огневая стенка, ребра, наружная стенка-рубашка в совокупности с охладителем. В более широком понимании этого термина к СПО относится все, что оказывает существенное воздействие на результаты применяемого способа теплозащиты, в том числе: само рабочее тело двигателя, элементы и агрегаты подачи охладителя, входные и выводящие коллекторы, регулирующие органы, дополнительные элементы и меры защиты, и т.п. Степень интеграции СПО в систему двигателя определяется глубиной функциональных связей. Чаще всего в качестве охладителя используется один из компонентов топлива, а иногда и оба, далее непосредственно поступающие в камеру, и тогда параметры СПО достаточно жестко завязаны на параметры двигателя. В случае автономного или полуавтономного принципа функционирования СПО, в том числе с использованием автономного охладителя, эта связь может быть менее жесткой.

Расчет охлаждения камеры, представляет собой сопряженную тепловую задачу. Область решения является совокупностью существенно разнородных зон с различными механизмами тепло-массопереноса, но связанных единством процесса передачи одного и того же теплового потока из камеры через стенку в охладитель. Различие природы этих сопряженных зон и механизмов переноса в них тепловой энергии подразумевает различие используемых математических моделей и способов их реализации, т.е. решения задачи. Неразрывное, т.е. по пространству всех зон, решение сопряженных задач чрезвычайно затруднено. Исходя из этого, методология расчета охлаждения строится на декомпозиции единой расчетной области на следующие отдельные подобласти (рис.1):

- ядро потока продуктов сгорания 1 с параметрами T_{∞} и $\alpha_{\text{опт}}$, определяющими лучистые тепловые потоки в огневую стенку;

- зона пристеночного слоя 2 с пониженной температурой торможения $T_{ог}$ и параметрами: $\alpha_{ст}$, $K_{т.ст}$, $R_{ог}$, $c_{рог}$, определяющими конвективные тепловые потоки в стенку;
- внутренняя, так называемая огневая стенка камеры 3 с искомыми расчетными температурами поверхности со стороны продуктов сгорания $T_{ст.г}$ и со стороны охладителя $T_{ст.охл}$;
- охладитель 4, воспринимающий суммарные тепловые потоки от продуктов сгорания из камеры, со среднемассовой температурой $T_{охл}$ и режимным параметром $Re_{охл}$;
- наружная силовая стенка-рубашка охлаждения 5 со средней по сечению температурой $T_{ст.нар}$ значительно более низкой, чем температура $T_{ст.охл}$
- окружающая среда (6).

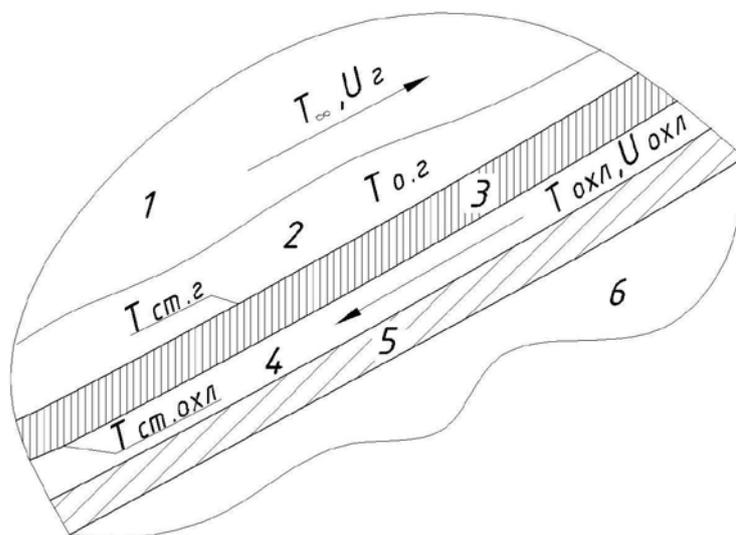


Рис. 1

Область решения сопряжённой тепловой задачи

- 1 – ядро течения продуктов сгорания;
 2 – пристеночный слой; 3 – внутренняя огневая стенка;
 4 – тракт охлаждения; 5 – наружная стенка;
 6 – окружающая среда.

В каждой из этих подобластей решается относительно самостоятельная задача (подзадача) по расчету переноса тепловой энергии с определенным образом заданными условиями на границах подобластей. Для зон 1 и 2 – это $T_{ст.г}$, при которой определяются лучистые и конвективные тепловые потоки от газа в стенку. Для зоны 4 – это $q_{г}$, – суммарные тепловые потоки равные в случае стационарного процесса $q_{охл}$, по которым определяется подогрев охладителя и его свойства, на основании чего рассчитывается коэффициент теплоотдачи со стороны охладителя $\alpha_{охл}$. Эта же величина $q_{г}$ является условием для

определения температуры стенки со стороны охладителя – $T_{\text{ст.охл}}$. При выполнении принятого допущения о несущественности влияния на конечный результат областей 5 и 6 сшивание отдельных решений по зонам 1...4 осуществляется методом последовательных приближений на сходимости граничных условий, например, I-рода, т.е. температуры, на поверхности стенки со стороны продуктов сгорания – $T_{\text{ст.г}}$.

Такой подход к решению сопряженной задачи непосредственно реализуется конкретной методикой и алгоритмом расчета охлаждения. Расчет представляет собой нахождение количественных значений параметров состояния системы: температурного поля огневой стенки камеры, средне-массовой температуры охладителя, поля давлений и суммарной потери давления в тракте.

Различают поверочные и проектные расчеты. В первом случае, по заданным исходным данным-параметрам и размерам (геометрии камеры и тракта охлаждения) – определяются параметры состояния системы и на их основании делается заключение о работоспособности СПО и двигателя в целом, и выдаются рекомендации по их усовершенствованию. Во втором случае при проектном расчете в исходные данные входят только параметры и размеры камеры, а проектирование тракта охлаждения, схемы течения охладителя, выбор условий работы, материалов огневой стенки и другие необходимые для проектирования камеры вопросы входят в решение задачи. В этом случае расчет приобретает вариантно-итерационный характер и завершается обоснованием принятых решений и подтверждением работоспособности СПО на основании полученных конечных результатов.

В настоящее время расчеты охлаждения камер ЖРД на предприятиях-разработчиках осуществляются по отраслевой нормативной методике В.М. Иевлева, базовые положения которой изложены в работе [1]. В основу метода положена модель процесса переноса энергии и импульса в приближении пограничного слоя в интегральных параметрах с привлечением эмпирических «законов трения и теплообмена». Модель представляется в форме преобразованных уравнений на случай течения сжимаемой жидкости (газа) с переменными свойствами, вычисляемыми по «определяющим» температурам. Расчет ведётся дискретно для последовательно расположенных сечений камеры поэтапно, включая газовый тракт, огневую стенку, тракт охлаждения, с последующим итерационным процессом сшивания решений по подобластям в каждом сечении.

Домашнее задание является отображением нормативной методики расчета охлаждения в ракетной отрасли по всем основным этапам и процедурам и носит характер проектного расчета с элементами конструкторско-технологических вопросов проектирования. Однако с учетом учебного характера и ограниченности ресурсов времени расчет ведётся по упрощенной расчетной схеме, по приближенным формулам и с меньшим объемом вычислений. На

последующих этапах обучения в курсовом и дипломном проектах эти упрощения без особых проблем могут быть сняты. Домашнее задание включает в себя следующие основные разделы-этапы расчета.

1. Идентификация объекта расчета.
2. Расчет тепловых потоков в камере
3. Расчет подогрева охладителя и теплоотдачи в тракте охлаждения.
4. Определение температурного состояния стенки.
5. Расчет гидравлических потерь в тракте охлаждения.
6. Заключение по результатам расчета.

Следует придерживаться следующих общих рекомендаций по выполнению домашнего задания.

- Все расчеты проводятся в системе размерности СИ. Представление результатов допускается в кратных или дольных единицах (десятичная система мер – 10^n).
- Каждому шагу решения предшествуют расчетные формулы с комментариями, результаты также комментируются, а по каждому этапу формулируется принятое решение.
- По итогам расчета охлаждения делается заключение и предлагаются рекомендации по улучшению СПО.
- Расчеты могут вестись с помощью различных инструментов, включая ручной счет, электронные таблицы, MATCAD, специализированные программы и др.

Основные условные обозначения

T	– температура, К;
ρ	– плотность, кг/м ³ ;
p	– давление, Па, МПа;
c	– удельная теплоемкость, Дж/(кг · К);
μ	– динамическая вязкость, Па · с;
R	– газовая постоянная, Дж/(кг · К);
λ	– коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}} \text{К}$; приведенная скорость, б/р;
K_m	– соотношение компонентов, б/р;
α	– коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² · К); коэффициент избытка окислителя, б/р;
F, f	– площадь сечения, м ² ;
ΔS	– площадь поверхности, м ² ;
n	– число ребер, б/р;
h	– высота, м;
q	– плотность теплового потока, Вт/м ² ;
$q(\lambda)$	– газодинамическая функция расходонапряженности изоэнтропного адиабатного потока, б/р;
ξ	– коэффициент гидравлического сопротивления, б/р;
\dot{m}	– секундный расход, кг/с;
x	– координата;
u, w	– скорость, м/с;
δ	– толщина, м;
D, d	– диаметр, м;

Числа подобия (критериальные числа)

$$\text{Re} = \frac{\rho u \cdot d_r}{\mu} \quad \text{– число Рейнольдса}; \quad \text{St} = \frac{\alpha}{\rho u \cdot c_p} \quad \text{– число Стантона};$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad \text{– число Прандтля}; \quad \text{Bi} = \frac{\alpha \delta_p}{\lambda_p} \quad \text{– число Био}.$$

Индексы

ог	– торможение газа;	з	– завеса;
ст	– стенка;	ст.охл	– стенка на стороне охладителя;
охл	– охладитель;	уч	– участок;
г	– газ, гидравлический;	доп	– допустимый;
ср	– средний;	разл	– разложение;
усл	– условный;	расч	– расчетный;
вх	– вход;	p	– по давлению, ребро;
вых	– выход;	N	– нормальный;
i	– номер сечения;	к.с.	– камера сгорания;
кр	– критический;	стех	– стехиометрический;

1. Идентификация объекта расчета

Идентификация объекта расчета – формулирование достаточной совокупности существенных, количественных и качественных признаков проектируемого технического устройства – первый и очень важный этап любого расчёта. Система проточного охлаждения (СПО) как подсистема ЖРД в той или иной степени взаимосвязана с основными системами двигателя и не может быть реализована без учета его основных особенностей. Поэтому проектируемая СПО – производная от основных параметров и характеристик всего двигателя и его основных систем, на основании которых формируются как неизменяемые директивные исходные данные для расчета, так и дополнительные варьируемые проектные условия и ограничения.

1.1 Исходные данные

Исходные директивные данные – это внешний фактор проектируемой СПО, не подлежащий пересмотру и корректировке без специального разрешения. Исходные данные должны содержать следующие основные показатели:

- тип двигателя, его функциональное назначение;
- тягу двигателя, число камер;
- компоненты топлива, расходы компонентов и суммарный расход;
- соотношение компонентов топлива: K_m ; α ;
- полное давление в камере сгорания;
- давление на срезе сопла;
- температура в камере сгорания;
- контур и размеры проточной части камеры, в том числе – диаметр критического сечения сопла;

1.2. Дополнительные условия и ограничения.

Дополнительные условия и ограничения (дополнительные исходные данные), конкретизирующие задачу проектного расчета, являются следствием принятых концептуальных решений для проектируемой СПО. Они устанавливаются проектировщиком самостоятельно на базе имеющихся знаний и опыта работы и требуют системного подхода к их назначению и к выбору значений параметров.

Информация об исходных директивных данных по п.1.1 и принятых дополнительных данных по п. 1.2 представляются в форме таблицы по примеру приведенного образца (рис. 2).

1.2.1. Пристеночный слой.

Высокие значения термогазодинамических параметров рабочего процесса в камере не позволяют решить проблему теплозащиты стенки только наружным проточным охлаждением. Поэтому в окрестности стенки камеры формируется так называемый пристеночный слой потока продуктов сгорания с пониженным значением температуры $T_{0г}$ (обычно порядка 2000К) путем обеспечения соответствующего

Таблица исходных данных для расчета охлаждения.

1.	Тип двигателя	-	-	
2.	Окислитель	-	-	
3.	Горючее	-	-	
4.	Тяга двигателя/число камер	$P/нк$	кН	
5.	Давление в камере сгорания	p_k	МПа	
6.	Давление на срезе сопла	p_a	МПа	
7.	Стехиометрическое соотношение компонентов	$K_{м.стех}$	-	
8.	Коэффициент избытка окислителя в ядре	$\alpha_{я}$	-	
9.	Соотношение компонентов в ядре	K_m	-	
10.	Суммарный расход топлива	\dot{m}_T	кг/с	
11.	Расход горючего	$\dot{m}_Г$	кг/с	
12.	Расход охладителя (Г или 0)	$\dot{m}_{охл}$	кг/с	
13.	Температура продуктов сгорания в камере сгорания (в ядре потока)	T_k	К	
14.	Показатель адиабаты в ядре потока	k	-	
15.	Коэффициент избытка окислителя в пристеночном слое	$\alpha_{ст}$	-	
16.	Соотношение компонентов в пристеночном слое	$K_{м.ст}$	-	
17.	Температура газа в пристеночном слое	$T_{0г}$	К	
18.	Удельная теплоемкость газа в пристеночном слое	$c_{p0г}$	кДж/ (кг · К)	
19.	Удельная теплоемкость газа в пристеночном слое при температуре стенки $T_{всл}$	$c_{p0г ст}$	кДж/ (кг · К)	
20.	Газовая постоянная пристеночного слоя	$R_{0г}$	кДж/ (кг · К)	
21.	Вязкость газа в пристеночном слое	$\mu_{0г}$	Н · с/м ²	

22.	Материал огневой стенки и ребер			
23.	Допустимая температура охладителя	$T_{\text{охл. доп.}}$	К	
24.	Допустимая температура огневой стенки со стороны газа	$T_{\text{ст.г. доп.}}$	К	
25.	Допустимая температура огневой стенки со стороны охладителя	$T_{\text{ст.охл. доп.}}$	К	
26.	Допустимые гидравлические потери по отношению к давлению в тракте охлаждения	$\overline{\Delta p}_{\text{доп.}}$	%	

Рис. 2

Образец выполнения таблицы исходных данных

соотношения компонентов $K_{m \text{ ст}} (\alpha_{\text{ст}})$ посредством комбинации форсунок окислителя и горючего [5]. Как правило, пристеночный слой имеет восстановительные свойства (избыток горючего) среды. Толщина этого слоя определяется условно средним расстоянием от стенки до ближайшего ряда форсунок окислителя и считается в расчете неизменной, по крайней мере, на цилиндрическом и сужающемся участках камеры. Подбор соответствующего значения $K_{m \text{ ст}}$ осуществляется с помощью программы «Астра». Следует иметь в виду, что чем «холоднее» пристеночный слой (чем меньше $T_{0г}$) по сравнению с ядром потока, тем больше будут связанные с этим потери удельного импульса тяги. По выбранному $\alpha_{\text{ст}}$ определяются термодинамические и теплофизические параметры и свойства продуктов сгорания $c_{p 0г}$, $\mu_{0г}$, $R_{0г}$, $T_{0г}$.

1.2.2. Выбор охладителя.

В качестве охладителя можно использовать различные жидкости (газы) в зависимости от принципиальной схемы двигателя и системы охлаждения в частности, а также от располагаемых возможностей. Эффективность охлаждения различными жидкостями по величине удельного теплосъема при температурном напоре $\Delta T = 200\text{K}$ и различных скоростных напорах p можно оценить по таблице 1.

Таблица 1. Показатели эффективности охлаждения различными охладителями.

№ п.п.	Компоненты	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$K, \frac{\text{кг}^{0,2}\text{М}^{1,8}}{\text{с}^{2,2}\text{К}}$	$p = 0,02 \text{ МПа}$		$p = 0,2 \text{ МПа}$		$p = 2,0 \text{ МПа}$	
					$q \cdot 10^{-6}, \text{ Вт/м}^2$	$\omega, \text{ м/с}$	$q \cdot 10^{-6}, \text{ Вт/м}^2$	$\omega, \text{ м/с}$	$q \cdot 10^{-6}, \text{ Вт/м}^2$	$\omega, \text{ м/с}$
1	Аммиак	25	610	841	10,53	8,10	26,46	24,70	66,48	80,98
2	Вода	50	990	440	6,69	6,36	16,80	20,10	42,21	63,56
3	Водород жидкий	-253	71,3	930	4,94	23,68	12,40	74,90	31,15	236,9
4	Перекись водорода	25	1431	251	4,42	5,29	11,10	16,72	27,90	52,87
5	20% HNO_3 +80% N_2O_4	50	1520	224	4,04	5,13	10,15	16,22	25,51	51,30
6	Водород газообразный	27	8,0	1792	3,97	70,71	9,96	223,6	25,02	707,1
7	Гидразин	50	1035	250	3,87	6,22	9,72	19,66	24,41	62,17
8	Кислород жидкий	-183	1144	171	2,75	5,91	6,92	18,70	17,38	59,13
9	Четырехокись азота	50	1350	158	2,73	7,21	6,85	17,21	17,21	54,43
10	Аэрозин	25	890	184	2,68	6,70	6,73	21,20	16,90	67,04
11	НДМГ	50	760	195	2,67	7,26	6,70	22,94	16,83	72,55
12	Тонка	50	820	103	1,42	6,98	3,65	22,09	9,16	69,84
13	Угледородное горючее	50	802	97	1,36	7,06	3,41	22,33	8,55	70,62
14	Керосин Т-1	50	795	83	1,16	7,08	2,90	22,43	7,29	70,93

В качестве охладителя в основном используется бортовое горючее. Иногда, если его не хватает для достаточного охлаждения, используется и второй компонент – окислитель. Свойства охладителя существенно зависят от температуры, а для газообразных охладителей и от давления, что необходимо учитывать при расчете его состояния при движении по тракту и нагреву. Особенно сильно эта зависимость наблюдается при прохождении охладителя через область критических значений параметров. Свойства охладителя μ , c_p , λ , ρ и их комбинацию $K = \lambda^{0,6} \left(c_p / \mu \right)^{0,4}$, называемую охлаждающей способностью, в диапазоне рабочих значений T и p можно представить графически, таблично или аналитически. Ориентировочной точкой отсчета области значений можно принять температуру охладителя на входе в тракт, равную температуре хранения компонента в баке. Так для высококипящих охладителей можно принять $T_{\text{охл.вх}} = 293\text{К}$, для криогенных – соответственно температуру насыщения при давлении наддува в баке (0,2...0,4МПа). Здесь же указываются значения параметров состояния в предельной точке кривой насыщения «К» -точке критического состояния вещества охладителя $T_{\text{кр}}$, $p_{\text{кр}}$ и $\rho_{\text{кр}}$. Именно в окрестности этой точки изменения свойств имеют экстремальный характер. Сведения о свойствах различных веществ берутся из рекомендуемых официально опубликованных источников [6, 7, 3 и др.]. Данные о свойствах некоторых охладителей, частично взятые из [2], представлены в приложении П-1.

Расход охладителя $m_{\text{охл}}$ определяется его охлаждающей способностью и, как правило, приравнивается к расходу соответствующего компонента топлива, хотя иногда может составлять только его часть, что оговаривается при постановке задачи.

1.2.3. Выбор материала.

Выбор материала стенки определяется несколькими соображениями. Так внутренняя огневая стенка может быть выполнена как из жаростойких хромоникелевых сплавов, так и из медных сплавов типа БрХ08. Причем вторые предпочтительны, так как, не смотря на относительно низкую допустимую температуру, благодаря высокой теплопроводности имеют малые температурные градиенты в стенке, следовательно, меньшее термическое сопротивление, что благоприятно для охлаждения, а также меньшие термические напряжения, что благоприятно для прочности. Иногда внутренняя стенка может выполняться комбинированной из различных материалов, например, в зоне камеры сгорания, сужающейся части и критического сечения – из медных сплавов, а в расширяющейся части сопла – из жаростойкой стали типа 12Х18Н10Т, а в случае так называемого «неохлаждаемого» концевой насадка сопла, когда охлаждение происходит излучением теплоты в окружающее пространство, могут быть использованы ниобиевые или молибденовые сплавы. Соединение разнородных материалов осуществляется при этом посредством переходных кольцевых элементов из совместимых по сварке материалов, например, 12Х21Н5Т, который лучше других сваривается с бронзой, либо по спецтехнологии.

Наружная силовая рубашка, работающая при более низких температурах, выполняется из нержавеющей сталей типа 12Х21Н5Т или 12Х18Н10Т. Влияние параметров и свойств наружной стенки незначительно сказывается на тепловом состоянии огневой стенки и всей системы охлаждения в целом. В тоже время теплопроводность материала внутренней стенки существенно влияет на состояние СПО и поэтому зависимость коэффициента теплопроводности от текущей температуры, изменяющейся по длине и по толщине стенки, необходимо учитывать в расчетах. Сведения о теплопроводности используемых материалов могут быть взяты из официально изданных Справочников. Данные по некоторым материалам представлены в Приложении 2.

1.2.4. Ограничения.

Ограничения накладываются на допустимые значения температуры охладителя и элементов конструкции, а также на суммарные потери давления, исходя из условия работоспособности СПО в составе ЖРД в целом.

Допустимая температура охладителя $T_{\text{охл, доп}}$ задается расчетчиком из следующих соображений. Если давление охладителя не превышает своего критического значения для данного вещества, то при достижении им температуры насыщения возможно объемное вскипание охладителя в тракте, ведущее к резкому изменению режима течения и теплообмена в

возникшем двухфазном потоке и существенному уменьшению коэффициента теплоотдачи. В результате этого может произойти прогар камеры. Если охладитель в тракте находится при давлении, выше критического то кипение не возможно, однако существует опасность термokatалитического разложения охладителя с осаждением твердой фазы на теплоотдающую поверхность стенки, что ведет к увеличению ее теплового сопротивления и нарушению работы СПО, а возможно и к взрыву и разрушению камеры. Другие ограничения на $T_{\text{охл}}$ могут накладываться, например, по условиям работоспособности сопряженных с камерой узлов и агрегатов двигателя. Таким образом $T_{\text{охл,доп}}$ лимитируется в основном свойствами охладителя и его состоянием, т.е. либо температурой насыщения при $p < p_{\text{кр}}$, либо температурой начала термokatалитического разложения охладителя при контакте с материалом огневой стенки в случае $p > p_{\text{кр}}$.

Допустимая температура огневой стенки камеры является величиной компромиссной и назначается с учетом обеспечения прочности камеры, исходя из следующих соображений. С ростом температуры уменьшается прочность материала стенки, что может быть компенсировано увеличением ее толщины. Но, начиная с определенного значения температуры удельная прочность материала резко уменьшается так, что компенсация этого явления увеличением толщины стенки становится неоправданной по массовым показателям. Соответствующая этой ситуации температура поверхности огневой стенки со стороны продуктов сгорания принимается за допустимую – $T_{\text{ст.г.доп}}$.

Имеются так же ограничения на температуру стенки со стороны охладителя, вызываемые опасностью потери работоспособности СПО из-за нарушения режима теплообмена. Для случая докритических давлений вещества возможно наступление режима пристенного пузырькового кипения, способствующего повышению коэффициента теплоотдачи, если температурный напор – разность между температурой стенки и температурой насыщения охладителя невелика. Для высококипящих компонентов топлива эта величина составляет 100...150К, для криогенных – значительно ниже – несколько градусов. При превышении этого значения температурного напора наступает кризис кипения с заменой режима пузырькового на пленочное кипение, сопровождающееся резким снижением коэффициента теплоотдачи и прогаром стенки. Для сверхкритических давлений охладителя, когда кипение невозможно, основанием для ограничения $T_{\text{ст.охл}}$ будет интенсивное разложение вещества охладителя на теплоотдающей поверхности, когда $T_{\text{ст.охл}}$ превысит заметно температуру разложения охладителя при данном давлении.

Допустимая по условиям прочности температура стенки со стороны газа для высоколегированных сталей не превышает 1200К, для медных сплавов – 800К, а для ниобия и

молибдена – 1700К. Температура огневой стенки со стороны охладителя лимитируется свойствами вещества охладителя и может быть рекомендована как $T_{\text{ст.охл.доп}} = T_{\text{нас}} + (0...50)\text{К}$ для случая $p < p_{\text{кр}}$, либо $T_{\text{ст.охл.доп}} = T_{\text{разл}} + (0...50)\text{К}$ для случая $p > p_{\text{кр}}$ в зависимости от особенностей тех или иных охладителей.

Ограничения по суммарным гидравлическим потерям в тракте определяются требованиями энергетической эффективности системы подачи топлива, а также ее массово-габаритными характеристиками, особенно в случае предельно высоких значений давления в замкнутых системах ЖРД с дожиганием генераторного газа. Считаются допустимыми потери в пределах 10...20% от номинального давления охладителя на входе в охлаждающий тракт. В отдельных специальных случаях это значение может быть увеличено.

1.2.5. Расчетная схема СПО.

Типовая расчетная схема СПО камеры ЖРД представлена на рис 3. Камера разбивается на 20...30 участков. Для более точных расчетов, например, при выполнении последующих–курсового и дипломного проектов, число участков и расчетных сечений рекомендуется увеличить до 40...60. Порядок нумерации сечений рекомендуется устанавливать по ходу течения продуктов сгорания. Порядковый номер участка $i_{\text{уч}}$ следует обычно за соответствующим порядковым номером сечения. Нумерация участков и сечений начинается с $i = 1$, для которого расчетное сечение совпадает с плоскостью смесительной головки камеры. Длины расчетных участков или частота расположения сечений определяются продольными градиентами удельных тепловых потоков, принимающими максимальные значения вблизи минимального (критического) сечения камеры, где длины участков принимаются минимальными, а частота расположения расчетных сечений – максимальной. Расчетные сечения обязательно помещают в сечения камеры, где претерпевает излом профиль лучистых тепловых потоков, а также в сечениях, где изменяются параметры тракта охлаждения, вводится локальная завеса и меняется материал стенки, а также в выходном сечении камеры сгорания в минимальном и максимальном сечениях сопла.

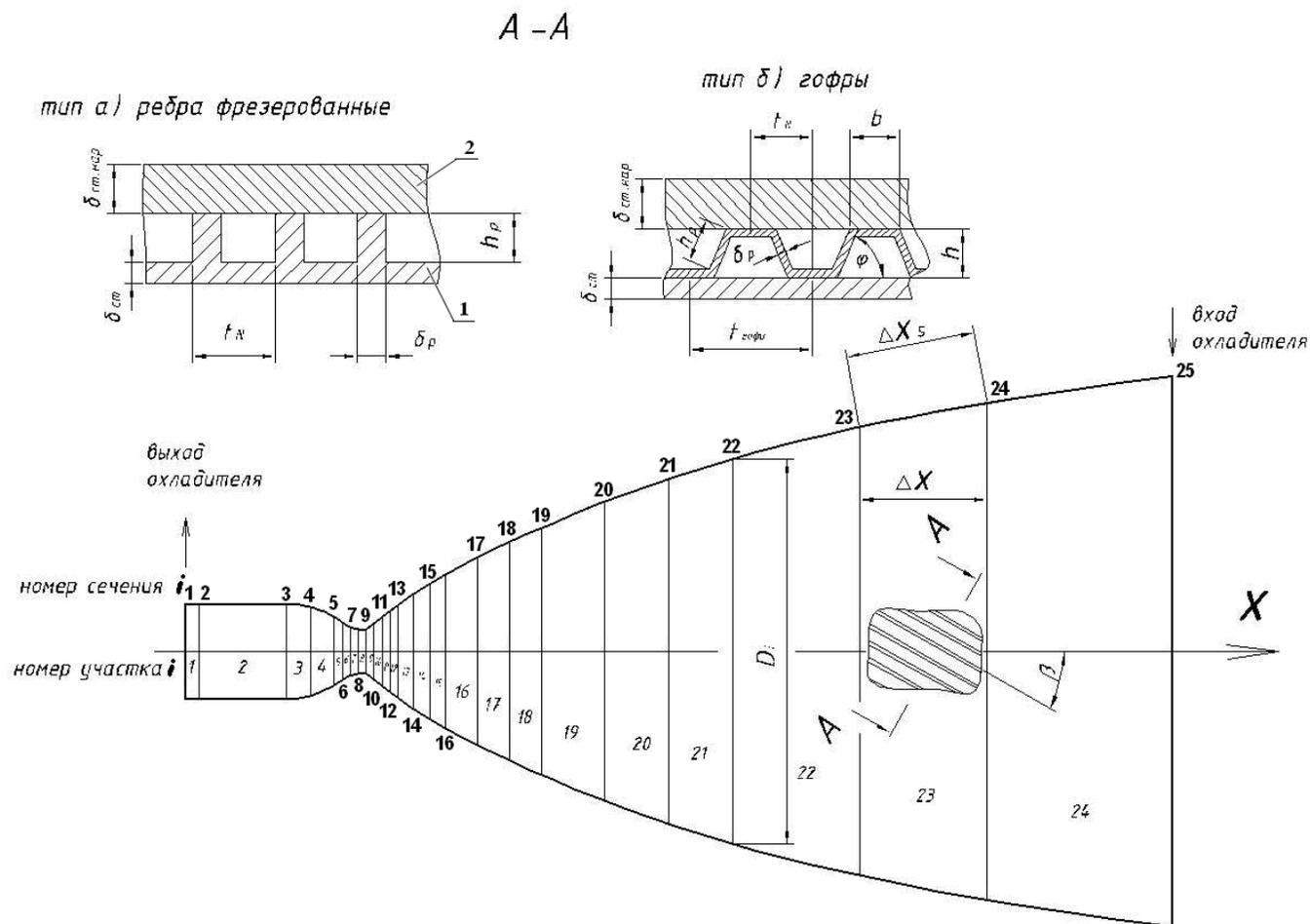


Рис. 3

Расчетная схема охлаждения

1 – внутренняя огневая стенка; 2 – наружная силовая оболочка камеры

[Оглавление](#)

На схеме указываются места вводов, разделения и выводов охладителя. Наиболее распространенная схема движения охладителя – противотоком по отношению к движению продуктов сгорания с вводом охладителя в тракт у среза сопла. Иногда ввод осуществляется на некотором удалении от среза сопла с петлевой подачей части охладителя (10...20%) в концевую часть сопла и с последующим смешиванием ее с основной долей. Для высотных двигателей концевая часть сопла нередко выполняются из тугоплавких термостойких материалов «неохлаждаемой», т.е. охлаждение этой части сопла происходит радиационным способом за счет излучения в окружающее пространство без проточного охлаждения.

На расчетной схеме необходимо обозначить все основные геометрические параметры СПО, используемые в расчете, такие как x , D , Δx , Δx_s , ΔS , а также геометрические параметры охлаждающего тракта, включая тип оребрения (ребра, гофры), угол наклона ребер, высоту тракта, толщины стенок, толщину и шаг ребер по нормальному сечению и т.п. На расчетной схеме допустимо помещать и другую дополнительную информацию о СПО, способствующую лучшему пониманию облика рассчитываемого объекта.

1.3. Расчет геометрических параметров СПО.

Исходными данными для определения геометрических параметров СПО являются координаты точек контура камеры: x и D . Производные от них параметры рассчитываются для каждого расчетного сечения или участка и представляются таблично.

1.3.1. Параметры проточной части камеры.

Координаты внутреннего контура камеры входят в директивные исходные данные на расчет, либо могут быть определены по чертежу в виде пар координат сечений x и D . Безразмерные значения диаметров \bar{D} получаются делением D на диаметр критического сечения камеры $d_{кр}$, площади текущих сечений относятся к площади критического сечения $F_{кр} = \pi d_{кр}^2 / 4$, т.е. $\bar{F} = F / F_{кр}$.

Длины участков по оси камеры Δx вычисляется по разности координат x , длины участков по образующей контура Δx_s определяются их кусочно-линейной аппроксимацией. Площадь боковой поверхности участка определяется по формуле $\Delta S = 0,5\pi (D_i + D_{i+1}) \Delta x_s$. Геометрические параметры камеры представляются в табличном виде.

i	x м	D м	\bar{D} –	F м ²	\bar{F}	Δx м	Δx_s м	ΔS м ²
1								
2								
·								
∴								
N								

1.3.2. Параметры охлаждающего тракта.

Выбор геометрических параметров тракта охлаждения определяется следующими соображениями. Охлаждающий тракт (см. рис. 3) представляет собой связанные оребрением оболочки – внутреннюю огневую стенку 1 и наружную силовую оболочку – рубашку 2. Толщина огневой стенки $\delta_{ст}$ выбирается не менее 1 мм. Толщина наружной стенки $\delta_{ст.нар}$ определяется из условий прочности и может быть условно назначена от 3 до 5 мм. Оребрение выполняет три основные функции: дистанцирует оболочки, развивает теплоотдающую поверхность огневой стенки и обеспечивает необходимую прочность и жесткость камеры. С позиций решения проблемы тепловой защиты определяющим фактором является повышение теплоотдающей способности тракта за счет развития ребрами поверхности теплоотдачи и в этом смысле частое расположение ребер этому способствует. Частое расположение ребер способствует и повышению прочности камеры, однако существуют вполне конкретные ограничения на параметры оребрения со стороны технологических возможностей существующих производств. Исходя из совокупности этих факторов и выбираются проектные параметры оребрения.

Толщину ребер δ_r рекомендуют выбирать для фрезерованных ребер не менее 1 мм, а для гофрированных проставок – не менее 0,5 мм. Минимальные размеры – ширину и высоту образующихся межреберных канальчиков рекомендуется назначать не менее 1,5 мм из-за опасности заплавления канальчиков припоем при пайке. Таким образом, минимальный шаг оребрения по нормали к ребрам должен быть не менее $t_N = 2,5$ мм, и приходится он на область критического сечения камеры. При неизменном числе ребер по мере возрастания диаметра камеры D шаг ребер будет увеличиваться до своего максимального значения, не превышающего $t_N \approx 6,5 \dots 7$ мм, определяемого требованиями прочности. По достижении этого предельного значения число ребер n увеличивается – например, удваивается, а шаг расположения ребер уменьшается до примерно первоначального, и так эта процедура повторяется до конца тракта.

Высота тракта h , как правило, не изменяется по длине камеры и выбирается по соображениям его пропускной способности для данного расхода охладителя с умеренными скоростями течения, которые для капельных жидкостей рекомендуется выбирать в диапазоне 5...10 (15) м/с, для газообразных охладителей – до 30 м/с, что лимитируется приемлемыми потерями давления охладителя в тракте охлаждения.

Выбор типа оребрения – фрезерованные ребра или гофры – определяется несколькими факторами: прочностью, технологией, массовыми характеристиками и др. При большей

трудоемкости и стоимости изготовления фрезерованные ребра загромаждают сечение тракта меньше, чем гофры и обеспечивают большую прочность конструкции камеры. По опыту промышленности фрезерованные ребра являются более предпочтительными, особенно для камер большего давления. Исходные параметры тракта обычно принимаются постоянными и сводятся в таблицу:

- тип оребрения ...
- высота тракта h , мм ...
- толщина внутренней огневой стенки $\delta_{ст}$, мм ...
- толщина ребра δ_p , мм ...
- толщина наружной стенки $\delta_{ст. нар}$, мм ...
- угол наклона ребра к образующей β° , ...
- средний угол наклона гофра γ° ...
- высота ребра гофра $h_p = \frac{h - \delta_p}{\sin(\gamma)}$, мм ...

Выбор числа ребер в сечениях сообразно рекомендациям на характерные размеры оребрения определяется следующим образом. Шаг оребрения в текущем сечении вычисляется по среднему диаметру $D_{0,5h} = D(1 + (2\delta_{ст} + h)/D)$. В сечении, совпадающим с критическим сечением камеры, с минимальным шагом оребрения $t_N \min = 2,5$ мм число ребер определяется по формуле ориентировочно:

$$n'_{p,кр} = \frac{\pi D_{0,5} \cdot \cos\beta}{t_N \min}$$

Это число приводится в сторону уменьшения к целочисленному значению $n_{p,кр}$ с обязательным условием его деления на 2 при фрезеровании парных ребер (иногда берется двойное удвоение – деление на 4 для технологии фрезерования 2^x -парных ребер). Шаг оребрения в критике $t_{N,кр}$ после этого корректируется в сторону увеличения. По обе стороны от критического сечения число ребер или шагов ребер n_p сохраняется постоянным до сечения удвоения. Диаметры сечений, в которых происходит удвоение числа ребер определяются по формуле:

$$D_{k_n} = \frac{t_N \max \cdot k_n \cdot n_{p,кр}}{\pi \cos\beta} - (2\delta_{ст} + h); \quad k_n = 1, 2, 4, 8, \dots$$

Текущее значение шага оребрения вычисляется по формуле:

$$t = \pi D_{0,5h} / n_p; \quad t_N = t \cos\beta, \quad \text{где: } n_p = n_{p,кр} k_n$$

Для гофрированного оребрения тракта шаг гофра (волны) содержит два межрёберных канала и два ребра (плеча гофра), поэтому шагом ребра будет половина волны, а число шагов или каналов должно быть четным.

Расчёт прочих текущих геометрических параметров тракта: проходного сечения по нормали к ребрам f , гидравлического диаметра d_r , определяемого по формуле $d_r = 4f/\Pi$, где: Π – смоченный периметр, ведется по следующим зависимостям:

а) щелевой тракт без рёбер:

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

б) тракт с прямоугольными рёбрами:

$$f = t_N h (1 - \delta_p / t_N) n_p; \quad d_r = 2h (t_N - \delta_p) / (t_N - \delta_p + h)$$

в) тракт с гофрированными проставками:

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

$$d_r = 2 \cdot h \frac{t_N - (\delta_p / h) \left[\sqrt{(h - \delta_p)^2 + (t_N - b)^2} + b \right]}{t_N + \sqrt{(h - \delta_p)^2 + (t_N - b)^2}}$$

$$b = t_N - h / \text{tg} \gamma$$

Геометрия тракта охлаждения подлежит корректировке по условиям предельной скорости течения охладителя (см. выше) и окончательно представляется в табличном виде.

i	n_p	t	t_N	f	d_r	b
		мм	мм	м ²	мм	мм
1						
2						
⋮						
⋮						
N						

2. Расчёт тепловых потоков в камере.

Теплообмен между продуктами сгорания и стенкой камеры имеет комбинированный характер. Основную долю переноса теплоты составляет конвективный тепловой поток. Отличный от него по природе лучистый поток составляет 10...30% (иногда до 50%) от конвективного. Независимость этих процессов позволяет считать их аддитивными, а, следовательно, величину совокупного теплового потока в стенку определять их сложением.

2.1. Расчёт конвективных тепловых потоков.

Удельные конвективные потоки достаточно точно определяются согласно Ньютону-Рихману зависимостью:

$$q = \alpha (T_{\text{ог}} - T_{\text{ст г}}) = St \rho w (h_{\text{ог}} - h_{\text{ст г}})$$

где: α – коэффициент конвективной теплоотдачи; $St = \frac{\alpha}{\rho u c_p}$ – безразмерный коэффициент теплоотдачи, число Стантона; ρ – плотность потока; u – скорость потока; h – энтальпия потока.

Распределение безразмерного коэффициента теплоотдачи St по длине контура камеры находится решением уравнения энергии пограничного слоя в интегральных параметрах по методу В.М. Иевлева с учетом сжимаемости продуктов сгорания и переменности их свойств путем введения определяющих температур [1]. Пренебрежение процессами диссоциации – рекомбинации продуктов сгорания в пограничном слое частично может быть компенсировано

введением осредненного значения теплоемкости $c_{p \text{ ср}} = 0,5 (c_{p T_{\text{ог}}} + c_{p T_{\text{ст}}})$, определяемого для недиссоциированных продуктов, где: $c_{p T_{\text{ог}}}$ – теплоемкость при температуре торможения; $c_{p T_{\text{ст}}}$ – теплоемкость при температуре газа на стенке. Получаемые значения q несколько завышены по сравнению с реальными, что идет в запас расчета.

Посредством ряда эквивалентных преобразований и упрощений величина конвективного удельного теплового потока может быть выражена следующей приближенной алгебраической формулой:

$$q = B \frac{(1 - \beta^2) \varepsilon_p^{0,85}}{D^{1,82} d_{\text{кр}}^{0,15}} \cdot \frac{S}{Pr^{0,58}} \quad [\quad]$$

где: $B = 0,4842 \cdot \bar{\alpha} \cdot A \cdot \bar{Z}^{0,075}$, $A = 0,01352$ – эмпирическая константа в законе трения;

$$\beta = \lambda \cdot \sqrt{\frac{k-1}{k+1}}; \quad \lambda = w/w_{\text{кр}} \text{ – приведенная скорость течения продуктов сгорания;}$$

$$\bar{\alpha} = 1,813 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{0,85}{k-1}} \left(\frac{2k}{k+1} \right)^{0,425} - \text{слабая функция } k;$$

$$\bar{Z} = \left[\frac{1 - \beta^2 + \beta^2 \left(1 - 0,086 \frac{1 - \beta^2}{1 - \bar{T}_{\text{ст}} - 0,1\beta^2} \right)}{1 - \bar{T}_{\text{ст}} - 0,1\beta^2} \right]^{0,54} - \text{функция, слабо зависящая от } \beta \text{ и } \bar{T},$$

которая может быть принята постоянной по ее значению (максимальному) для параметров в критическом сечении;

ε – степень неизобаричности камеры сгорания, (при относительной площади камеры сгорания $\frac{F_{\text{кв}}}{F_{\text{кр}}} > 3,5$ принимается равной $\varepsilon = 1$);

Pr – число Прандтля, принимаемое для учебных задач равным $Pr = 0,75$;

S – функция термодинамических и теплофизических параметров продуктов сгорания:

$$S = \frac{2,065 c_{p \text{ ср}} (T_{\text{ог}} - T_{\text{ст.г}}) \mu_{\text{ог}}^{0,15}}{(R_{\text{ог}} T_{\text{ог}})^{0,425} (1 + \bar{T}_{\text{ст}})^{0,595} (3 + \bar{T}_{\text{ст}})^{0,15}} \quad [\quad]$$

$\mu_{\text{ог}}$, $R_{\text{ог}}$ – вязкость и газовая постоянная продуктов сгорания при температуре торможения газа в пристеночном слое $T_{\text{ог}}$;

$\bar{T}_{\text{ст}} = T_{\text{ст.г}} / T_{\text{ог}}$ – относительная температура стенки;

$T_{\text{ст.г}}$ – температура поверхности внутренней огневой стенки со стороны продуктов сгорания.

Значение коэффициента B для $\bar{T}_{\text{ст}} = 0,15 \dots 0,4$, что характерно для огневой стенки из медных сплавов, изменяется незначительно (на 1,5%), а для $\bar{T}_{\text{ст}} = 0,3 \dots 0,6$, что характерно для нержавеющей сталей, – на 2,5%, поэтому его можно рассчитать один раз по ориентировочной условной температуре стенки $T_{\text{ст.ул.}}$ и далее использовать во всех итерациях как постоянную величину без существенной потери точности.

Приведенная скорость λ может быть определена для каждого расчетного сечения достаточно точно путем неявного решения уравнения газодинамической функции

расходонапряженности $q_{(\lambda)} = \bar{D}^{-2} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$, или с помощью таблиц газодинамических функций [8].

Значения плотности удельного конвективного потока q для каждого расчетного сечения могут быть найдены только при известной температуре стенки $T_{\text{ст.г}}$, которая в свою очередь

является конечной целью расчета. Поэтому для реализации метода последовательных приближений значение $T_{ст.г}$ предварительно задается ориентировочно как условное значение $T_{ст.усл}$. Для огневой стенки из нержавеющей стали это значение рекомендуется принять $T_{ст.усл} = 1000\text{К}$ постоянным на всей длине камеры, для случая медных сплавов $T_{ст.усл} = 600\text{К}$, в окрестности этих значений и будут изменяться истинные значения $T_{ст.г}$. Для этих же значений $T_{ст.усл}$ определяется и $c_{р.ст}$ газа для последующего вычисления $c_{р.ср}$.

2.2. Расчет лучистых тепловых потоков.

Расчет лучистых тепловых потоков проводится по методике Л.Ф. Фролова, изложенной в [1]. В качестве базовой величины удельного лучистого теплового потока принимается тепловой поток, излучаемый ядром потока в камере сгорания в условиях, когда собственным излучением огневой стенки можно пренебречь, этим условиям соответствует расчетное выражение

$$q_{л.км} = \varepsilon_{ст.эф} \cdot \varepsilon_{г} \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 ;$$

где: $\varepsilon_{ст.эф} = \frac{(\varepsilon_{ст} + 1)}{2}$ – приближенная поправка на поглощение газом собственного излучения, отраженного от стенки (для стенки камеры сгорания, умеренно загрязненной сажей обычно принимаются степень черноты $\varepsilon_{ст} = 0,8$); $\varepsilon_{г}$ – излучательная способность газа (собственное излучение 3^x атомных компонентов продуктов сгорания); $c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Излучательная способность газа определяется суммой излучательных способностей водяного пара H_2O и углекислого газа CO_2 с поправкой на взаимное поглощение: $\varepsilon_{г} = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{CO}_2} - \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \varepsilon_{\text{CO}_2}$. Излучательная способность отдельных газов определяется по экспериментальным номограммам, представленным в [1], в функциях от температуры. В качестве параметров используются эквивалентная длина хода лучей l_3 и парциальное давление p_i или парциальная плотность ρ_i соответствующих газов. Эквивалентная длина l_3 для цилиндрических камер сгорания длиной $l_{ц}$ определяется согласно данным таблицы:

Таблица 2. Значения относительной эквивалентной длины хода луча в цилиндрических камерах

$l_{ц}/D$	1	1,5	2,5	4
l_3/D	0,6	0,75	0,85	0,9

Парциальные давления газов находятся термодинамическим расчетом для параметров камеры сгорания при Km или (α) в ядре потока. Парциальные плотности газов можно рассчитать по уравнению состояния:

$$\rho_i = \frac{P_i}{R_i \cdot T_k}, \text{ где: } R_i = \frac{8314}{\mu_i}$$

Действительный результирующий лучистый поток, воспринимаемый огневой стенкой, уменьшается из-за частичного поглощения излучения в относительно холодном пристеночном слое, что учитывается поправкой φ в зависимости от массовой доли расхода топлива, приходящейся на пристеночный слой $\bar{m}_{ст} = m_{ст} / m_T$ согласно рекомендаций:

$$\begin{aligned} \text{при: } \bar{m}_{ст} = 20 \dots 15\% & \quad \varphi = 0,6 \dots 0,7 \\ \bar{m}_{ст} = 15 \dots 10\% & \quad \varphi = 0,7 \dots 0,8 \\ \bar{m}_{ст} = < 5\% & \quad \varphi = 0,9 \dots 0,95 \end{aligned}$$

На основе базовой величины – плотности лучистого теплового потока в камере сгорания $q_{л.к.с} = \varphi \cdot q_{л.Кт}$ устанавливается приближенная схема распределения $q_{л}$ по длине камеры:

- непосредственно в сечении головки $q_{л} = 0,25 \cdot q_{л.к.с}$
- начиная с расстояния 50...100мм от головки до сечения $\bar{D} = 1,2$ в дозвуковой части сопла $q_{л} = q_{л.к.с}$
- далее в докритической части сопла $q_{л} = q_{л.к.с} \cdot \left(1 - 12,5 \cdot (1,2 - \bar{D}_t)^2\right)$
- в критическом сечении $q_{л} = 0,5 \cdot q_{л.к.с}$
- в закритической части сопла $q_{л} = 0,5 \cdot q_{л.к.с} / \bar{D}_t^2$

Текущие результаты расчета представляются в виде таблицы.

i	x	λ	β	S	$\bar{T}_{ст}$	$q \cdot 10^{-6}$	$q_{л} \cdot 10^{-6}$	$q_{г} \cdot 10^{-6}$
	м	—	—	$\frac{\text{кг}^{0,15} \cdot \text{м} \cdot \text{К}^{0,105}}{\text{с}^{1,3}}$	—	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²
1								
2								
.								
.								
.								
N								

Рассчитанные значения суммарного теплового потока $q_{г} = q + q_{л}$, его конвективной q и лучистой $q_{л}$ составляющих представляются также в виде графика в координатах x и i .

3. Расчет теплоотдачи в тракте охлаждения.

Этот этап расчета состоит в определении охлаждающей способности тракта охлаждения при выбранных условных значениях $T_{ст\Gamma} = T_{ст\text{ усл}}$ и рассчитанных по этим условиям плотностях теплового потока. Этап содержит ряд расчетных процедур.

3.1. Расчёт распределения температуры охладителя по длине тракта.

Температура охладителя в расчетном сечении тракта охлаждения определяется по ее изменению на участке Δx при известных значениях теплового потока в сечениях, ограничивающих этот участок. Так при подаче охладителя противотоком к течению продуктов сгорания подогрев охладителя на i -том участке составит:

$$\Delta T_i = T_i - T_{i+1} = \frac{0,5 \cdot (q_{\Gamma i} + q_{\Gamma(i+1)}) \cdot \Delta S_i}{m_{\text{охл}} \cdot c_{\text{р охл } i}}$$

где: $c_{\text{р.охл.}i}$ – теплоемкость охладителя при $T_{\text{охл}}$ равной средней его температуре на участке подогрева:

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

Температура охладителя на входе в расчетный участок берется из расчета предыдущего участка.

Поскольку средняя теплоёмкость на участке не известна, ее находят методом последовательных приближений, задавая начальным приближением $\Delta T_i'$ и выполняя расчеты по следующему циклическому алгоритму.

Определяется средняя температура первого приближения $T_{\text{ср } i}' = T_{i+1} + 0,5 \cdot \Delta T_i'$, для температуры $T_{\text{ср } i}'$ определяется $c_{\text{р.охл}}'$, например, по таблицам, в первом приближении. Затем рассчитывается подогрев второго приближения $\Delta T_i'' = 0,5 \cdot (q_{\Gamma i} + q_{\Gamma(i+1)}) \cdot \Delta S_i / \left(m_{\text{охл}} \cdot c_{\text{р охл } i}' \right)$.

Далее определяется средняя температура охладителя во втором приближении $T_{\text{ср } i}'' = T_{i+1} + 0,5 \cdot \Delta T_i''$, по которой определяется значение $c_{\text{р.охл}}''$ второго приближения. Если разность $\Delta c_{\text{р ср}} = \left(c_{\text{р охл}}'' - c_{\text{р охл}}' \right) / c_{\text{р охл}}' > 5\%$ цикл продолжается, если меньше, то последнее значение ΔT_i принимается в качестве истинного и по нему определяется температура охладителя на выходе из участка $T_i = T_{i+1} + \Delta T_i$.

Так последовательно от участка ввода до участка выхода охладителя из тракта охлаждения находится температура охладителя в расчетных сечениях и суммарный подогрев охладителя в тракте. Температура охладителя на входе в тракт охлаждения устанавливается в соответствии со схемой двигателя и условиями эксплуатации. Температуру охладителя на выходе из тракта необходимо сравнить с допустимой температурой $T_{\text{охл.доп}}$. Если полученная температура меньше допустимой – охладитель работоспособен, если больше – необходимо принять меры по снижению тепловых потоков, например, за счет выполнения локальной завесы или термостойких изоляционных покрытий и др. Расчетные значения температуры охладителя используются для определения значений свойств охладителя и последующего расчета коэффициента теплоотдачи.

3.2. Расчёт коэффициента теплоотдачи.

Теплообмен в тракте охлаждения имеет конвективную природу, так как лучистый поток пренебрежимо мал (ввиду относительно низких значений температуры стенки) и описывается с достаточной точностью критериальной зависимостью Нуссельта-Крауссольда:

$$\text{Nu} = 0,023 \cdot \text{Re}_f^{0,8} \cdot \text{Pr}_f^{0,4}$$

которая приводится к виду, удобному для расчетов:

$$\alpha_{\text{охл}} = \frac{0,023 \cdot K \cdot (\rho \cdot u)^{0,8}}{d_r^{0,2}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}},$$

где: $(\rho \cdot u) = \frac{\dot{m}_{\text{охл}}}{f}$ – массовая скорость охладителя, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}$; $K = \lambda^{0,6} \cdot \left(\frac{c_{\text{р охл}}}{\mu} \right)^{0,4}$, $\frac{\text{кг}^{0,2} \text{М}^{1,8}}{\text{с}^{2,2} \text{К}}$ –

комплекс теплофизических свойств охладителя, определяемых по среднemasсовой температуре охладителя в сечении.

Комплекс K , как и входящие в него свойства охладителя, зависят для капельных жидкостей от температуры, а для газообразных (газифицированных) охладителей и от давления. Для учета последнего можно принять линейную аппроксимацию текущего давления в тракте от давлений на входе и выходе из тракта, исходя из возможных предельных потерь в тракте. Значение плотности газообразного охладителя может быть рассчитано по уравнению состояния $\rho = \frac{p}{(RT)}$, а величина скорости из уравнения $u = (\rho \cdot u) / \rho$.

3.3. Расчет коэффициента оребрения.

Эффект интенсификации теплосъёма за счет развития охлаждающей поверхности учитывается коэффициентом эффективности оребрения η_p при коэффициенте конвективной теплоотдачи и может быть рассчитан по формуле:

$$\eta_p = 1 + \frac{1}{\cos\beta} \left(2 \cdot \frac{h_p}{t} \cdot E \cdot \xi_p - \frac{\delta_p}{t} \right),$$

где: E – коэффициент эффективности работы одиночного прямого ребра (КПД ребра);

ξ_p – поправочный коэффициент на участие в теплоотдаче наружной стенки.

Учитывая низкую эффективность участия в теплообмене наружной стенки, особенно для стальных ребер, можно принять $\xi_p = 1$.

КПД ребра определяется по классической теории [9]:

$$E(\psi) = \frac{th\psi}{\psi}$$

где: $\psi = \frac{h_p}{\delta_p} \sqrt{2Bi}$ – теплогеометрический аргумент (фактор);

$Bi = \alpha/(\lambda/\delta_p)$ – критериальное число Био – соотношение конвективной теплоотдачи и теплопроводности материала ребра.

Характер поведения функции E в зависимости от аргумента, представленный на рис. 4, демонстрирует ухудшение эффективности ребра за пределами значения аргумента

$\left(\frac{h_p}{\delta_p} \cdot \sqrt{2 \cdot Bi} \right) > 3$, что свойственно высоким, тонким и низкотеплопроводным ребрам, а так же

высоким значениям $\alpha_{охл}$. Варьируя параметрами тракта можно достигать наилучшего эффекта оребрения. Формулы справедливы как для фрезерованных ребер, так и для гофрированных проставок. В последнем случае шаг ребер равен половине шага гофра.

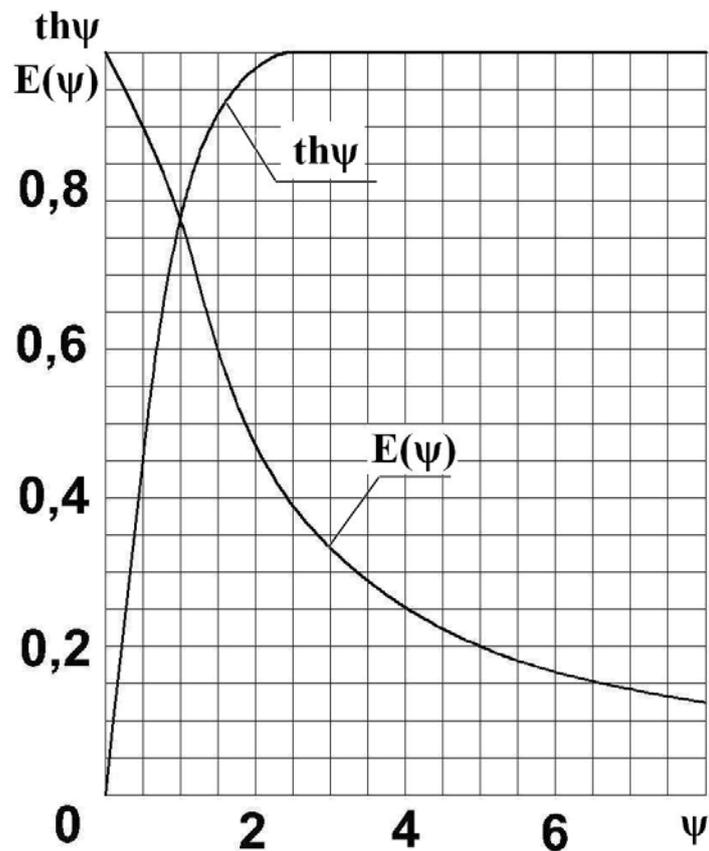


Рис. 4
Показатель эффективности работы прямого ребра
 $E = th\psi/\psi$

Теплопроводность материала ребра можно удовлетворительно оценить по средней температуре охладителя и стенки. Результат расчета теплоотдачи сводится в таблицу.

i сеч.	$T_{\text{охл}}$	$\Delta \bar{c}_p$	$c_{p,\text{охл}}$	$\lambda_{\text{охл}}$	$\mu_{\text{охл}}$	$K_{\text{охл}}$	$\rho_{\text{охл}}$	$u_{\text{охл}}$	$\alpha_{\text{охл}}$	E	η_p
	К	%	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$(\text{Па} \cdot \text{с}) \cdot 10^4$	$\frac{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8}}{\text{с}^{2,2} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10^{-3}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \cdot 10^{-3}$	-	-
1											
2											
.											
.											
.											
N											

На основании данных о коэффициенте теплоотдачи $\alpha_{\text{охл}}$ можно определить воспринимаемые охладителем удельные тепловые потоки $q_{\text{охл}}$, по формуле Ньютона-Рихмана и сравнить их с тепловыми потоками со стороны газа $q_{\text{г}}$.

4. Определение температурного состояния стенки.

4.1. Условия баланса процесса теплообмена в проточной системе охлаждения.

Условием баланса стационарного процесса охлаждения стенки камеры является равенство тепловых потоков, воспринятых стенкой из камеры и отданных стенкой охладителю в тракт охлаждения. При малой кривизне стенки, когда площади наружной и внутренней поверхностей огневой стенки можно считать одинаковыми, этим условием будет: $q_{\Gamma} = q_{\text{охл}}$. Поскольку принято, что лучистая составляющая суммарного потока практически не зависит от $T_{\text{ст}}$, сравнение удельных тепловых потоков проводится по их конвективной составляющей, отнесенной к ее значению при условной температуре стенки ($T_{\text{усл}} = 1000$ для стали; $T_{\text{усл}} = 600$ для медных сплавов). Тогда условием баланса тепловых потоков при прочих равных условиях на стационарном режиме работы будет выражение:

$$\frac{q}{q_{T_{\text{усл}}}} = \frac{(q_{\text{охл}} - q_{\text{л}})}{q_{T_{\text{усл}}}}, \text{ или после преобразований: } \frac{T_{\text{ог}} - T_{\text{ст.г}}}{T_{\text{ог}} - T_{\text{усл}}} = \frac{1}{q_{T_{\text{усл}}}} \left(\frac{T_{\text{ст.г}} - T_{\text{охл}}}{(\delta_{\text{ст}}/\lambda_{\text{ст}}) + 1/(\alpha_{\text{охл}} \eta_{\text{п}})} - q_{\text{л}} \right),$$

которое может быть решено относительно единственного неизвестного $T_{\text{ст.г}}$. Решение иллюстрируется графически как координата точка пересечения графиков двух линейных функций, описываемых левой и правой частями уравнения баланса при переменном значении общего аргумента $T_{\text{ст.г}}$ и параметрически изменяющихся условиях в сечениях на стороне охладителя (рис. 5).

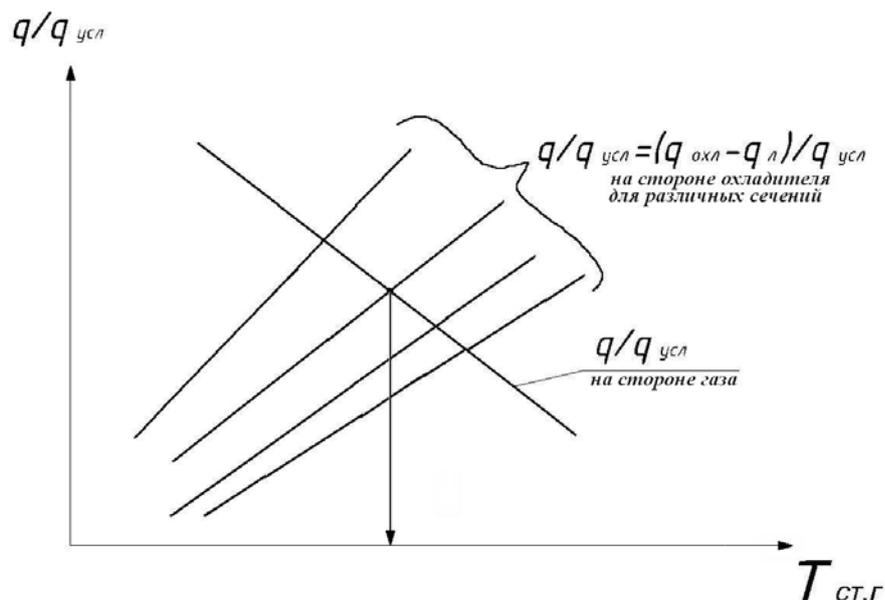


Рис. 5

Графический способ расчёта действительной температуры огневой стенки со стороны газа $T_{\text{ст.г}}$

4.2. Расчет $T_{ст.г}$ первого приближения.

Решение получается также аналитически из балансового уравнения, разрешаемого относительно искомой величины $T_{ст.г}$, в виде:

$$T_{ст.г} = \frac{\frac{T_{ог}}{T_{ог} - T_{усл}} + \frac{T_{охл}}{\left[(\delta_{ст}/\lambda_{ст}) + 1/(\alpha_{охл} \cdot \eta_p) \right] q_{T_{усл}}} + \frac{q_L}{q_{T_{усл}}}}{\frac{1}{(T_{ог} - T_{усл})} + \frac{1}{\left[(\delta_{ст}/\lambda_{ст}) + 1/(\alpha_{охл} \cdot \eta_p) \right] q_{T_{усл}}}}$$

Результаты расчёта $T_{ст.г}$ представляются в табличном виде в координатах i и x .

i	1	2	.	.	N
x					
$T_{ст.г}$					

По этой формуле вычисляется температура огневой стенки в первом приближении, так как в ней используются параметры охладителя, рассчитанные по условной температуре стенки. Теплопроводность материала стенки определяется по среднему значению температур горячей (со стороны продуктов сгорания) и холодной (со стороны охладителя) поверхностей огневой стенки. Поскольку температура на холодной стороне стенки на этом этапе расчета не известна, рекомендуется без существенной потери точности принимать значение коэффициента теплопроводности $\lambda_{ст}$, соответствующим температуре $T_{ст.усл}$

Полученные значения $T_{ст.г}$ являются результатами первого приближения, точность которых, однако, достаточна для оценки работоспособности СПО. Так, если на всех участках камеры $T_{ст.г}$ окажется меньше предельно допустимой $T_{ст.г.доп.}$, то работоспособность системы обеспечена удовлетворительно и можно уточнять полученные результаты. Если нет – необходимо принять специальные меры теплозащиты, например, ввести локальную завесу в зоне перегрева.

4.3. Расчет $T_{ст.г}$ при наличии локальной завесы.

Локальная завеса начинается от ближайшего сечения камеры N_3 предшествующего сечению с недопустимо высоким значением $T_{ст.г}$. Обычно завеса создается малой частью расхода охладителя, подаваемой из охлаждающего тракта и, как правило, это горючее. Доля расхода на завесу устанавливается относительно суммарного расхода топлива в диапазоне

$\frac{\dot{m}_3}{m_3} = \frac{\dot{m}_3}{m_3} = 0,5...2\%$, с тем, чтобы обеспечить требуемое тепловое состояние стенки камеры и не потерять значительно в ее удельном импульсе. В пристеночном слое с завесой формируется сложная картина процесса сопряженного тепло-и массообмена, которая условно описывается 2^х-зонной моделью, состоящей из 1-ой – зоны перехода жидкой пленки в газообразное состояние (между сечениями N_3 и N_1) и 2-ой зоны – зоны перемешивания газифицированного вещества завесы с пристеночным слоем, которая начинается от сечения $N_{1ж}$ (рис. 6).

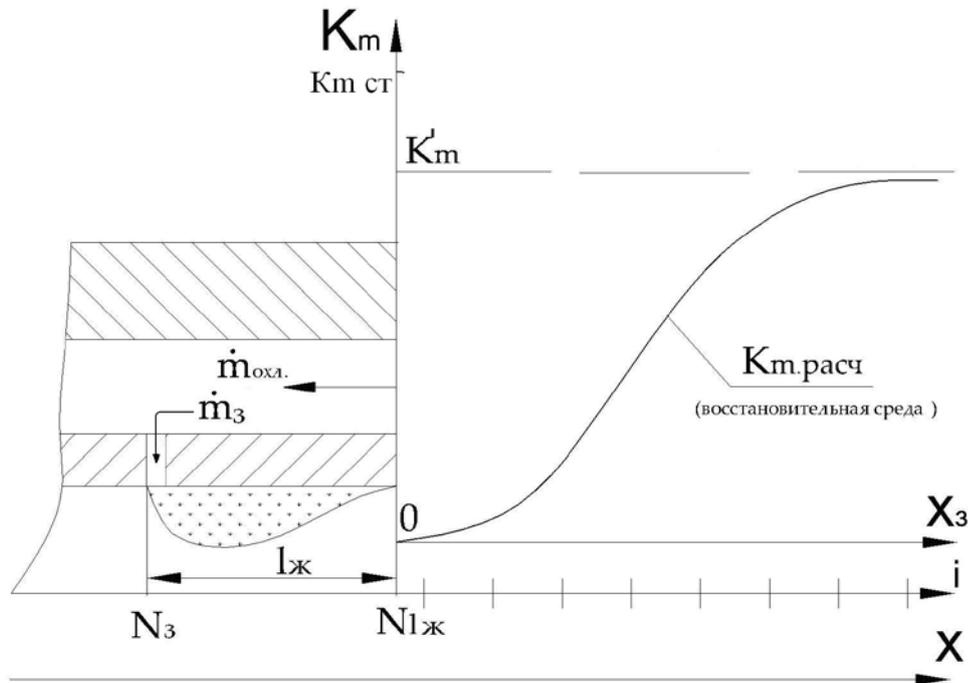


Рис. 6

Расчётная схема определения параметров локальной завесы

В первой зоне на длине $l_{ж}$ охлаждающая жидкость омывает огневую поверхность камеры, пропуская лучистый поток неизменным и блокируя полностью конвективный тепловой поток. В этой зоне пленка жидкости разрушается под действием конвективных тепловых потоков и гидродинамических сил, учитываемых коэффициентом «разбрызгивания». Тепловое разрушение пленки осуществляется либо за счет фазовых превращений (испарение) или разложения при давлениях ниже критического, либо за счет экстремально интенсивной объемной газификации (квазикипение) жидкого охладителя в процессе нагрева при переходе области критической температуры при закритических давлениях. Длина этого участка завесы $l_{ж}$ определяется из балансового соотношения между поступившем в пленку тепловым конвективным потоком и поглощенной теплотой на прогрев и деструкцию (разрушение) пленки и в общем случае рассчитывается по формуле:

$$l_{ж} = \eta_3 \frac{\dot{m}_3}{\pi D} \left[\frac{c_{3\text{cp}} (T_s - T_H)}{\alpha_r (T_{ог} - T_s)} + \frac{Q}{\alpha_r (T_{ог} - T_s)} \right],$$

где: $c_{з\text{ ср}}$ – теплоемкость жидкости завесы при средней температуре $T_{\text{ср}} = 0,5 (T_{\text{н}} + T_{\text{с}})$;

$T_{\text{н}}$ – начальная температура завесы;

$T_{\text{с}}$ – температура деструкции (испарения, разложения или газификации) вещества завесы;

$\alpha_{\text{г}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи со стороны газа;

Q – теплота фазового превращения (кипения или разложения) вещества завесы;

η_3 – коэффициент устойчивости жидкой пленки, $\eta_3 < 1$.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{г}}$ можно оценить по формуле:

$$\alpha_{\text{г}} = q / (T_{\text{ог}} - T_{\text{ст г}}),$$

где: q – удельный конвективный тепловой поток, вычисленный без учета завесы;

$T_{\text{ст г}}$ – принимается, как и ранее в виде условной температуры стенки $T_{\text{усл}}$.

В случае закритического давления в камере Q приравнивается нулю, а в качестве $T_{\text{с}}$ рекомендуется принимать критическую температуру вещества – $T_{\text{кр}}$, в окрестности которой происходит экстремально интенсивная газификация (квазикипение). Коэффициент η_3 берется из графика (рис. 7) в зависимости от режима течения жидкой пленки – числа $Re_3 = \dot{m}_3 / (\pi D \mu_{\text{охл.3}})$.

Конец этого участка $l_{\text{ж}}$ помещается в ближайшее предшествующее сечение $N_{\text{лж}}$ камеры.

Во второй зоне завесы происходит перемешивание газифицированных продуктов локальной завесы с пристеночным слоем до полного их перемешивания на большом удалении от сечения $N_{\text{лж}}$, с новым установившимся соотношением компонентов K'_m пристеночного слоя равным значению:

$$K'_m = K_{m\text{ ст}} / \left[1 + (K_{m\text{ ст}} + 1) \bar{m}_3 / \bar{m}_{\text{ст}} \right],$$

где: $K_{m\text{ ст}}$ – значение соотношения компонентов в пристеночном слое в отсутствии завесы;

$\bar{m}_{\text{ст}} = \dot{m}_{\text{ст}} / \dot{m}_{\text{г}}$ – относительный расход топлива в пристеночном слое (без учета локальной завесы);

$\dot{m}_{\text{г}}$ – полный расход топлива через камеру, включая расходы компонентов в пристеночный слой и в локальные завесы.

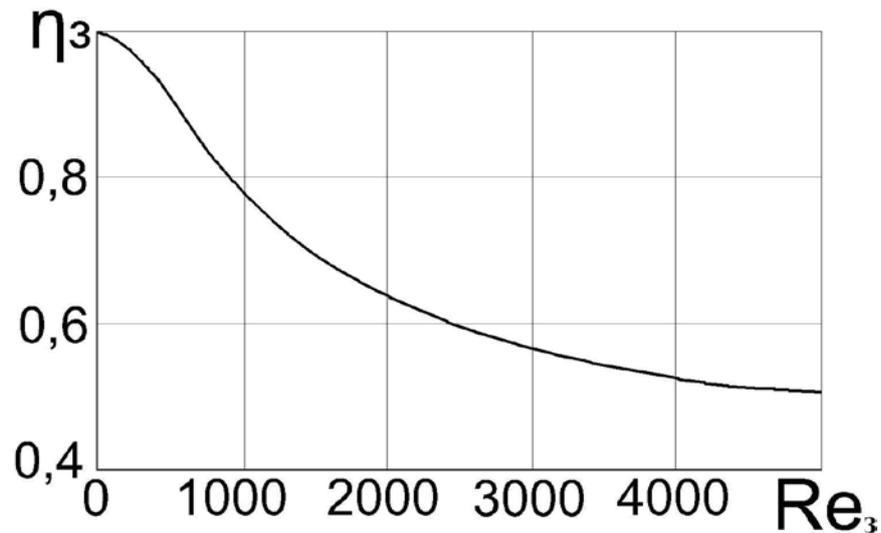


Рис. 7

График зависимости коэффициента устойчивости жидкой плёнки от числа Рейнольдса

Относительный расход топлива в пристеночном слое определяется с одной стороны номинальным значением $K_{m\text{ ст}}$, обеспечивающим требуемую температуру ($T_{\text{ог}} \approx 2000\text{К}$), а с другой стороны – компоновкой форсунок при проектировании форсуночной головки с соблюдением равномерного распределения расходонапряженности по сечению камеры. При отсутствии данных о компоновке форсунок рекомендуется принимать:

- для камер больших тяг ($P_{\text{п}} > 10 \text{ тс}$) $\bar{m}_{\text{ст}} = 2...5\%$;
- для камер средних тяг ($0,16 \text{ т.с} \leq P \leq 10 \text{ т.с}$) $\bar{m}_{\text{ст}} = 5...10\%$
- для камер малых тяг ($P_{\text{п}} < 0,16 \text{ т.с}$) $\bar{m}_{\text{ст}} = 10...15(20)\%$.

Изменение расчетного соотношения компонентов $K_{m \text{ расч.}}$ вдоль стенки камеры от $K_m = 0$ (для восстановительной завесы в окрестности стенки окислитель полностью отсутствует) до K'_m происходит экспоненциально и приблизительно описывается соотношением

$$K_{m \text{ расч.}} = K'_m \left(1 - e^{-M \bar{x}_3} \right),$$

где: $M = K \cdot \bar{m}_{\text{ст}} / \bar{m}_3$ – фактор интенсивности перемешивания;

K – эмпирический коэффициент, характеризующий интенсивность турбулентности а, следовательно, и скорость изменения $K_{m \text{ расч.}}$ в пристеночном слое, принимающий значения $K \approx (0,05...0,20)10^{-2}$;

$\bar{x}_3 = x_3 / H_{\text{ст}}$ – вспомогательная относительная координата контура камеры в зоне перемешивания, отсчитываемая от конца участка жидкой пленки $l_{\text{ж}}$ ($x_3 = 0$);

$H_{ст}$ – толщина пристеночного слоя, которая может быть принята условно равной 15...20мм.

Расчет конвективных тепловых потоков на участке перемешивания осуществляется по формуле пересчета:

$$q_3 = q \cdot S_3/S,$$

где: q и S – ранее вычисленные значения соответственно конвективных потоков и функции теплофизических параметров без наличия завесы при $T_{ст.г} = T_{усл}$.

Для расчета комплекса теплофизических параметров S_3 в зоне перемешивания завесы и пристеночного слоя используются параметры ПС, соответствующие значениям K_m рас. в расчетных сечениях: $T_{0г}$, $C_{p0г}$, $C_{p\text{ см}}$, $\mu_{0г}$, $R_{0г}$. Они могут быть получены термодинамическим расчетом, например, по программе «Астра».

Надо иметь в виду, что термодинамический расчет состояния большинства газообразных продуктов в зоне малых значений α , в том числе с использованием программного комплекса «Астра», сопряжен с определенными проблемами, обусловленными спецификой неопределенности состава веществ и скоростей их превращений. Поэтому приходится принимать ряд дополнительных упрощающих условий, касающихся конкретизации их состояния. Поскольку в принятой условной двухзонной модели завесы уже заложена некоторая неопределенность состояния газифицированного вещества и, очевидно, что в этом случае конвективные тепловые потоки будут явно ниже, чем при отсутствии завесы, то без существенных потерь точности расчет можно начинать с сечения, где состояние перемешиваемых продуктов считается достаточно определенным, т.е. в области $\alpha = 0,15 \dots 0,20$, если при этом не образуется твердая фаза.

Таким образом, для участка камеры от смесительной головки до сечения ввода завесы N_3 используются значения конвективных потоков, рассчитанные без учета завесы; на участке разрушения жидкой пленки от сечения N_3 до сечения $N_{лж}$ конвективные потоки равны нулю, а $q_r = q_l$; на участке перемешивания от сечения, где $\alpha \approx 0,2$, и далее вплоть до среза сопла конвективные потоки q определяются по формуле пересчета, а от сечения $N_{лж}$ до N , где $\alpha \approx 0,2$, конвективные потоки растут от нуля линейно.

Полученные расчетные данные с учетом завесы представляются в форме таблицы:

i	K_m расч	$\alpha_{ст}$	$T_{0г}$	$c_{p.0г}$	$c_{p.ср}$	$\mu_{0г}$	$R_{0г}$	S_3	q
	–	–	К	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\text{Па} \cdot \text{с} \cdot 10^4$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кг}^{0,15} \cdot \text{м} \cdot \text{К}^{0,105}}{\text{с}^{1,3}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot 10^{-6}$
1									
2									
·									
·									
·									
N									

Если для образования завесы в сечении N_3 подается газообразный компонент, то $l_{ж} = 0$ и расчет тепловых потоков с учетом влияния завесы начинается с сечения N_3 .

Для рассчитанных с учетом завесы значений q'_i рассчитываются последовательно подогрев охладителя, его свойства и коэффициент теплоотдачи в тракте согласно п.п.3.1, 3.2, 3.3. Далее по п.п. 4.2 рассчитывается $T_{ст.г}$ первого приближения с учетом завесы. Если значения $T_{ст.г}$ находятся в диапазон допустимых значений, то можно далее уточнять температурное состояние стенки, если нет – изменить параметры завесы, например, увеличив расход идущего на ее образование компонента. В области наличия жидкой пленки, включая крайние сечения, где конвективные потоки формально обнуляются, температура стенки $T_{ст.г}$ принимается равной $T_{усл.}$.

Результаты первого приближения с учетом завесы сводятся в таблицу:

i	q'	q_g	$T_{охл}$	$\overline{\Delta C}_{р\ охл}$	K	$\alpha_{охл}$	$T'_{ст.г}$	$\overline{T}_{ст}$
	$\frac{Вт}{м^2} \cdot 10^{-6}$	$\frac{Вт}{м^2}$	$\frac{T_{охл}}{К}$	%	$\frac{кг^{0.2} \cdot м^{1.8}}{с^{2.2} \cdot К}$	$\frac{В}{м^2 К}$	К	–
1								
2								
·								
·								
·								
N								

4.4. Определение $T_{ст.г}$ второго приближения.

Необходимость уточнения значения температуры горячей поверхности огневой стенки $T_{ст.г}$ обуславливается тем, что при ее расчете в первом приближении использовались данные о q , $T_{охл}$, $\alpha_{охл}$, полученные на основании условно введенной температуры стенки $T_{усл.}$, которая может существенно отличаться от действительного значения. При втором приближении расчет конвективных тепловых потоков ведется по формуле пересчета ранее полученных значений первого приближения, в т.ч. с учетом завесы и уточненных значений температуры стенки:

$$q'' = q' \cdot S'' / S',$$

где: q' и S' – значения первого приближения.

Для расчета S'' используются результаты первого приближения, с учетом завесы т.е. текущие значения

$$c'_{р.сп}, \mu'_{ог}, R'_{ог}, T'_{ст.г}.$$

Как правило, изменение значений $T_{охл}$ не существенно сказываются на расчете $\alpha_{охл}$ и η_r , поэтому при расчете $T'_{ст.г}$ их можно не пересчитывать, ограничиваясь уточнением $T_{охл}$ и

[Оглавление](#)

заменой $T_{\text{усл}}$ на текущие значения первого приближения $T'_{\text{ст.г}}$, а $q_{T_{\text{усл}}}$ на q' . Второго приближения обычно бывает достаточно для нахождения действительной температуры стенки со стороны газа с погрешностью не хуже 2%.

4.5. Определение $T_{\text{ст.охл}}$

Температура стенки со стороны охладителя определяется для контроля состояния охладителя и рассчитывается после расчета действительной температуры $T_{\text{ст.г}}$ по формуле:

$$T_{\text{ст.охл}} = T_{\text{ст.г}} - (\delta_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ст}}) q_{\text{г}}$$

Коэффициент теплопроводности материала огневой стенки $\lambda_{\text{ст}}$ [10] определяется по среднему значению температуры горячей и холодной поверхностей стенки методом последовательных приближений на сходимость λ с погрешностью не хуже 5%. Полученные значения $T_{\text{ст.охл}}$ не должны превышать допустимое значение $T_{\text{ст.охл.доп.}}$, которое находится, как уже говорилось, из условий обеспечения работоспособности СПО. В случае если $T_{\text{ст.охл}}$ превышает допустимые значения хотя бы в одном сечении, необходимо принять дополнительные меры: выбрать другой материал или уменьшить толщину стенки или увеличить расходы на образование локальной завесы или другие меры, ведущие к понижению $T_{\text{ст.охл}}$ до допустимого значения.

Текущие результаты данного этапа сводятся в заключительную таблицу температурного состояния СПО:

i	x	S''	q''	$q''_{\text{г}}$	$T''_{\text{охл}}$	$T''_{\text{ст.г}}$	$T_{\text{ст.охл}}$
	м	$\frac{\text{кг}^{0,15} \cdot \text{м} \cdot \text{К}^{0,105}}{\text{с}^{1,3}}$	Вт/м ²	Вт/м ²	К	К	К
1							
2							
.							
.							
.							
N							

На основании окончательных табличных данных строятся графики распределения q , $q_{\text{г}}$, $T_{\text{охл}}$, $T_{\text{ст.г}}$, $T_{\text{ст.охл}}$ по длине камеры в координатах x и i .

5. Расчет потерь давления охладителя в тракте охлаждения.

Расчет снижения давления охладителя, т.е. гидравлических потерь в тракте охлаждения ведется приближенно с учетом только потерь на трение, составляющих, как правило, до 80...90% от суммарных потерь по апробированной типовой методике. Потери на трение при

движении несжимаемой жидкости с постоянными свойствами по трубам и каналам большой длины с постоянным сечением определяются по формуле:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho u^2}{2} \cdot \frac{\ell}{d_r}$$

где: ξ – коэффициент гидравлического сопротивления;
 ℓ – длина канала.

В принятых допущениях ξ в общем случае является функцией режима течения охладителя, характеризуемого числом Рейнольдса Re , и параметров (характеристик) шероховатости стенки (рис. 8). Различают три области режимов течения:

- а) режим ламинарного течения в гладкой трубе, $Re < Re_{кр} \approx 3500$;
- б) режим автомодельного течения в шероховатых трубах, когда значение Re не влияет на ξ ;
- в) переходный режим совместного влияния шероховатости стенки и числа Re , границей которого является кривая $Re_{гр} = \frac{560}{\Delta}$.

которого является кривая $Re_{гр} = \frac{560}{\Delta}$.

В таблице 3 приводятся рекомендуемые формулы для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления. Здесь $\bar{\Delta} = \Delta/d_r$ – относительная шероховатость стенки; Δ – абсолютная геометрическая шероховатость – средняя высота выступов (бугорков) шероховатости; ω – поправочный коэффициент, учитывающий форму канала.

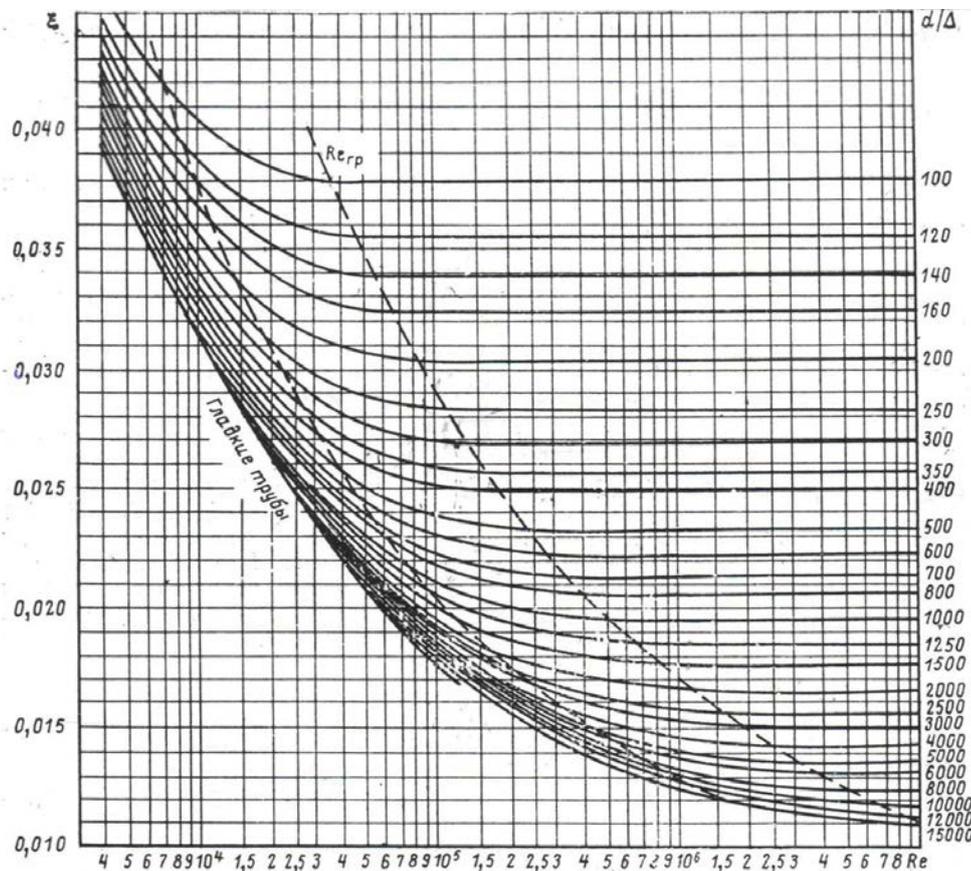


Рис. 8

[Оглавление](#)

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса и шероховатости поверхности

Таблица 3. Формулы для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления ξ

$Re < Re_{кр}$ $Re_{кр} = 3500$	$Re_{кр} < Re < \frac{560}{\Delta}$ $Re_{кр} = 3500$	$Re \geq \frac{560}{\Delta}$
$\xi = \frac{64 \cdot \omega}{Re}$	<p>В диапазоне</p> $0.01 \leq \bar{\Delta} \leq 0.6001$ $\xi = 0.1 \cdot \left(1.46 \cdot \bar{\Delta} + \frac{100}{Re} \right)^{0.25} \cdot \omega$ <p>В диапазоне</p> $0.0001 \leq \bar{\Delta} \leq 0.01$ $\xi = \frac{1,42 \cdot \omega}{\left[\lg \left(\frac{Re}{\bar{\Delta}} \right) \right]^2}$	$\xi = \frac{\omega}{\left[2 \cdot \lg \left(\frac{3,7}{\bar{\Delta}} \right) \right]^2}$

В расчетах можно принимать следующие абсолютные размеры шероховатости Δ поверхностей в трактах охлаждения ЖРД:

- стальная стенка ... 0,02...0,10 мм;
- стенка из меди и медных сплавов ... 0,0015...0,01 мм.

Расчеты ведутся по средне-арифметическим значениям переменных на расчетном участке. Для прямого канала круглого сечения принимается $\omega = 1$, для щелевого канала $\omega = 1,5$, для прямоугольных каналов со сторонами a/b , к которым могут быть приведены сечения межреберных каналов, значения ω представлены ниже в таблице 3. Для винтовых каналов $\omega = (1,0...3,5) d_r/d_b$, где d_b – средний диаметр кривизны винтовой линии. Ввиду обычно малых углов закрутки ребер ($\beta = 10...20$) эту поправку на закрутку можно не учитывать.

Таблица 4. Значения поправочного коэффициента на форму прямоугольного канала

a/b	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0
ω	1.5	1.32	1.25	1.10	1.03	0.97	0.91	0.90

Длина текущего участка гидравлического тракта определяется с учетом назначенного угла закрутки ребер β

$$\ell = \Delta x_s \cdot \frac{1}{\cos\beta}.$$

Результаты расчета потерь давления в тракте сводятся в таблицу:

$i_{\text{уч}}$	Re	$\bar{\Delta}$	$\text{Re}_{\text{гп}} = \frac{560}{\bar{\Delta}}$	ξ	ℓ	Δp
	–	–	–	–	м	МПа
1						
2						
⋮						
⋮						
⋮						
N						

Суммарные потери определяются по формулам:

$$\Delta p_{\Sigma} = \sum_1^{N_{\text{уч}}} \Delta p_i ; \quad \bar{\Delta p} = \frac{\Delta p_{\Sigma}}{p_{\text{охл}}} \cdot 100\%$$

При условии $\bar{\Delta p} < 20\%$ гидравлические потери обычно считаются приемлемыми, если это требование не выполняется, то следует уменьшить скорость течения охладителя по тракту охлаждения, например, увеличив высоту ребер или уменьшив угол их закрутки.

6. Заключение

По результатам проведенного расчета охлаждения камеры делаются выводы о её работоспособности с позиций оценки выполняемости установленных ограничений. Кроме того, предлагаются рекомендации по усовершенствованию исследованной СПО и введению целесообразных изменений.

7. Основные требования к отчетности.

Отчет по выполненному домашнему заданию представляется в печатном виде на листах А4 с титульным листом и оглавлением по образцам, приведенным в Приложениях 3 и 4. К отчету прилагаются результаты термодинамических расчетов.

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

Перечень вопросов к защите:

1. Из каких соображений назначается $T_{ог}$; определяющий фактор выбора $T_{ог}$?
2. Из каких соображений назначается $T_{ст.усл.}$?
3. Чем определяется выбор высоты тракта охлаждения?
4. Чем лимитируется величина шага оребрения?
5. Каковы механизмы повышения степени теплозащиты стенки при локальной завесе?
6. На основании каких условий находится действительная температура $T_{ст.г}$?
7. Что такое формула пересчета?
8. Каков характер влияния скорости охлаждения на теплоотдачу и на гидравлические потери?
9. Из каких соображений назначается $T_{охл.доп.}$?
10. Чем определяется выбор материала огневой стенки?
11. В каких случаях используется закрутка ребер?
12. Для чего проводится пересчет конвективных тепловых потоков в камере?
13. В каких случаях применяется локальная завеса?
14. Каковы преимущества использования ребер по сравнению с гофрами?
15. Каким образом вычисляется приведённая скорость течения продуктов сгорания?
16. Излучение каких газов в составе продуктов сгорания учитывается в лучистом потоке?
17. Каковы определяющие параметры величины коэффициента оребрения, их физический смысл?
18. Каковы определяющие параметры излучательной способности газов и почему?
19. Каково влияние режима течения и степени шероховатости стенки на характер кривых для коэффициента гидравлического сопротивления?
20. Что такое абсолютная шероховатость поверхности стенки?
21. Что необходимо предпринять, если потери давления охладителя превышают допустимые значения?

Список использованных источников

1. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн. 1. Учеб. для авиац. спец. вузов/А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др.; Под ред. Кудрявцева В.М., 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1993, - 383 с.: ил.
2. Е.Л. Березанская, В.Д. Курпатенков, Ю.Д. Надеждина, Расчет наружного проточного охлаждения. - М.: Изд-во МАИ, 1977. - 54 с.: ил.
3. А.В. Полянский, Расчёт охлаждения ЖРД с использованием электронных таблиц: Метод. указания к курсовому и дипломному проектированию по специальности «Ракетные двигатели». - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
4. А.В. Затонский, С.А. Орлин, Ф.В. Пелевин, Расчёт теплового состояния камеры ЖРД с использованием ЭВМ: Учебное пособие/ Под ред. В.М. Поляева. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
5. В.А. Буркальцев, А.А. Дорофеев, А.В. Новиков, Проектные и поверочные расчёты камеры газогенератора жидкостного ракетного двигателя: Метод. указания к курсовому проектированию по дисциплине «Проектирование ЖРДУ». - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ, Справочник в 4-х томах под ред. В.П. Глушко. - М.: Наука, 1982.
7. Н.Б. Варгафтик, Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Изд-во «Наука», 1972. 720 с.: ил.
8. Ю.Д. Иров и др. Газодинамические функции. -М.: Машиностроение, 1965, 399 с.
9. В.П. Исаченко и др. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 4-е, перераб. и доп. - М.: Энергоиздат, 1981. - 416 с.: ил.
10. А.П. Архипов, С.А. Орлин, Конструкционные материалы, используемые при проектировании космического двигателя: Метод. указания по выполнению курсового и дипломного проектирования/ Под ред. Г.Г. Мухина. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1982.

Приложение А. Теплофизические свойства некоторых охладителей

Данные представлены для следующих охладителей:

1. НДМГ
2. Аэрозин-50
3. Этиловый спирт (100%)
4. Вода
5. Керосин Т-1
6. Гелий
7. Аммиак
8. Кислород
9. Водород
10. Метан

и включают в себя следующие свойства в зависимости от температуры и давления*:

C – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг · К);

μ – коэффициент динамической вязкости, Н · с/м²;

ρ – плотность компонента, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$K = \lambda^{0,6} \left(\frac{C_p}{\mu} \right)^{0,4}$ – комплекс теплофизических свойств, характеризующий охлаждающую

способность охладителя, кг^{0,2}·м^{1,8}/(с^{2,2}·К);

p_s – давление насыщенных паров, МПа;

а также характерные параметры [$T_{пл}$, $T_{кип}^{**}$, $T_{разл}$, $p_{кр}$, $T_{кр}$, $\rho_{кр}$, $Q_{исп}^{**}$].

* Свойства, не зависящие (слабо зависящие) от давления, представлены для жидкокапельной фазы на линии насыщения.

** Значения даны для условий $p = 0,1$ МПа.

Литературные источники (для приложения П.А):

1. Н.Б. Варгафтик, Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, 1972 г.
2. Термодинамические свойства кислорода: ГСССД, 1981 г.
3. Н.Б. Варгафтик, Справочник по теплопроводности газов и жидкостей, 1972 г.
4. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана: ГСССД, 1969 г.
5. В.С. Чиркин, Теплофизические свойства материалов ядерной техники, 1968 г.
6. Е. Л. Березанская, Расчет наружного проточного охлаждения: МАИ, 1977г.

1. НДМГ – несимметричный диметилгидразин

Таблица А.1.1 – Характерные параметры НДМГ

Химическая формула	Температура плавления, К $T_{пл}$	Температура разложения, К $T_{разл}$	Температура кипения, К $T_{кип}^*$	Теплота испарения, кДж/кг $Q_{исп}^*$	Критическая температура, К $T_{кр}$	Критическая плотность, кг/м ³ $\rho_{кр}$	Критическое давление, МПа $p_{кр}$
$N_2H_2(CH_3)_2$	215,9	670	335,1	582,41	523	790	5,35

Таблица А.1.2 – Зависимость свойств НДМГ от температуры

T, К	T, С°	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	λ , Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$	p_s , МПа
223	-50	861	2680	25,3	0,204	84	0,01
233	-40	852	2700	22,7	0,201	98	0,01
243	-30	841	2750	16,2	0,198	109	0,01
253	-20	831	2760	12,0	0,195	124	0,01
263	-10	821	2775	10	0,192	138	0,01
273	0	811	2795	7,5	0,189	147	0,01
283	10	801	2800	6,4	0,186	154	0,01
293	20	769	2810	5,1	0,182	163	0,03
303	30	758	2820	4,8	0,180	172	0,04
313	40	747	2830	4,1	0,178	184	0,05
333	60	726	2920	3,3	0,176	193	0,1
353	80	704	3000	3,1	0,174	202	0,19
373	100	683	3080	2,9	0,172	211	0,35
393	120	661	3160	2,4	0,170	220	0,6
413	140	639	3290	2,1	0,167	224	0,93
433	160	618	3470	1,8	0,165	229	1,1
443	170	607	3600	1,5	0,162	235	1,3
453	180	596	3730	1,4	0,159	243	1,5
473	200	575	4220	1,3	0,156	250	1,7

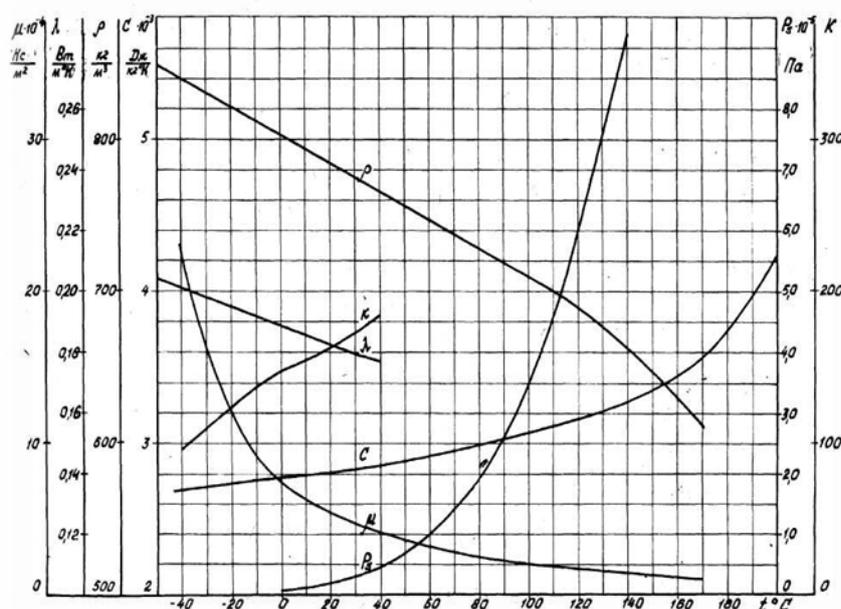


Рис. А.1 График зависимости свойств НДМГ от температуры

[Оглавление](#)

2. Аэрозин – 50

Таблица А.2.1 – Характерные параметры аэрозина

Химическая формула	Температура плавления, К $T_{пл}$	Температура разложения, К $T_{разл}$	Температура кипения, К $T_{кип}^*$	Теплота испарения, кДж/кг $Q_{исп}^*$	Критическая температура, К $T_{кр}$	Критическая плотность, кг/м ³ $\rho_{кр}$	Критическое давление, МПа $p_{кр}$
50%НДМ Г+50%гид ра-зин	266	623	343	989	607,2	682	11,54

Таблица А.2.2 – Зависимость свойств аэрозина от температуры

T, К	T, С°	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	λ , Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$	p_s , МПа
263	-10	930	2850	16,50	0,254	137,4	0,0037
268	-5	925	2856	14,75	0,254	143,8	0,005
273	0	920	2870	13,13	0,254	150,8	0,0063
278	5	916	2875	11,75	0,254	157,9	0,0075
283	10	912	2887	10,50	0,254	165,4	0,0094
288	15	908	2856	9,56	0,254	171	0,012
293	20	900	2902	8,75	0,254	178,3	0,015
298	25	898	2913	8,00	0,254	185,1	0,0108
303	30	894	2922	7,50	0,254	190,2	0,021
308	35	890	2931	7,00	0,254	195,7	0,028
313	40	884	2940	6,50	0,254	201,9	0,035
318	45	880	2950	6,13	0,254	206,9	0,041
323	50	875	2959	5,75	0,254	212,6	0,051
328	55	870	2975	5,37	0,254	218,9	0,06125
333	60	866	2970	5,00	0,254	225,5	0,072
338	65	862	2988	4,58	0,254	233,7	0,086
343	70	857	3000	4,50	0,254	235,8	0,1

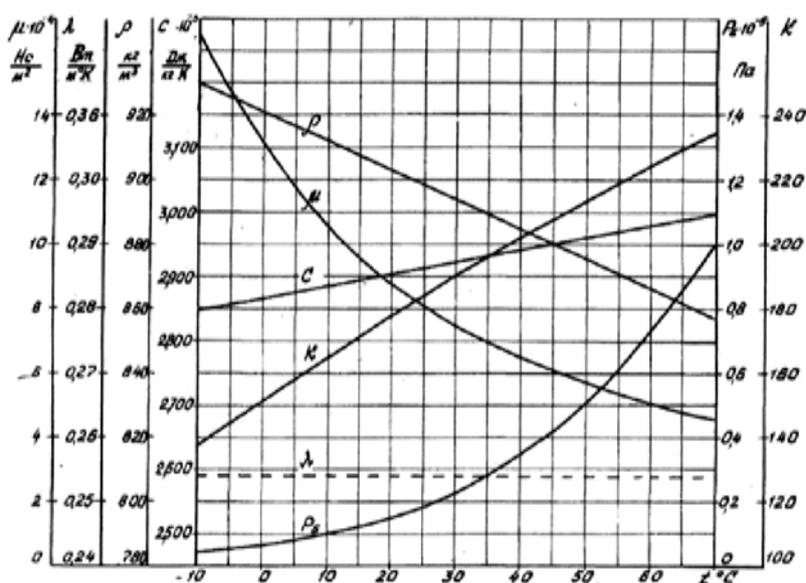


Рис. А.2 График зависимости свойств аэрозина от температуры

3. Этиловый спирт (100 %)

Таблица А.3.1 – Характерные параметры этилового спирта

Химическая формула	Температура плавления, К $T_{пл}$	Температура разложения, К $T_{разл}$	Температура кипения, К $T_{кип}^*$	Теплота испарения, кДж/кг $Q_{исп}^*$	Критическая температура, К $T_{кр}$	Критическая плотность, кг/м ³ $\rho_{кр}$	Критическое давление, МПа $p_{кр}$
C ₂ H ₅ OH	159	514	351	919	516.6	280	6.4

Таблица А.3.2 – Зависимость свойств этилового спирта от температуры

T, К	T, С°	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	λ , Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} \cdot (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$	p_s , МПа
253	-20	811	2135	35,17	0,1681	83,5	0,01
263	-10	820	2286	27,17	0,1677	86,3	0,01
273	0	825	2390	17,44	0,1673	94,1	0,01
293	20	780	2410	11,72	0,1659	114	0,03
313	40	766	2586	8,00	0,163	135,2	0,05
333	60	743	2791	5,72	0,1616	158,6	0,09
353	80	726	3026	4,00	0,1601	187,9	0,114
373	100	709	3289	3,14	0,1587	212,8	0,171
393	120	681	3612	2,28	0,1401	232,9	0,443
413	140	656	3963	2,00	0,1516	267,3	0,972
433	160	625	4167	1,43	0,1444	295,4	1,029
453	180	591	4654	1,14	0,1373	334,2	2,086
473	200	554	5176	0,858	0,1287	365,9	2,972
493	220	508	5789	0,572	0,1158	381,5	4,315

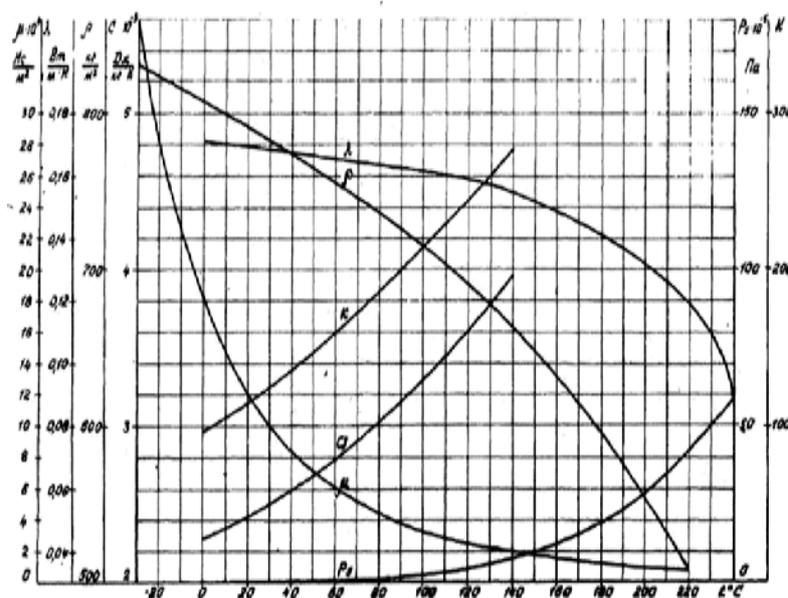


Рис. А.3 График зависимости свойств этилового спирта от температуры

4. Вода

Таблица А.4.1 – Характерные параметры воды

Химическая формула	Температура плавления, К $T_{пл}$	Температура разложения, К $T_{разл}$	Температура кипения, К $T_{кип}^*$	Теплота испарения, кДж/кг $Q_{исп}^*$	Критическая температура, К $T_{кр}$	Критическая плотность, кг/м ³ $\rho_{кр}$	Критическое давление, МПа $p_{кр}$
H ₂ O	273	-	373	2257	647,12	317,8	22,12

Таблица А.4.2 – Зависимость свойств воды от температуры

T, К	T, С°	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	$C \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	K, кг ^{0,2} ·м ^{1,8} /(с ^{2,2} ·К)	p_s , МПа
273	0	999,8	4,217	17,53	569	254,0	0,0006
293	20	998,3	4,182	10,02	602	328,1	0,00234
313	40	992,3	4,179	6,513	630	400,4	0,00737
333	60	983,2	4,185	4,630	653	469,2	0,02
353	80	971,6	4,197	3,510	669	572,0	0,0474
373	100	958,1	4,216	2,790	680	590,5	0,1013
393	120	942,9	4,245	2,300	685	642,5	0,1985
413	140	925,8	4,285	1,950	687	690,2	0,3614
433	160	907,3	4,339	1,690	684	732,5	0,6180
453	180	886,9	4,408	1,493	676	769,2	1,003
473	200	864,7	4,497	1,338	664	801,5	1,555
493	220	840,3	4,614	1,215	648	829,4	2,320
513	240	813,6	4,770	1,114	628	854,8	3,348
533	260	783,9	4,985	1,030	604	876,1	4,694
553	280	750,5	5,300	0,961	573	894,4	6,419
573	300	712,3	5,770	0,901	540	916,3	8,592
593	320	666,9	6,590	0,830	503	956,9	11,29
613	340	610,1	8,270	0,748	460	1035	14,61
633	360	528,3	14,99	0,644	401	1281	18,67

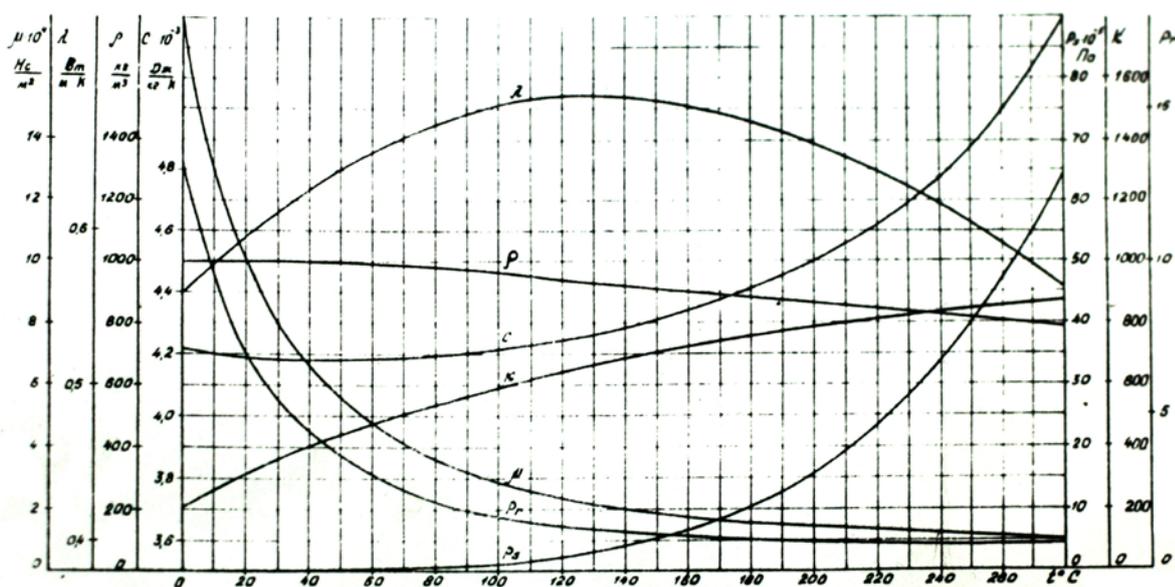


Рис. А.4 График зависимости свойств воды от температуры

[Оглавление](#)

5. Керосин Т-1

Таблица А.5.1 – Характерные параметры керосина Т-1

Химическая формула	Температура плавления, К $T_{пл}$	Температура разложения, К $T_{разл}$	Температура кипения, К $T_{кип}^*$	Теплота испарения, кДж/кг $Q_{исп}^*$	Критическая температура, К $T_{кр}$	Критическая плотность, кг/м ³ $\rho_{кр}$	Критическое давление, МПа $p_{кр}$
C7.21H13.29	210	700	420...550	343	673	840	4,02

Таблица А.5.2 – Зависимость свойств керосина Т-1 от температуры

T, К	T, С°	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	λ , Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$	p_s , МПа
223	-50	864	1890	120	0,127	38	0,0001
233	-40	858	1900	73	0,125	40	0,0001
253	-20	842	1950	35	0,123	55	0,0002
273	0	830	2000	20	0,120	70	0,0003
293	20	819	2050	15	0,117	80	0,0004
313	40	808	2100	10	0,114	90	0,001
333	60	795	2200	8	0,110	100	0,002
353	80	781	2280	6	0,108	110	0,027
373	100	766	2360	5	0,104	120	0,041
393	120	751	2440	4,5	0,102	130	0,057
413	140	736	2550	3,9	0,099	140	0,078
433	160	720	2660	3,5	0,096	150	0,104
453	180	703	2800	3	0,093	155	0,139
473	200	685	2900	2,6	0,090	160	0,185
533	250	638	3060	2,0	0,084	178	0,22

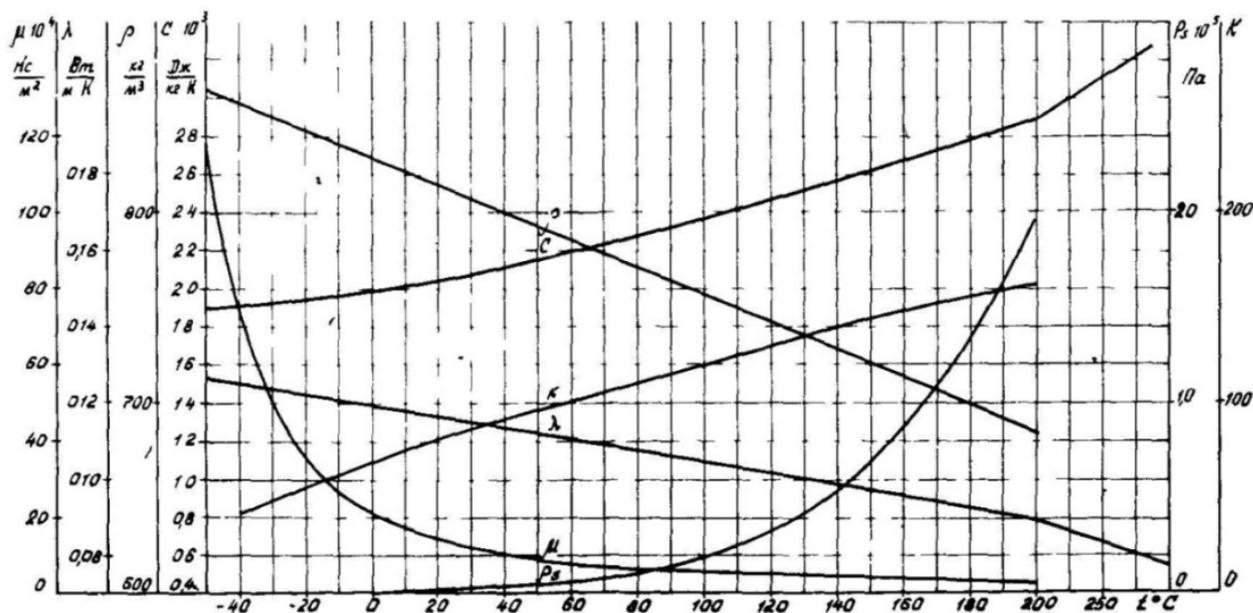


Рис. А.5 График зависимости свойств керосина Т-1 от температуры

6. Гелий

Таблица А.6.1 – Характерные параметры гелия

Химическая формула	Температура плавления, К $T_{пл}$	Температура разложения, К $T_{разл}$	Температура кипения, К $T_{кип}^*$	Теплота испарения, кДж/кг $Q_{исп}^*$	Критическая температура, К $T_{кр}$	Критическая плотность, кг/м ³ $\rho_{кр}$	Критическое давление, МПа $p_{кр}$
He	1,85	-	4,216	20	5,04	69,3	0,229

Таблица А.6.2 – Зависимость свойств гелия от температуры

T, К	T, С°	p, МПа	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	λ , Вт/(м·К)	K, кг ^{0,2} ·м ^{1,8} /(с ^{2,2} ·К)
93	-180	0,5	2,57	5,201	9,51	74,04	655,82
		1	5,10	5,209	9,58	74,58	657,27
		2	10,04	5,224	9,71	75,79	660,84
		5	24,01	5,267	10,08	79,69	673,07
		10	44,82	5,324	10,66	85,88	691,50
		15	63,02	5,364	11,19	91,42	706,20
		20	79,12	5,391	11,68	96,60	718,78
133	-140	0,5	1,80	5,196	11,97	93,23	686,74
		1	3,58	5,198	12,02	93,69	687,67
		2	7,08	5,203	12,12	94,65	689,81
		5	17,15	5,219	12,42	97,71	697,09
		10	32,61	5,243	12,89	102,74	709,23
		15	46,64	5,265	13,32	107,42	720,17
		20	59,44	5,283	13,72	111,80	730,00
173	-100	0,5	1,39	5,194	14,17	110,47	710,49
		1	2,76	5,195	14,22	110,89	711,29
		2	5,47	5,196	14,30	111,74	712,95
		5	13,35	5,202	14,55	114,33	718,24
		10	25,67	5,212	14,93	118,55	727,04
		15	37,09	5,222	15,28	122,57	735,45
		20	47,70	5,232	15,60	126,40	743,39
213	-60	0,5	1,13	5,193	16,21	126,37	729,94
		1	2,25	5,193	16,24	126,76	730,69
		2	4,46	5,194	16,31	127,54	732,19
		5	10,93	5,195	16,50	129,84	736,62
		10	21,18	5,198	16,81	133,51	743,74
		15	30,80	5,201	17,09	137,01	750,55
		20	39,86	5,206	17,36	140,37	757,12
253	-20	0,5	0,95	5,193	18,11	141,24	746,43
		1	1,89	5,193	18,13	141,62	747,19
		2	3,76	5,192	18,19	142,36	748,67
		5	9,26	5,191	18,34	144,46	752,73
		10	18,03	5,191	18,57	147,74	759,01
		15	26,34	5,191	18,79	150,83	764,88
		20	34,25	5,193	19,00	153,82	770,62
293	20	0,5	0,82	5,193	19,91	155,30	760,79
		1	1,64	5,192	19,93	155,67	761,57
		2	3,26	5,192	19,96	156,38	763,05

[Оглавление](#)

		5	8,03	5,190	20,07	158,36	767,07
		10	15,69	5,188	20,24	161,35	772,97
T, К	T, С°	p, МПа	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	λ , Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$
		15	23,01	5,186	20,40	164,13	778,35
		20	30,02	5,185	20,55	166,80	783,55
333	60	0,5	0,72	5,193	21,63	168,70	773,47
		1	1,44	5,192	21,64	169,07	774,23
		2	2,87	5,191	21,67	169,76	775,65
		5	7,08	5,189	21,76	171,64	779,34
		10	13,89	5,186	21,91	174,42	784,61
		15	20,43	5,183	22,05	176,96	789,30
		20	26,72	5,181	22,18	179,38	793,74
373	100	0,5	0,64	5,193	23,27	181,55	784,89
		1	1,29	5,192	23,29	181,91	785,61
		2	2,56	5,191	23,32	182,58	786,92
		5	6,34	5,189	23,40	184,40	790,35
		10	12,46	5,185	23,53	187,02	795,08
		15	18,37	5,182	23,65	189,37	799,16
		20	24,07	5,179	23,77	191,58	802,95
413	140	0,5	0,58	5,193	24,86	193,93	795,30
		1	1,16	5,192	24,87	194,27	795,95
		2	2,32	5,191	24,90	194,93	797,20
		5	5,74	5,189	24,97	196,70	800,43
		10	11,30	5,185	25,09	199,20	804,73
		15	16,68	5,181	25,21	201,40	808,37
		20	21,90	5,178	25,32	203,43	811,64
453	180	0,5	0,53	5,193	26,40	205,89	804,86
		1	1,06	5,192	26,41	206,23	805,50
		2	2,11	5,191	26,43	206,87	806,66
		5	5,24	5,189	26,50	208,59	809,69
		10	10,33	5,185	26,61	211,00	813,70
		15	15,28	5,181	26,71	213,08	816,99
		20	20,09	5,178	26,81	214,98	819,90
493	220	0,5	0,49	5,193	27,88	217,48	813,70
		1	0,97	5,192	27,89	217,82	814,32
		2	1,94	5,191	27,92	218,45	815,44
		5	4,82	5,189	27,98	220,14	818,32
		10	9,52	5,185	28,08	222,47	822,08
		15	14,09	5,181	28,18	224,45	825,08
		20	18,56	5,178	28,27	226,24	827,70
533	260	0,5	0,45	5,193	29,33	228,74	821,94
		1	0,90	5,192	29,34	229,08	822,53
		2	1,80	5,192	29,36	229,71	823,62
		5	4,46	5,189	29,42	231,36	826,36
		10	8,82	5,185	29,51	233,63	829,93
		15	13,08	5,182	29,60	235,54	832,73
		20	17,24	5,178	29,69	237,23	835,09
573	300	0,5	0,42	5,193	30,74	239,72	829,67
		1	0,84	5,192	30,75	240,05	830,23

		2	1,67	5,192	30,77	240,67	831,27
		5	4,16	5,189	30,82	242,30	833,92
		10	8,22	5,186	30,91	244,52	837,30
		15	12,20	5,182	30,99	246,36	839,93
T, K	T, C°	p, МПа	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг·K)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	λ , Вт/(м·K)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{K})}$
		20	16,09	5,179	31,07	247,97	842,10
613	340	0,5	0,39	5,193	32,11	250,43	836,94
		1	0,78	5,192	32,12	250,75	837,47
		2	1,56	5,192	32,14	251,36	838,47
		5	3,89	5,189	32,19	252,97	841,02
		10	7,70	5,186	32,27	255,15	844,26
		15	11,43	5,182	32,35	256,94	846,75
		20	15,09	5,179	32,43	258,49	848,79
653	380	0,5	0,37	5,193	33,46	260,89	843,80
		1	0,74	5,192	33,46	261,21	844,33
		2	1,47	5,192	33,48	261,82	845,30
		5	3,65	5,190	33,53	263,40	847,73
		10	7,24	5,186	33,61	265,55	850,87
		15	10,75	5,183	33,68	267,29	853,23
		20	14,21	5,180	33,75	268,79	855,15
693	420	0,5	0,35	5,193	34,77	271,13	850,31
		1	0,69	5,192	34,78	271,45	850,81
		2	1,38	5,192	34,79	272,05	851,75
		5	3,44	5,190	34,84	273,62	854,13
		10	6,83	5,186	34,91	275,73	857,14
		15	10,15	5,183	34,98	277,44	859,41
		20	13,42	5,180	35,05	278,89	861,21
733	460	0,5	0,33	5,193	36,06	281,17	856,51
		1	0,66	5,192	36,07	281,48	856,98
		2	1,31	5,192	36,08	282,07	857,89
		5	3,26	5,190	36,12	283,63	860,20
		10	6,46	5,187	36,19	285,72	863,13
		15	9,61	5,184	36,26	287,40	865,31
		20	12,71	5,181	36,33	288,81	867,03
773	500	0,5	0,31	5,193	37,32	291,01	862,40
		1	0,62	5,193	37,33	291,33	862,89
		2	1,24	5,192	37,34	291,91	863,76
		5	3,09	5,190	37,38	293,45	865,99
		10	6,13	5,187	37,45	295,52	868,84
		15	9,13	5,184	37,51	297,17	870,95
		20	12,08	5,181	37,58	298,55	872,59
813	540	0,5	0,30	5,193	38,57	300,68	868,05
		1	0,59	5,193	38,57	300,99	868,51
		2	1,18	5,192	38,58	301,57	869,36
		5	2,94	5,190	38,62	303,10	871,55
		10	5,84	5,187	38,69	305,14	874,30
		15	8,69	5,184	38,75	306,77	876,35
		20	11,51	5,182	38,81	308,13	877,94
853	580	0,5	0,28	5,193	39,79	310,18	873,46

[Оглавление](#)

		1	0,56	5,193	39,79	310,49	873,91
		2	1,13	5,192	39,80	311,06	874,73
		5	2,80	5,190	39,84	312,58	876,85
		10	5,57	5,188	39,90	314,60	879,54
		15	8,29	5,185	39,96	316,22	881,55
		20	10,98	5,182	40,02	317,55	883,07
T, К	T, С°	p, МПа	ρ, кг/м³	C, Дж/(кг·К)	μ·10⁴, Н·с/м²	λ, Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$
893	620	0,5	0,27	5,193	40,99	319,53	878,65
		1	0,54	5,193	40,99	319,83	879,08
		2	1,08	5,192	41,00	320,40	879,88
		5	2,68	5,190	41,04	321,90	881,95
		10	5,32	5,188	41,10	323,92	884,59
		15	7,93	5,185	41,15	325,51	886,52
		20	10,51	5,183	41,21	326,82	888,01
933	660	0,5	0,26	5,193	42,17	328,73	883,64
		1	0,52	5,193	42,17	329,03	884,07
		2	1,03	5,192	42,18	329,60	884,86
		5	2,56	5,191	42,22	331,09	886,86
		10	5,10	5,188	42,27	333,08	889,43
		15	7,60	5,185	42,33	334,66	891,33
		20	10,07	5,183	42,38	335,96	892,78
973	700	0,5	0,25	5,193	43,33	337,80	888,47
		1	0,49	5,193	43,34	338,09	888,86
		2	0,99	5,192	43,35	338,65	889,63
		5	2,46	5,191	43,38	340,13	891,59
		10	4,89	5,188	43,43	342,11	894,10
		15	7,29	5,186	43,48	343,68	895,97
		20	9,67	5,183	43,53	344,96	897,38

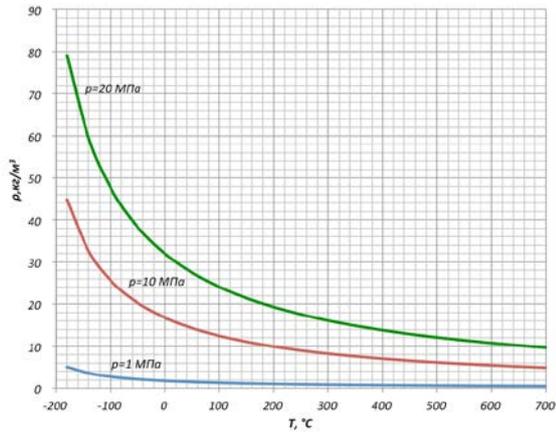


Рис. А.6.1 Зависимость плотности гелия от температуры и давления

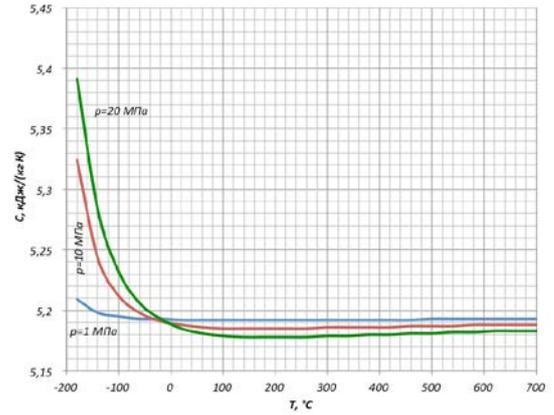


Рис. А.6.2 Зависимость удельной теплоёмкости гелия от температуры и давления

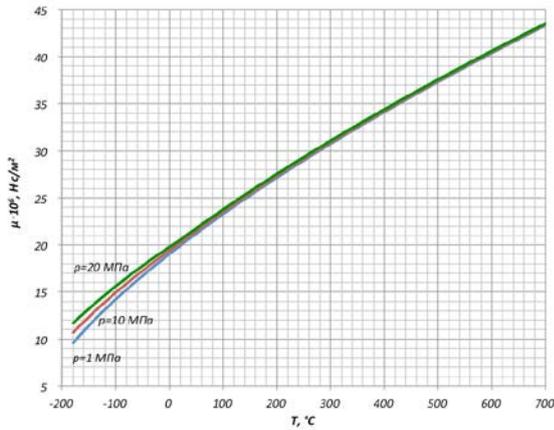


Рис. А.6.3 Зависимость динамической вязкости гелия от температуры и давления

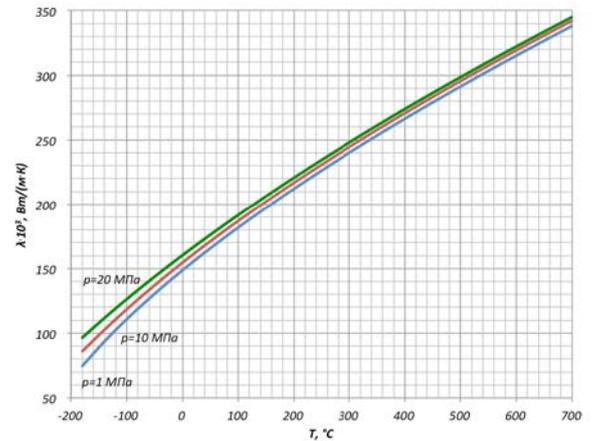


Рис. А.6.4 Зависимость коэффициента теплопроводности гелия от температуры и давления

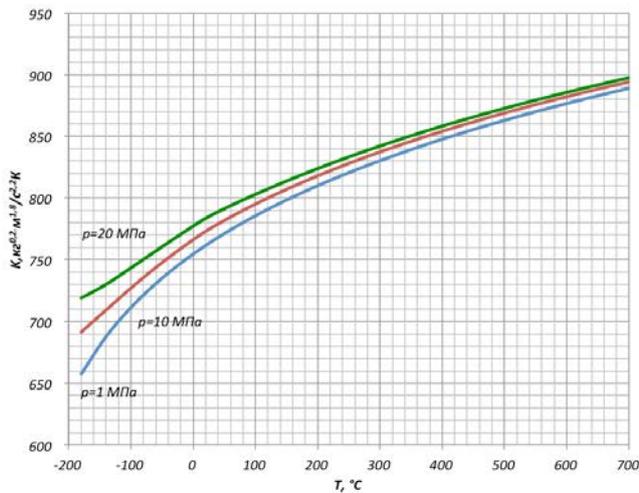


Рис. А.6.5 Зависимость комплекса теплофизических свойств гелия от температуры и давления

7. Аммиак

Таблица А.7.1 – Характерные параметры аммиака

Химическая формула	Температура плавления, К $T_{пл}$	Температура разложения, К $T_{разл}$	Температура кипения, К $T_{кип}^*$	Теплота испарения, кДж/кг $Q_{исп}^*$	Критическая температура, К $T_{кр}$	Критическая плотность, кг/м ³ $\rho_{кр}$	Критическое давление, МПа $p_{кр}$
NH ₃	195,3	483	239,6	1370	405,4	235	11,28

Таблица А.7.2 – Зависимость свойств аммиака от температуры

T, К	T, С°	p, МПа	ρ , кг/м ³	$C \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^5$, Н·с/м ²	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	K, кг ^{0,2} ·м ^{1,8} /(с ^{2,2} ·К)
300	27	0,5	3,61	2,158	1,07	24,7	228
		1	7,7	3,10	1,07	30,0	302
		2	584,74	3,10	13,7	474	556
		5	591,71	4,77	13,9	480	662
		10	595,24	4,67	14,3	488	655
		15	601,33	4,62	14,7	493	650
		20	602,41	4,57	15,01	500	647
320	47	0,5	3,34	2,38	1,12	27,2	245
		1	6,99	2,92	1,14	31	287
		2	568,23	3,24	11,5	434	579
		5	574,71	4,89	11,65	440	684
		10	581,39	4,79	12,5	450	668
		15	588,24	4,7	13,0	456	657
		20	591,72	4,65	13,5	463	652
340	67	0,5	3,11	2,34	1,18	30,4	256
		1	6,45	2,58	1,19	32,2	275
		2	14,05	3,24	1,2	36,1	321
		5	537,63	5,26	10,1	393	697
		10	564,97	5,06	10,5	404	687
		15	555,56	4,89	10,9	416	678
		20	561,79	4,82	11,2	423	675
360	87	0,5	2,92	2,34	1,25	31,6	256
		1	6,01	2,51	1,26	34	275
		2	12,98	2,92	1,27	36,5	303
		5	490,19	5,97	7,0	340	778
		10	507,61	5,53	7,91	354	737
		15	518,13	5,19	8,44	367	715
		20	526,32	5,04	8,93	379	705
380	107	0,5	2,75	2,34	1,32	34	262
		1	5,63	2,48	1,33	35,4	250
		2	11,84	2,75	1,34	37,4	280
		5	36,24	4,33	1,39	50	414
		10	450,45	6,51	6,03	302	797
		15	473,93	5,85	6,96	320	746
		20	487,8	5,48	7,4	335	729
400	127	0,5	2,61	2,36	1,39	37	271
		1	5,31	2,46	1,4	38,4	281
		2	11,05	2,65	1,42	41,1	299

[Оглавление](#)

		5	31,93	3,66	1,47	49,5	376
		10	115,61	29,89	3,5	110	990
T, К	T, С°	p, МПа	ρ , кг/м ³	$C \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^5$, Н·с/м ²	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	K, кг ^{0,2} ·м ^{1,8} /(с ^{2,2} ·К)
		15	416,67	7,25	5,07	269	830
		20	440,53	6,37	5,83	292	785
420	147	0,5	2,47	2,38	1,46	40,4	280
		1	5,02	2,46	1,47	41,2	287
		2	10,39	2,65	1,48	42,9	303
		5	29,01	3,29	1,54	49,3	352
		10	75,24	6,05	1,7	75,1	557
		15	291,55	15,12	3,18	220	1090
		20	371,75	8,26	4,16	244	895
440	167	0,5	2,36	2,41	1,53	43,5	290
		1	4,76	2,46	1,54	44,1	294
		2	9,81	2,61	1,55	45,3	304
		5	26,79	3,07	1,6	49,1	336
		10	64,59	4,57	1,74	65,2	452
		15	159,48	10,3	2,03	201	1156
		20	268,82	11,21	2,87	183	986
460	187	0,5	2,25	2,43	1,61	46,3	295
		1	4,55	2,48	1,61	47,3	387
		2	9,3	2,61	1,62	48,2	387
		5	24,98	2,95	1,66	51,6	337
		10	57,47	3,93	1,79	63	413
		15	117,09	6,78	2,07	84,5	578
		20	183,49	9,73	2,39	133	828
480	207	0,5	2,15	2,46	1,68	49,2	302
		1	4,35	2,51	1,69	50,1	308
		2	8,86	2,61	1,7	50,9	316
		5	23,49	2,92	1,72	54,1	340
		10	52,36	3,59	1,84	62,5	392
		15	99,4	5,14	2,05	76,4	489
		20	143,68	6,32	2,25	97,3	592
500	227	0,5	2,06	2,51	1,75	52,5	312
		1	4,16	2,53	1,75	54,5	321
		2	8,46	2,63	1,76	55,4	328
		5	22,21	2,9	1,79	57,8	348
		10	48,4	3,39	1,9	63,3	382
		15	88,42	4,2	2,03	73,2	442
		20	121,51	4,89	2,22	94,5	528
520	247	0,5	1,98	2,53	1,82	55,4	319
		1	3,99	2,58	1,82	59,3	335
		2	8,46	2,65	1,83	60,6	342
		5	21,09	2,88	1,86	63,8	362
		10	45,25	3,27	1,94	66,7	385
		15	80,38	3,81	2,09	72,3	417
		20	108,11	4,23	2,21	89,5	483

Таблица А.7.3 – Параметры равновесного состояния аммиака на линии насыщения

T _s , С	-73	-63	-53	-43	-33	-23	-13	-3	7	17	27	37	47	57	67
--------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	---	----	----	----	----	----	----

[Оглавление](#)

T_s, K	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340
$p_s, \text{МПа}$	0,009	0,018	0,134	0,061	0,103	0,165	0,256	0,382	0,552	0,775	1,062	1,425	1,866	2,422	3,082
T_s, C	77	87	97	107	117	127	132,6								
T_s, K	350	360	370	380	390	400	405,6								
$p_s, \text{МПа}$	3,870	4,803	5,891	7,154	8,606	10,28	11,3								

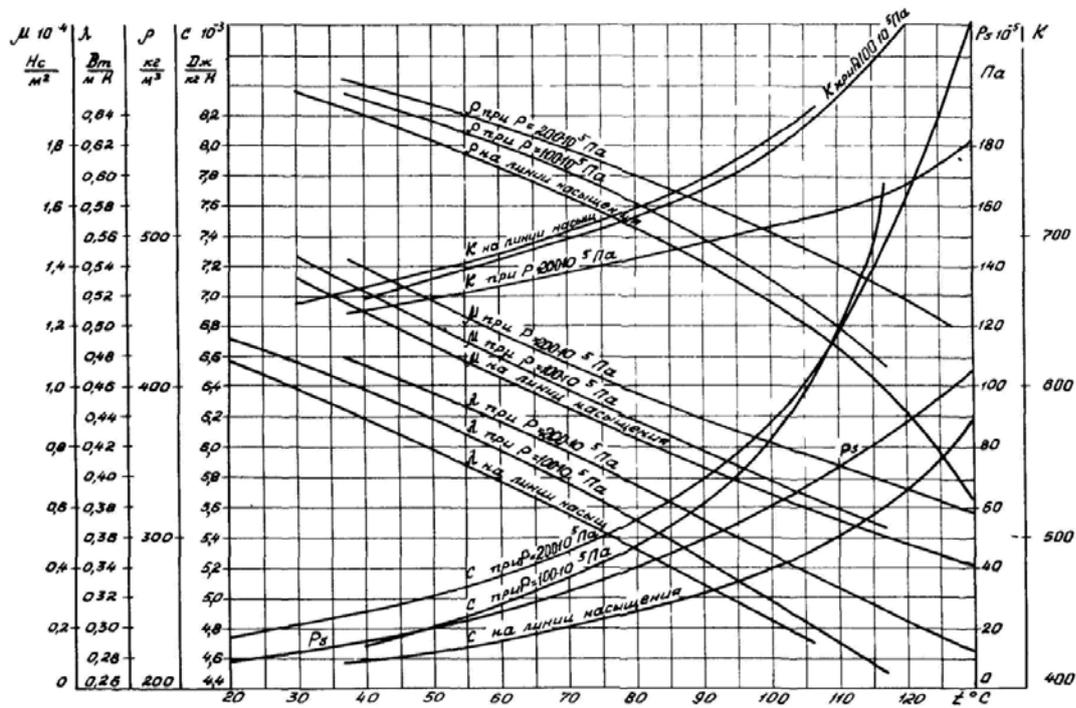


Рис. А.7 График зависимости свойств аммиака от температуры

8. Кислород

Таблица А.8.1 – Характерные параметры кислорода

Химическая формула	Температура плавления, К $T_{пл}$	Температура разложения, К $T_{разл}$	Температура кипения, К $T_{кип}^*$	Теплота испарения, кДж/кг $Q_{исп}^*$	Критическая температура, К $T_{кр}$	Критическая плотность, кг/м ³ $\rho_{кр}$	Критическое давление, МПа $p_{кр}$
O ₂	54	573	90	214	154,7	410	5,004

Таблица А.8.2 – Зависимость свойств кислорода от температуры

T, К	T, С°	p, МПа	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	K, кг ^{0,2} ·м ^{1,8} /(с ^{2,2} ·К)
90	-183	0,5	1141	1623	1,894	78,6	130,8
		1	1142	1620	1,903	148	191,5
		2	1143	1615	1,927	149	191,2
		5	1151,73	1601	1,998	152	189,3
		10	1162,17	1580	2,12	154	185,5
		15	1171,80	1563	2,251	157	182,5
		20	1180,80	1548	2,386	160	179,8
100	-173	0,5	1090,12	1669	0,9199	73,5	139,4
		1	1091,63	1665	1,507	134	201,3
		2	1094,59	1657	1,525	135	200,8
		5	1103,01	1635	1,578	140	198,8
		10	1115,83	1604	1,666	143	195,7
		15	1127,46	1581	1,755	147	193,7
		20	1138,16	1560	1,846	150	191,3
110	-163	0,5	19,46	1066	0,9434	67,15	350,4
		1	1036,01	1745	1,216	120	210,0
		2	1039,94	1731	1,234	121	209,1
		5	1050,94	1693	1,285	128	207,0
		10	1067,17	1645	1,365	132	203,6
		15	1081,46	1609	1,441	136	201,1
		20	1094,34	1582	1,516	140	199,2
120	-153	0,5	17,34	1017	0,0946	11,8	115,5
		1	38,4	1186	0,0979	12,2	126,0
		2	978,22	1866	0,986	108	218,7
		5	993,55	1793	1,04	114	214,4
		10	1015,01	1710	1,123	120	210,7
		15	1033,08	1654	1,201	125	207,6
		20	1048,87	1613	1,273	129	204,7
130	-143	0,5	15,71	994	0,102	12,8	115,6
		1	33,76	1112	0,105	13,0	123,0
		2	903,45	2127	0,788	95,9	228,7
		5	927,46	1954	0,844	99,9	222,6
		10	957,74	1797	0,923	107	217,1
		15	981,42	1707	0,998	113	213,3
		20	1001,20	1647	1,071	118	209,9
150	-123	0,5	13,32	968	0,116	15,0	118,6
		1	27,78	1038	0,118	14,7	124,6
		2	61,42	1241	0,124	16,0	136,6

[Оглавление](#)

		5	716,22	3251	0,484	66,9	278,6
		10	815,60	2177	0,627	79,8	228,8
T, К	T, С°	P , МПа	ρ , кг/м ³	C , Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	K , кг ^{0,2} ·м ^{1,8} /(с ^{2,2} ·К)
		15	863,43	1871	0,717	88,3	218,4
		20	897,01	1736	0,788	95,1	213,6
160	-113	0,5	12,4	958	0,123	15,9	119,3
		1	25,65	1015	0,125	15,5	123,9
		2	55,34	1162	0,129	16,7	133,8
		5	207,96	3025	0,165	26,4	229,2
		10	716,36	2569	0,49	67,5	246,6
		15	793,69	2014	0,599	77,1	222,6
		20	839,36	1802	0,678	84,7	214,8
180	-93	0,5	10,92	944	0,137	17,5	120,3
		1	22,33	982	0,137	17,2	123,7
		2	46,84	1071	0,141	18,1	129,3
		5	140,13	1530	0,1604	22,00	156,5
		10	422,91	3299	0,261	42,7	262,1
		15	625,32	2493	0,402	57,8	233,8
		20	712,0	2032	0,498	66,7	217,0
200	-73	0,5	9,77	935	0,149	19,1	122,2
		1	19,84	962	0,150	18,9	124,7
		2	40,98	1020	0,153	19,7	130,3
		5	114,00	1259	0,167	22,6	144,8
		10	277,83	1942	0,213	31,6	190,6
		15	458,07	2493	0,292	45,2	221,4
		20	578,43	2095	0,373	54,5	216,2
250	-23	0,5	7,75	925	0,181	26	135,6
		1	15,61	938	0,180	23,1	127,2
		2	31,64	965	0,183	24,1	131,1
		5	82,32	1054	0,192	25,8	138,8
		10	174,47	1224	0,213	29,6	153,6
		15	271,27	1394	0,242	35,1	170,1
		20	363,12	1506	0,277	41,2	182,6
300	27	0,5	6,46	926	0,201	27,1	133,4
		1	12,91	933	0,209	27,3	132,4
		2	25,97	949	0,211	27,8	134,4
		5	65,69	997	0,217	29,2	139,5
		10	134,52	1079	0,232	31,8	147,7
		15	203,51	1157	0,249	34,9	156,1
		20	270,27	1224	0,272	38,5	163,4
350	77	0,5	5,5	933	0,234	30,9	136,2
		1	11,02	933	0,235	31,2	137,1
		2	22,09	949	0,236	31,6	138,5
		5	55,48	980	0,242	32,8	142,1
		10	111,30	1030	0,253	34,9	147,9
		15	166,46	1076	0,266	37,5	154,2
		20	210,73	1118	0,281	40,2	159,7
400	127	0,5	4,81	945	0,26	34,8	140,9
		1	9,62	946	0,259	35,0	141,9

		2	19,24	956	0,261	35,3	142,6
		5	48,05	978	0,266	36,5	147,1
		10	95,61	1013	0,274	38,4	150,7
		15	142,11	1045	0,284	40,5	155,3
T, К	T, С°	p , МПа	ρ , кг/м ³	C , Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	K , кг ^{0,2} ·м ^{1,8} /(с ^{2,2} ·К)
		20	187,06	1074	0,296	42,7	159,51
450	177	0,5	4,27	959	0,283	38,6	145,9
		1	8,54	962	0,282	38,7	146,5
		2	17,06	967	0,284	39,1	147,3
		5	42,47	984	0,287	40,1	149,9
		10	84,11	1011	0,295	41,8	153,7
		15	124,63	1034	0,304	43,6	157,3
		20	163,78	1056	0,313	45,6	161,4
500	227	0,5	3,84	974	0,301	42,3	151,3
		1	7,68	976	0,304	42,5	151,2
		2	15,33	981	0,305	42,8	151,9
		5	38,09	994	0,309	43,7	153,9
		10	75,25	1015	0,315	45,3	157,3
		15	111,31	1034	0,322	46,9	160,3
		20	146,15	1050	0,331	48,6	163,1
600	327	0,5	3,2	1004	0,346	49,6	159,3
		1	6,4	1006	0,344	49,7	160,0
		2	12,76	1009	0,345	50	160,6
		5	31,64	1018	0,348	50,8	162,1
		10	62,36	1032	0,3531	52,1	164,5
		15	92,12	1044	0,359	53,5	166,8
		20	120,9	1055	0,365	54,9	169,1
700	427	0,5	2,75	1032	0,383	56,6	167,4
		1	5,48	1033	0,381	56,7	168,0
		2	10,93	1035	0,382	57,0	168,5
		5	21,09	1041	0,384	57,7	169,8
		10	53,37	1051	0,389	58,8	171,5
		15	78,83	1060	0,393	60,0	173,4
		20	103,49	1068	0,398	61,2	175,2
800	527	0,5	2,4	1055	0,417	63,4	174,8
		1	4,8	1056	0,416	63,5	175,2
		2	6,57	1057	0,417	63,7	175,5
		5	23,70	1062	0,418	64,3	176,6
		10	46,7	1069	0,422	65,14	177,7
		15	69,01	1076	0,426	66,4	179,6
		20	90,66	1082	0,430	67,4	180,9
900	627	0,5	2,14	1074	0,447	63,8	171,9
		1	4,26	1075	0,448	67,8	178,2
		2	8,50	1076	0,448	68,1	178,7
		5	21,07	1079	0,449	70,6	182,7
		10	41,55	1085	0,453	71,6	183,9
		15	61,43	1090	0,456	72,5	185,2
		20	80,75	1095	0,460	73,4	186,2
1000	727	0,5	1,92	1090	0,476	76,1	187,5

		1	3,84	1091	0,477	76,2	187,4
		2	7,65	1092	0,478	76,4	187,6
		5	18,98	1094	0,479	76,9	188,4
		10	37,43	1099	0,482	77,7	189,4
		15	55,38	1103	0,485	78,6	190,5
		20	72,85	1106	0,488	79,4	191,5

Таблица А.8.3 – Параметры равновесного состояния на линии насыщения кислорода

T, C°	-180	-175	-170	-165	-160	-155	-150	-145	-140	-135	-130	-125	-120
T, K	93	98	103	108	113	118	123	128	133	138	143	148	153
p, МПа	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,3	0,9	2,0	2,5	3,1	3,8	4,6

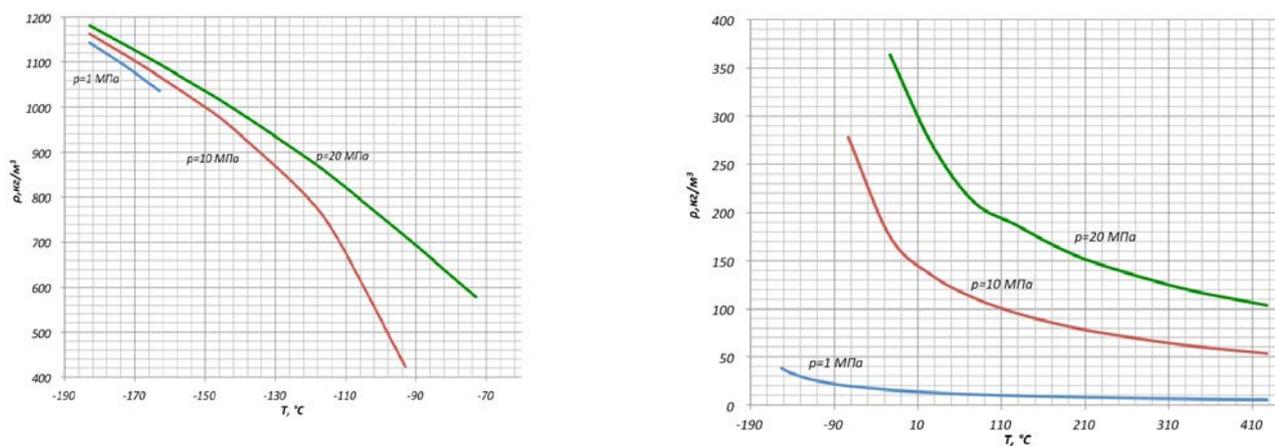


Рис. А.8.1 Зависимость плотности кислорода от температуры и давления по диапазонам

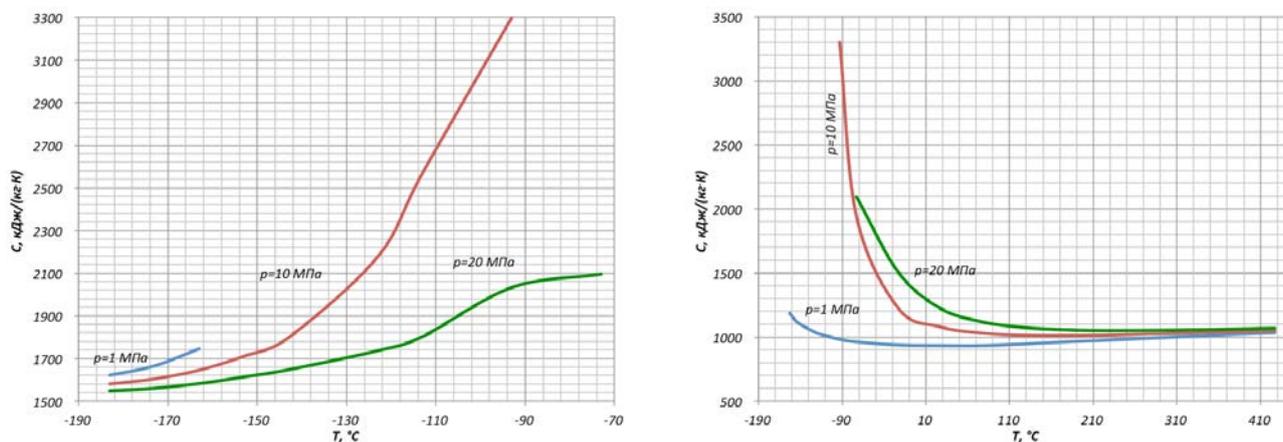


Рис. А.8.2 Зависимость удельной теплоёмкости кислорода от температуры и давления по диапазонам

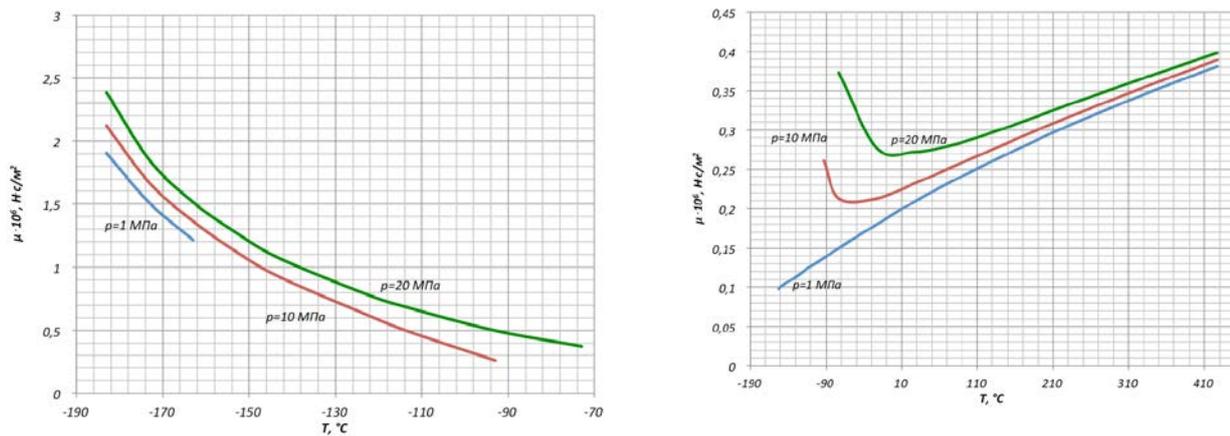


Рис. А.8.3 Зависимость динамической вязкости кислорода от температуры и давления по диапазонам

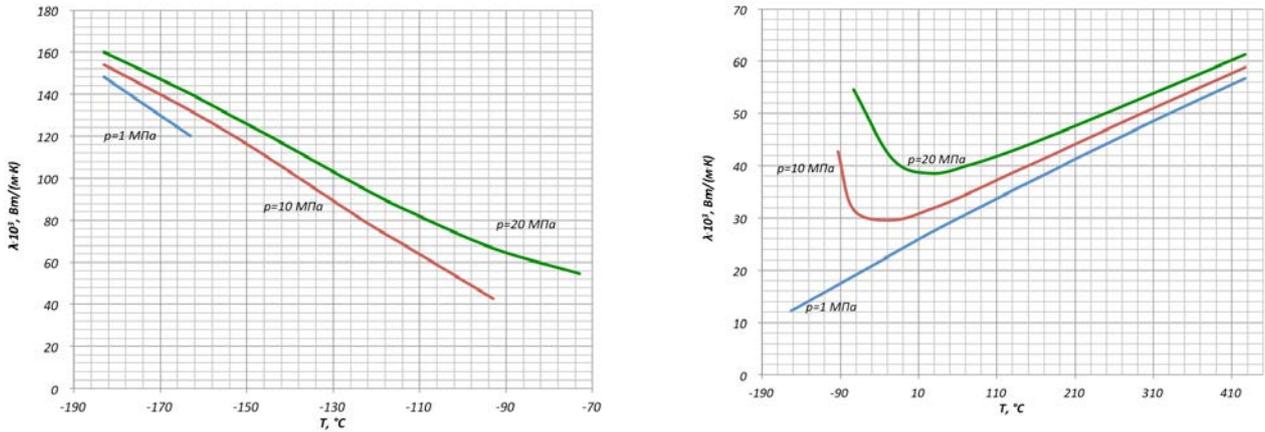


Рис. А.8.4 Зависимость коэффициента теплопроводности кислорода от температуры и давления по диапазонам

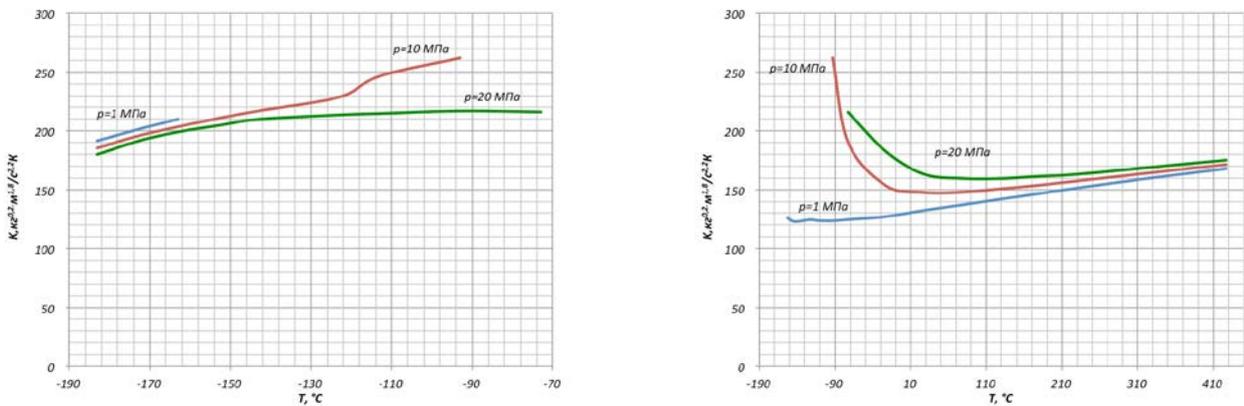


Рис. А.8.5 Зависимость комплекса теплофизических свойств кислорода от температуры и давления по диапазонам

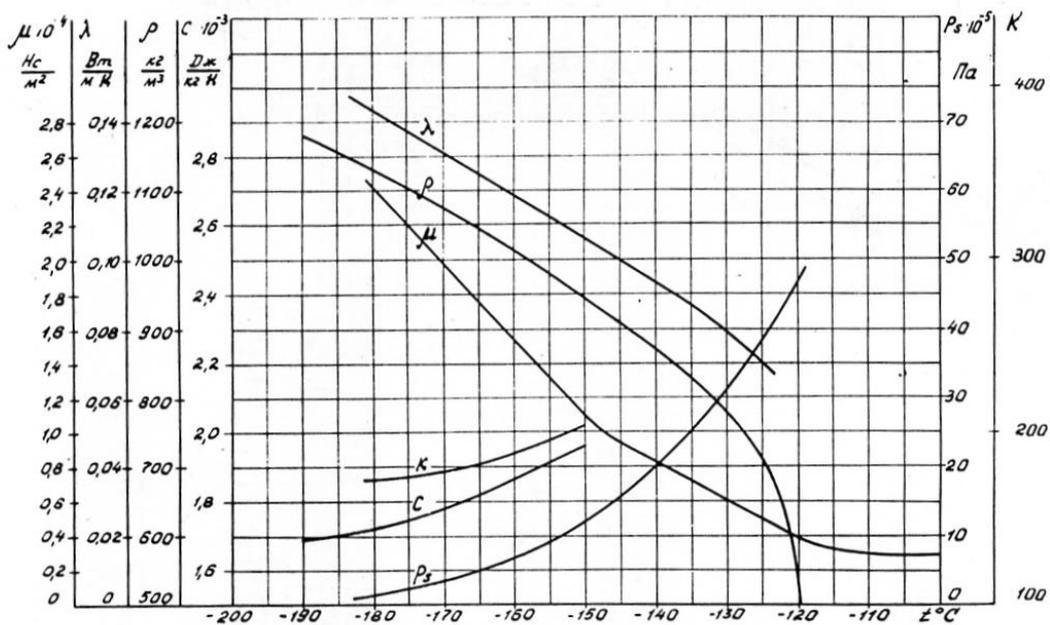


Рис. А.8.6 График зависимости свойств кислорода в жидкой фазе от температуры

9. Водород

Таблица А.9.1 – Характерные параметры водорода

Химическая формула	Температура плавления, К $T_{пл}$	Температура разложения, К $T_{разл}$	Температура кипения, К $T_{кип}^*$	Теплота испарения, кДж/кг $Q_{исп}^*$	Критическая температура, К $T_{кр}$	Критическая плотность, кг/м ³ $\rho_{кр}$	Критическое давление, МПа $p_{кр}$
H ₂	14	-	20,3	454,2	33,26	31,6	1,32

Таблица А.9.2 – Зависимость свойств водорода от температуры

T, К	T, С°	p , МПа	ρ , кг/м ³	$C \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$
20	-253	0,6	71,6	9,31	0,1300	118	937
		1	72,1	9,16	0,1381	118	937
		2	73,2	8,83	0,1470	118	970
		5	75,9	8,18	0,1740	118	817
		10	79,6	7,54	0,2200	118	719
		15	82,2	7,13	0,2700	118	648
		20	84,6	6,83	0,3240	118	592
40	-233	0,6	3,9	12,4	0,0215	170	2770
		1	7,2	14,5	0,0222	170	2914
		2	19,2	28	0,0275	170	3480
		5	51	19,5	0,0585	170	2230
		10	63,2	13,7	0,0828	170	1682
		15	69,2	12,2	0,1000	170	1490
		20	72,8	11,4	0,1170	170	1361
60	-213	0,6	2,4	11,1	0,0290	190	2514
		1	4,18	11,54	0,0294	190	2536
		2	8,74	12,8	0,0299	190	2636
		5	23,6	16,6	0,0380	190	2650
		10	42,4	16,3	0,0537	190	2232
		15	52,8	14,7	0,0665	190	2020
		20	60	13,7	0,0783	190	1840
80	-193	0,6	1,81	11,08	0,0360	53,2	1074
		1	3,04	11,3	0,0362	55,8	1112
		2	6,2	11,8	0,0368	60	1174
		5	15,56	13,3	0,0400	69,8	1300
		10	29,8	14,5	0,0480	90,2	1460
		15	40,2	14,4	0,0570	90,2	1362
		20	47,8	13,9	0,0634	90,2	1285
100	-173	0,6	1,44	11,47	0,0421	67	1170
		1	2,4	11,6	0,0423	70,7	1216
		2	4,82	11,89	0,0424	72,6	1246
		5	11,94	12,72	0,0442	80,9	1344
		10	22,84	13,66	0,0500	94,8	1450
		15	31,96	13,94	0,0562	109	1515
		20	39,28	13,89	0,0634	119	1520
150	-123	0,6	0,96	11,93	0,0560	101	1361
		1	1,58	12,14	0,0562	103	1385
		2	3,18	12,67	0,0564	105	1423

[Оглавление](#)

		5	7,76	12,83	0,0574	109	1453
		10	14,88	13,26	0,0600	117	1509
T, K	T, C°	p, МПа	ρ , кг/м ³	$C \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$, Н·с/м ²	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$
		15	21,28	13,58	0,0633	126	1559
		20	26,98	12,76	0,0669	135	1523
200	-73	0,6	0,7	13,68	0,0681	131	1554
		1	1,18	13,71	0,0682	132	1506
		2	2,36	13,78	0,0685	134	1576
		5	5,82	13,95	0,0691	137	1600
		10	11,18	14,19	0,0706	143	1640
		15	16,16	14,38	0,0723	149	1672
		20	20,7	14,52	0,0750	156	1700
300	27	0,6	0,48	14,44	0,0896	183	1740
		1	0,78	14,45	0,0896	183	1740
		2	1,58	14,48	0,0898	184	1744
		5	3,9	14,56	0,0902	187	1765
		10	7,56	14,66	0,0910	192	1792
		15	11,02	14,76	0,0921	195	1800
		20	14,28	14,84	0,0933	198	1814
500	227	0,6	0,28	14,63	0,1264	266	1907
		1	0,48	14,64	0,1264	266	1907
		2	0,96	14,65	0,1265	267	1901
		5	2,36	14,67	0,1267	269	1901
		10	4,62	14,71	0,1271	271	1906
		15	6,82	14,74	0,1275	274	1907
		20	8,92	14,77	0,1283	276	1905
750	477	0,6	0,18	14,77	0,1660	360	2058
		1	0,32	14,77	0,1660	360	2058
		2	0,64	14,77	0,1660	360	2058
		5	1,58	14,78	0,1662	361	2060
		10	3,12	14,79	0,1664	363	2060
		15	4,62	14,8	0,1667	364	2065
		20	6,08	14,82	0,1670	365	2072
1000	727	0,6	0,144	15,1	0,2013	448	2192
		1	0,24	15,1	0,2013	448	2192
		2	0,48	15,11	0,2013	448	2192
		5	1,18	15,11	0,2015	449	2195
		10	2,36	15,12	0,2017	450	2199
		15	3,5	15,12	0,2018	451	2190
		20	4,62	15,13	0,2020	452	2202

Таблица А.9.3 – Параметры равновесного состояния на линии насыщения водорода

T_s, C	-259	-258	-257	-256	-255	-254	-253	-252	-251	-250	-249	-248	-247	-246
T_s, K	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$p_s, \text{МПа}$	0,008	0,013	0,022	0,033	0,048	0,068	0,093	0,125	0,163	0,209	0,265	0,329	0,404	0,490
T_s, C	-245	-244	-243	-242	-241									
T_s, K	28	29	30	31	32									
$p_s, \text{МПа}$	0,588	0,699	0,824	0,964	1,121									

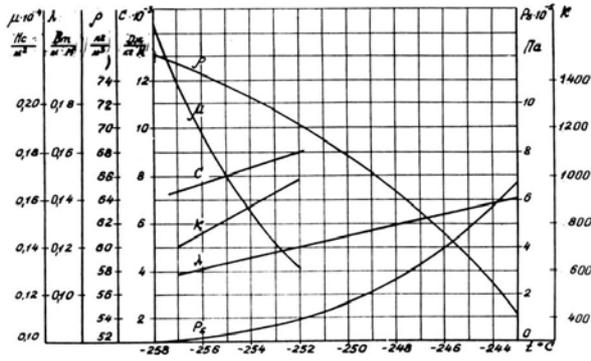


Рис. А.9.1 График зависимости свойств водорода в жидкой фазе от температуры

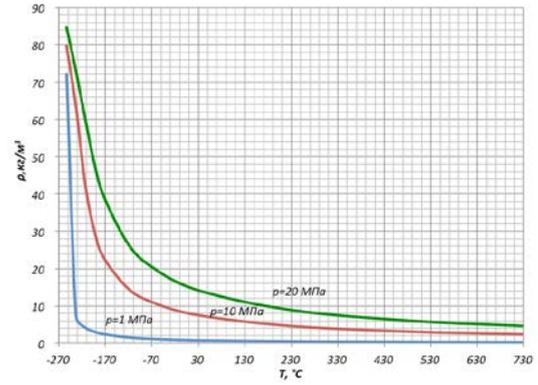


Рис. А.9.2 Зависимость плотности водорода от температуры и давления

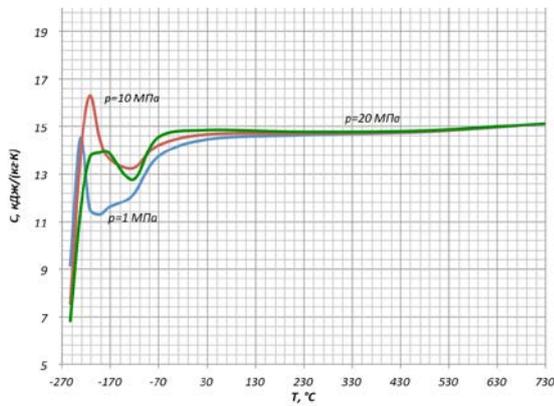


Рис. А.9.3 Зависимость удельной теплоёмкости водорода от температуры и давления

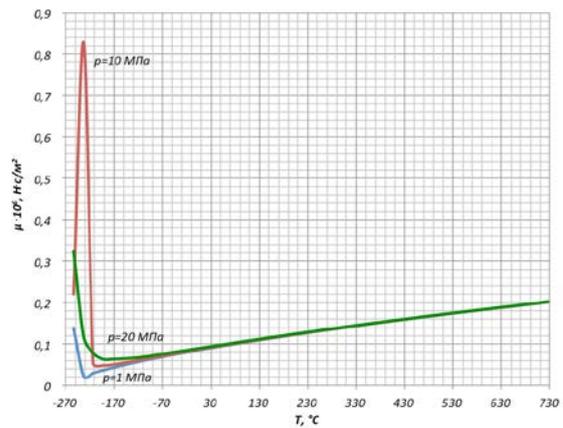


Рис. А.9.4 Зависимость динамической вязкости водорода от температуры и давления

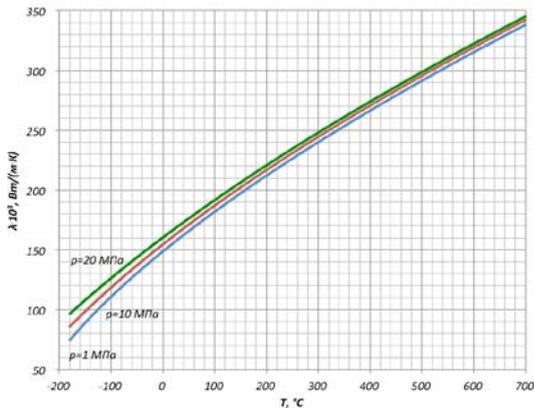


Рис. А.9.5 Зависимость коэффициента теплопроводности водорода от температуры и давления

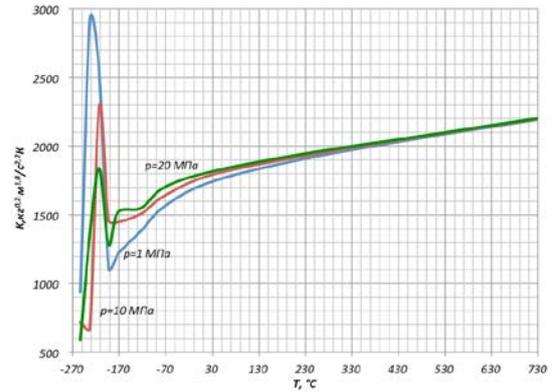


Рис. А.9.6 Зависимость комплекса теплофизических свойств водорода от температуры и давления

10. Метан

Таблица А.10.1 – Характерные параметры метана

Химическая формула	Температура плавления, К $T_{пл}$	Температура разложения, К $T_{разл}$	Температура кипения, К $T_{кип}^*$	Теплота испарения, кДж/кг $Q_{исп}^*$	Критическая температура, К $T_{кр}$	Критическая плотность, кг/м ³ $\rho_{кр}$	Критическое давление, МПа $p_{кр}$
CH ₄	90,66	1300	111,42	509	190,55	162,3	4,64

Таблица А.10.2 – Зависимость свойств метана от температуры

T, К	T, С°	p , МПа	ρ , кг/м ³	$C \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м ²	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$
100	-173	0,5	439,4	3,370	156,68	207,3	333,40
		1	439,8	3,366	157,65	207,8	332,95
		2	440,6	3,359	159,58	208,9	332,08
		5	442,8	3,340	165,39	212,0	329,55
		10	446,2	3,313	175,06	217,1	325,69
		15	449,5	3,291	184,73	222,0	322,19
		20	452,7	3,273	194,43	226,8	318,99
110	-163	0,5	425,3	3,444	121,62	190,7	354,05
		1	425,8	3,439	122,40	191,3	353,57
		2	426,7	3,429	123,97	192,4	352,62
		5	429,3	3,401	128,63	195,8	349,95
		10	433,3	3,363	136,31	201,2	345,95
		15	437,1	3,332	143,91	206,3	342,42
		20	440,6	3,306	151,43	211,3	339,27
120	-153	0,5	410,5	3,535	97,69	174,7	370,56
		1	411,0	3,527	98,37	175,4	370,00
		2	412,1	3,512	99,73	176,6	368,92
		5	415,2	3,472	103,75	180,3	365,90
		10	420,0	3,418	110,28	186,0	361,60
		15	424,4	3,374	116,65	191,5	357,93
		20	428,5	3,340	122,89	196,7	354,76
140	-133	0,5	7,6	2,431	5,67	15,4	232,32
		1	377,9	3,800	66,98	144,9	396,37
		2	379,6	3,762	68,21	146,5	394,50
		5	384,5	3,667	71,75	151,0	389,70
		10	391,6	3,552	77,28	157,8	383,62
		15	397,8	3,470	82,46	164,1	379,04
		20	403,2	3,408	87,40	169,9	375,43
160	-113	0,5	6,4	2,278	6,43	17,6	233,16
		1	14,0	2,594	6,62	18,6	250,84
		2	338,2	4,384	47,02	116,6	424,52
		5	347,5	4,068	50,99	123,1	411,97
		10	359,3	3,780	56,61	132,0	400,01
		15	368,5	3,612	61,53	139,5	392,81
		20	376,3	3,500	66,00	146,2	387,89
180	-93	0,5	5,6	2,210	7,18	19,9	236,73
		1	11,8	2,383	7,35	20,7	247,66
		2	26,9	2,980	7,77	22,7	280,11

[Оглавление](#)

		5	294,2	5,425	34,27	93,5	459,51
		10	319,9	4,230	41,65	107,5	418,42
T, К	T, С°	p, МПа	ρ , кг/м ³	C·10 ⁻³ , Дж/(кг·К)	μ ·10 ⁶ , Н·с/м ²	λ ·10 ³ , Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$
		15	335,4	3,843	46,97	117,2	404,13
		20	346,8	3,636	51,44	125,1	396,40
190	-83	0,5	5,3	2,191	7,55	21,0	238,99
		1	11,0	2,327	7,71	21,8	248,03
		2	24,4	2,739	8,09	23,5	272,24
		5	240,0	11,107	24,09	71,7	600,68
		10	295,7	4,634	35,29	95,5	431,71
		15	316,7	4,005	41,13	106,9	409,85
		20	331,0	3,722	45,74	115,6	399,85
200	-73	0,5	5,0	2,179	7,92	22,1	241,43
		1	10,3	2,289	8,06	22,8	249,09
		2	22,4	2,594	8,41	24,4	268,24
		5	88,3	7,483	10,93	34,4	452,95
		10	266,4	5,277	29,35	83,1	450,48
		15	296,4	4,200	35,99	97,0	415,80
		20	314,3	3,817	40,80	106,7	402,89
225	-48	0,5	4,4	2,168	8,80	25,0	248,28
		1	9,0	2,240	8,93	25,6	253,72
		2	18,9	2,413	9,21	26,9	266,00
		5	57,2	3,389	10,56	32,3	321,97
		10	169,2	6,366	17,56	54,3	462,08
		15	238,4	4,708	25,80	75,2	426,64
		20	269,5	4,046	31,16	87,4	407,61
250	-23	0,5	3,9	2,181	9,66	27,9	256,17
		1	8,0	2,231	9,77	28,4	260,31
		2	16,5	2,346	10,01	29,5	269,19
		5	46,2	2,832	11,02	33,6	301,91
		10	112,5	4,201	14,31	44,7	377,82
		15	180,9	4,552	19,74	60,3	410,59
		20	224,0	4,099	24,75	73,2	403,79
275	2	0,5	3,5	2,211	10,48	30,9	265,17
		1	7,2	2,249	10,57	31,4	268,47
		2	14,7	2,331	10,78	32,4	275,34
		5	39,6	2,637	11,61	35,7	298,17
		10	88,7	3,328	13,81	43,4	342,94
		15	141,4	3,868	17,20	53,8	379,31
		20	184,9	3,876	21,05	64,4	390,49
300	27	0,5	3,2	2,256	11,27	34,1	275,31
		1	6,5	2,286	11,36	34,5	278,04
		2	13,3	2,349	11,54	35,4	283,58
		5	35,0	2,564	12,23	38,3	300,96
		10	75,2	2,992	13,93	44,3	331,76
		15	117,3	3,382	16,32	51,9	359,48
		20	155,7	3,556	19,16	60,2	376,13
325	52	0,5	3,0	2,314	12,04	37,4	286,56
		1	6,0	2,338	12,11	37,8	288,86

		2	12,2	2,388	12,27	38,6	293,47
		5	31,5	2,551	12,88	41,2	307,39
		10	66,0	2,849	14,26	46,2	330,57
		15	101,4	3,126	16,10	52,2	351,62
T, К	T, C°	p, МПа	ρ , кг/м ³	C·10 ⁻³ , Дж/(кг·К)	μ ·10 ⁶ , Н·с/м ²	λ ·10 ³ , Вт/(м·К)	$\frac{K}{\text{кг}^{0,2} \cdot \text{м}^{1,8} / (\text{с}^{2,2} \cdot \text{К})}$
		20	134,8	3,308	18,29	58,9	367,29
350	77	0,5	2,8	2,382	12,78	40,9	298,78
		1	5,6	2,402	12,84	41,3	300,75
		2	11,2	2,442	12,99	42,0	304,66
		5	28,8	2,571	13,52	44,4	316,20
		10	59,3	2,795	14,69	48,8	334,64
		15	90,1	3,002	16,19	53,8	351,24
		20	119,5	3,158	17,94	59,3	364,66
375	102	0,5	2,6	2,458	13,50	44,6	311,80
		1	5,2	2,474	13,56	45,0	313,52
		2	10,4	2,508	13,69	45,7	316,90
		5	26,5	2,613	14,16	47,8	326,69
		10	54,0	2,790	15,17	51,7	341,91
		15	81,5	2,952	16,44	56,0	355,45
		20	107,8	3,081	17,90	60,7	366,78
400	127	0,5	2,4	2,539	14,19	48,5	325,48
		1	4,8	2,553	14,25	48,8	326,99
		2	9,7	2,582	14,37	49,5	329,95
		5	24,6	2,670	14,79	51,4	338,41
		10	49,7	2,814	15,68	55,0	351,29
		15	74,7	2,945	16,77	58,8	362,63
		20	98,5	3,054	18,02	62,9	372,27
450	177	0,5	2,1	2,714	15,54	56,7	354,17
		1	4,3	2,724	15,58	57,0	355,36
		2	8,6	2,746	15,68	57,6	357,69
		5	21,6	2,810	16,03	59,3	364,24
		10	43,2	2,913	16,75	62,3	373,98
		15	64,4	3,007	17,60	65,4	382,40
		20	84,7	3,086	18,56	68,7	389,63
500	227	0,5	1,9	2,895	16,82	65,5	383,82
		1	3,9	2,904	16,85	65,7	384,79
		2	7,7	2,921	16,94	66,3	386,68
		5	19,3	2,970	17,23	67,8	391,95
		10	38,3	3,048	17,83	70,4	399,65
		15	56,9	3,119	18,53	73,1	406,23
		20	74,7	3,180	19,30	75,9	411,88
550	277	0,5	1,8	3,078	18,04	74,7	413,74
		1	3,5	3,085	18,07	74,9	414,55
		2	7,0	3,098	18,15	75,4	416,12
		5	17,4	3,138	18,40	76,7	420,46
		10	34,5	3,200	18,90	79,1	426,74
		15	51,1	3,255	19,49	81,4	432,07
		20	67,1	3,305	20,14	83,8	436,63
600	327	0,5	1,6	3,259	19,21	84,2	443,50

	1	3,2	3,264	19,24	84,4	444,19
	2	6,4	3,275	19,30	84,8	445,50
	5	15,9	3,307	19,53	86,0	449,16
	10	31,5	3,358	19,96	88,1	454,40
	15	46,6	3,403	20,47	90,3	458,82
	20	61,1	3,444	21,02	92,4	462,59

Таблица А.10.3 – Параметры равновесного состояния метана на линии насыщения

T_s, C	-163	-153	-138	-133	-113	-93	-83
T_s, K	110	120	135	140	160	180	190
p_s, MPa	0,08	0,19	0,48	0,64	1,69	3,29	4,55

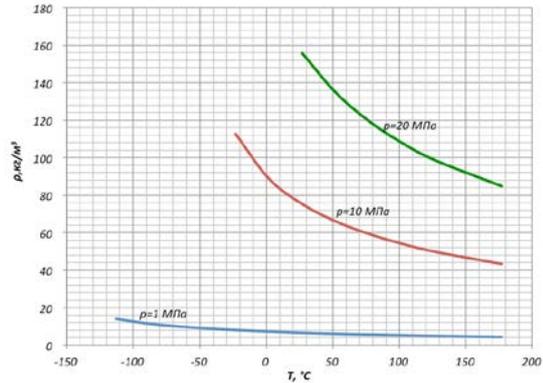
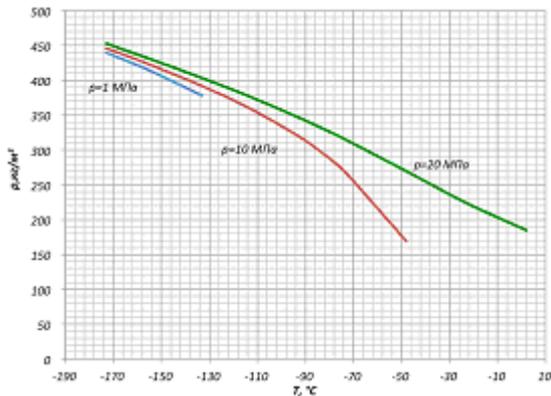


Рис. А.10.1 Зависимость плотности метана от температуры и давления по диапазонам

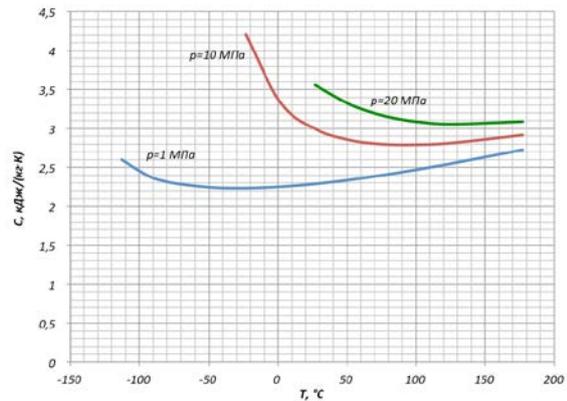
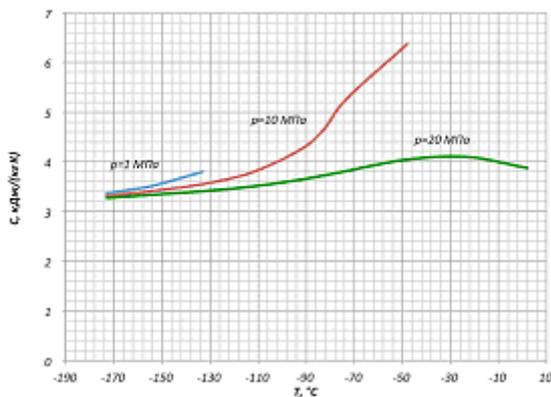


Рис. А.10.2 Зависимость удельной теплоёмкости метана от температуры и давления по диапазонам

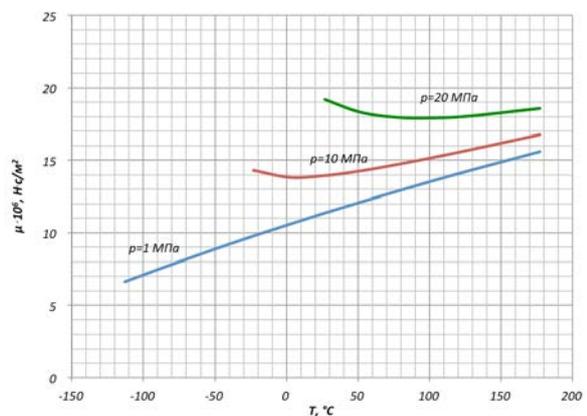
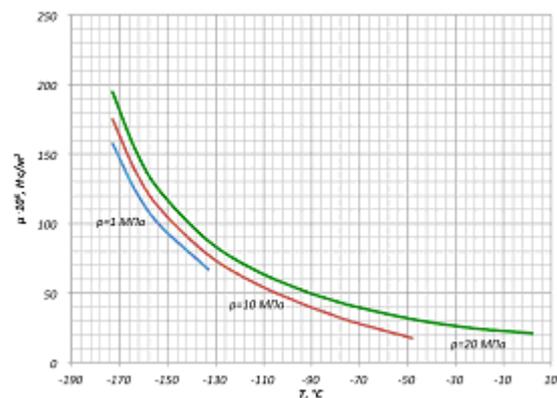


Рис. А.10.3 Зависимость динамической вязкости метана от температуры и давления по диапазонам

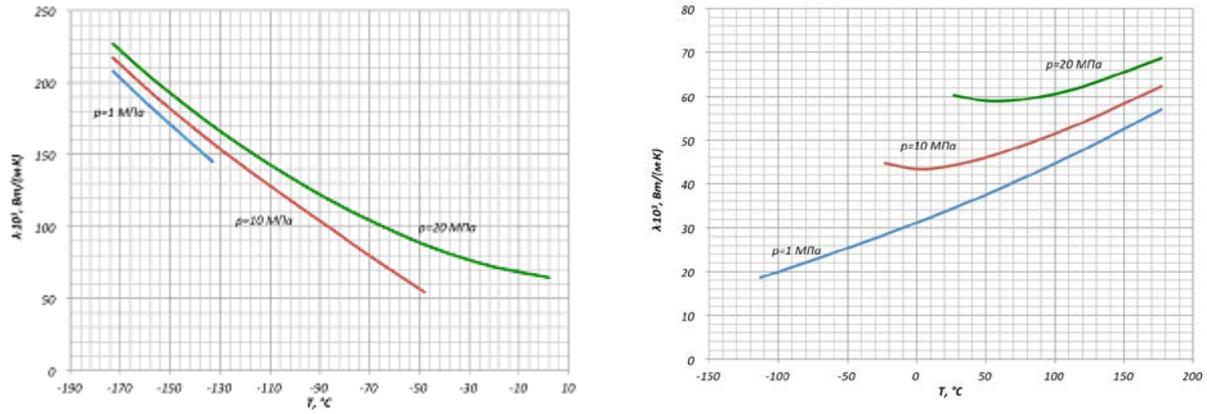


Рис. А.10.4 Зависимость коэффициента теплопроводности метана от температуры и давления по диапазонам

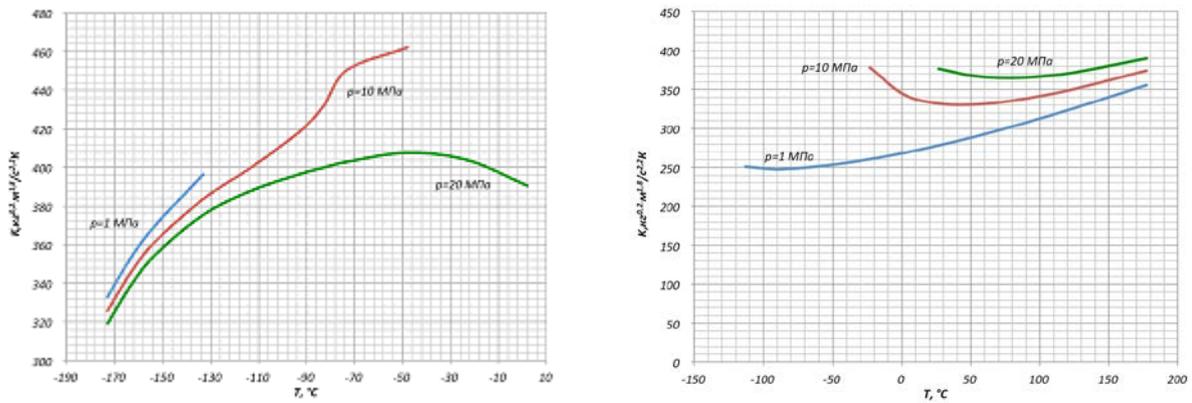


Рис. А.10.5 Зависимость комплекса теплофизических свойств метана от температуры и давления по диапазонам

Приложение Б. Теплопроводность различных конструкционных материалов

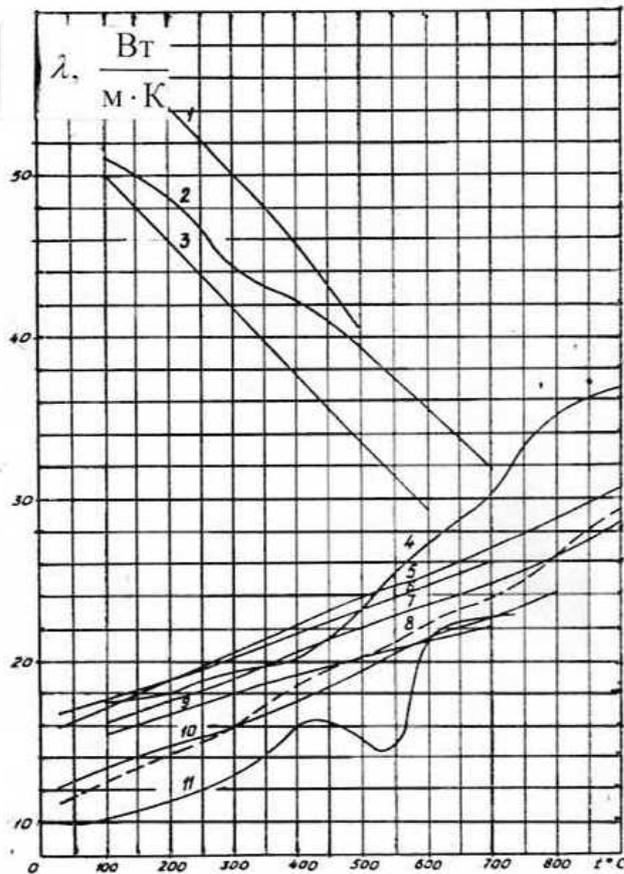
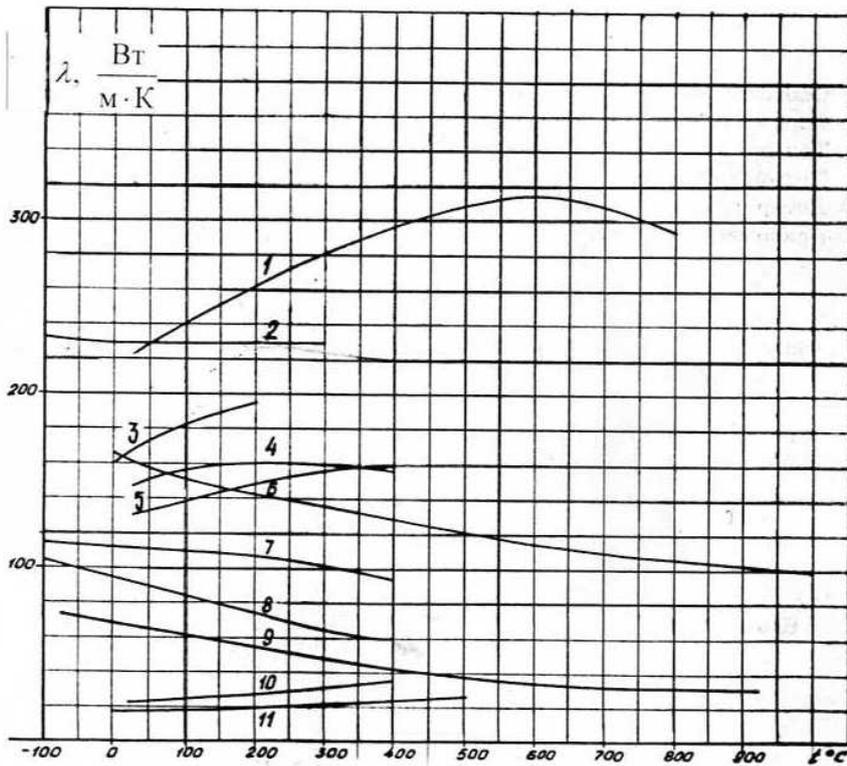


Рис. Б.1 – Стали и их сплавы

- 1 – углеродистая конструкционная сталь 10КП;
- 2 – технически чистое железо Ст.20;
- 3 – технически чистое железо Ст.30;
- 4 – сталь 1Х21Н5Т;
- 5 – жаростойкая 08Х17Н5М3;
- 6 – жаростойкая 07Х16Н6;
- 7 – жаростойкая 12Х18Н10Т, 12Х18Н9Т;
- 8 – сталь для агрессивных сред ЭИ759; 9 – сталь ЭИ69;
- 10 – сталь для агрессивных сред 2Х18Н12С4ТЮ;
- 11 – жаростойкий и жаропрочный сплав ХН60В.



- 1 – бронза хромистая БрХО,5 (БрХО,8); 2 – алюминий;
 3 – дюралюминий; 4 – АЛ-4;
 5 – АЛ-1; 6 – вольфрам;
 7 – цинк; 8 – никель; 9 – хром;
 10 – монельметалл;
 11 – нихром (90% Ni).

Рис. Б.2 – Цветные металлы и сплавы на их основе

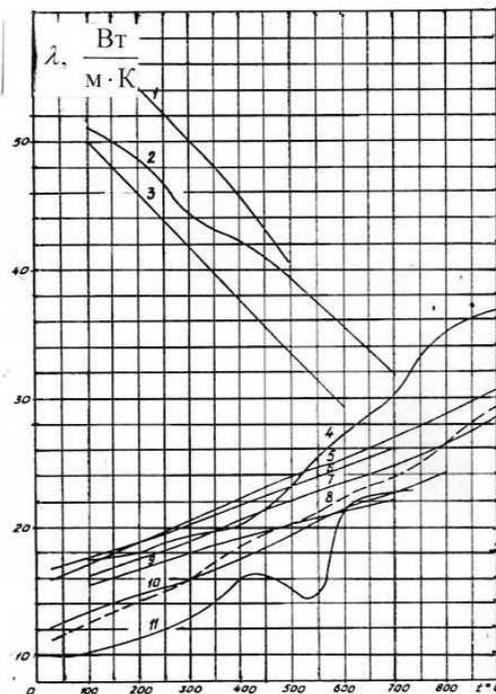


Рис. Б.3

Стали и их сплавы:

- 1 – углеродистая конструкционная сталь 10КП; 2 – технически чистое железо Ст.20;
 3 – технически чистое железо Ст.30; 4 – сталь 1Х21Н5Т; 5 – жаростойкая 08Х17Н5М3;
 6 – жаростойкая 07Х16Н6; 7 – жаростойкая 12Х18Н10Т, 12Х18Н9Т; 8 – сталь для агрессивных сред ЭИ759; 9 – сталь ЭИ69; 10 – сталь для агрессивных сред 2Х18Н12С4ТЮ; 11 – жаростойкий и жаропрочный сплав ХН60В.

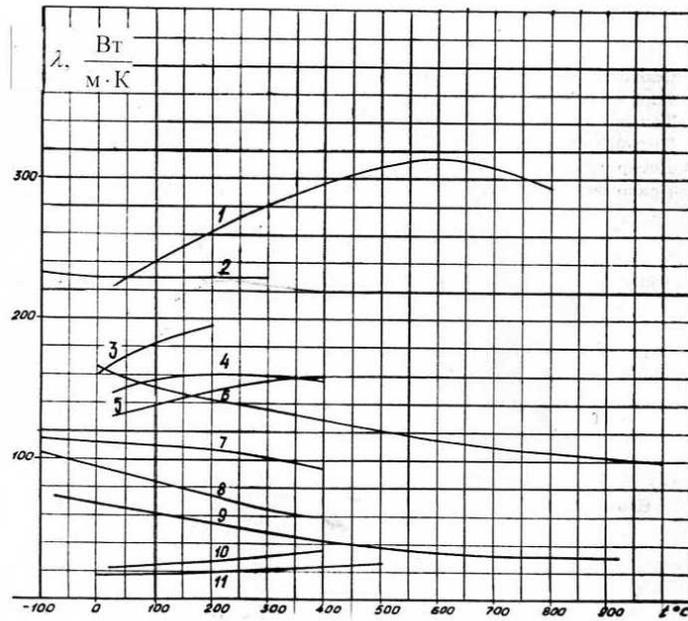


Рис. Б.4

Цветные металлы и сплавы на их основе:

- 1 – бронза хромистая БрХО,5 (БрХО,8); 2 – алюминий; 3 – дюралюминий; 4 – АЛ-4;
 5 – АЛ-1; 6 – вольфрам; 7 – цинк; 8 – никель; 9 – хром; 10 – монельметалл;
 11 – нихром (90% Ni).

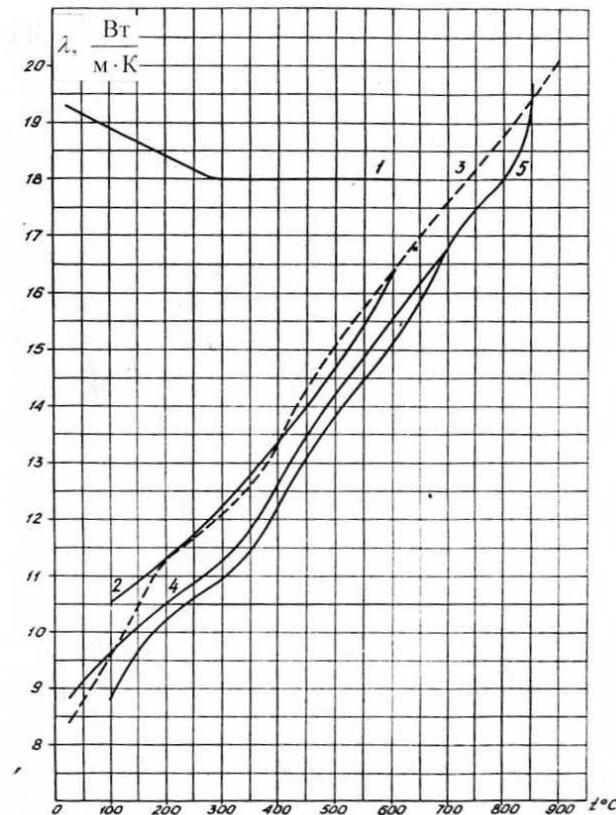


Рис. Б.5

Титан и его сплавы:

- 1 – технический титан ВТ1-00, ВТ1-0; 2 – сплав повышенной пластичности ОТ-4, ОТ4-1;
 3 – высокопрочный сплав ВТ23; 4 – сплав средней прочности ВТ5, ВТ6;
 5 – сплав средней прочности ВТ20.

[Оглавление](#)

Приложение В. Пример титульного листа отчета

Московский Государственный Технический Университет
им. Н.Э. Баумана
Факультет «Энергомашиностроение»
Кафедра Э1

**Пример отчёта
по домашнему заданию**

**«Расчет системы проточного охлаждения камеры
жидкостного ракетного двигателя»**

**по дисциплине:
«Теплозащита и прочность конструкций ЖРД»**

Выполнил –
Группа –
Проверил –
Результаты защиты –

20__ г.

[Оглавление](#)

Приложение Г. Пример оглавления отчета

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	.....
Основные условные обозначения.....	.....
1. Идентификация объекта расчета.....	.....
1.1. Исходные данные, дополнительные условия и ограничения.....	.....
1.2. Расчетная схема охлаждения.....	.....
1.3. Геометрические параметры камеры и тракта охлаждения.....	.....
2. Расчет тепловых потоков в камере.....	.....
2.1. Расчет конвективных тепловых потоков.....	.....
2.2. Расчет лучистых тепловых потоков.....	.....
3. Расчет теплоотдачи в тракте охлаждения.....	.....
3.1. Расчет распределения температуры и свойств охладителя по длине тракта...	.....
3.2. Расчет коэффициента теплоотдачи.....	.....
3.3. Расчет коэффициента оребрения.....	.....
4. Определение температурного состояния стенки.....	.....
4.1. Расчет $T_{ст.г}$ первого приближения.....	.....
4.2. Расчет $T_{ст.г}$ при наличии локальной завесы.....	.....
4.3. Определение $T_{ст.г}$ второго приближения.....	.....
4.4. Определение $T_{ст.охл}$.....	.....
5. Расчет потерь давления охладителя в тракте охлаждения.....	.....
Выводы.....	.....
Список использованных источников.....	.....
Приложения.....	.....