

**Препринт**  
**На правах рукописи**

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Факультет «Энергомашиностроение»  
Кафедра «Поршневые двигатели»

В.А. Зенкин

ОДНОМЕРНОЕ СТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ.

Электронное учебное издание

Методические указания  
по дисциплине «Газовая динамика»

Москва

(С) 2017 МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

## Оглавление

Оглавление.....	2
Условные обозначения и сокращения.....	3
Введение.....	3
1 Краткие теоретические сведения.....	4
Основные допущения.....	4
Базовая система уравнений.....	5
Параметры заторможенного потока и газодинамические функции.....	6
Связь параметров течения в различных сечениях канала.....	9
Истечение струй.....	10
Параметры стандартной атмосферы.....	10
2 Порядок выполнения домашнего задания.....	11
3 Примеры решения задач.....	12
Задача 1.....	12
Задача 2.....	14
Задача 3.....	15
4 Задачи для самостоятельной проработки.....	17
Задача 1.....	17
Задача 2.....	17
Задача 3.....	17
Задача 4.....	17
5 Требования к оформлению домашнего задания.....	18
6 Защита домашнего задания.....	18
Заключение.....	19
Список литературы.....	20
Приложение А – Графики газодинамических функций.....	21
Приложение Б – Преобразование размерностей некоторых величин.....	26
Давление.....	26
Температура.....	26

## Условные обозначения и сокращения

- $A$  – площадь поперечного сечения канала,  $\text{м}^2$ ;  
 $a$  – скорость звука,  $\text{м/с}$ ;  
 $G$  – массовый расход среды,  $\text{кг/с}$ ;  
 $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  
 $M$  – число Маха, –;  
 $m$  – коэффициент в уравнении расхода,  $\text{с}\cdot\sqrt{\text{К/м}}$ ;  
 $p$  – давление,  $\text{Па}$ ;  
 $R$  – газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $u$  – скорость среды,  $\text{м/с}$ ;  
 $z$  – высота в поле сил тяжести,  $\text{м}$ ;  
 $\gamma$  – показатель адиабаты, –;  
 $\lambda$  – приведенная скорость, –;  
 $\rho$  – плотность,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $\sigma$  – коэффициент сохранения полного давления, –;

### Индексы

- 1, 2 – обозначение сечения канала;  
 \* – параметры заторможенного потока;  
 $kr$  – параметр соответствует критическому режиму течения ( $M = 1$ ).

## Введение

Навыки выполнения инженерных расчетов и оценок являются одними из важнейших в профессиональной деятельности технического специалиста. Соответствующие методики многообразны и имеют свою специфику в зависимости от разделов науки, на которых они основываются. В области течений сжимаемой жидкости первоочередной интерес представляют расчеты одномерных течений, поскольку они могут быть рассчитаны аналитическими методами. Для выработки навыков решения задач первого типа предназначено домашнее задание «Одномерное стационарное течение».

Представленное учебное пособие содержит необходимый теоретический минимум для решения задач домашнего задания, примеры решенных задач, а так же

[«Оглавление»](#)

вспомогательный справочный материал. Для углубленного изучения вопроса автор рекомендует обращаться к разделам «Уравнения газовой динамики для единичной струйки», «Ускорение газового потока», «Одномерные течения газа», «Течения в соплах и диффузорах» основной учебной литературы по курсу «Механика жидкости и газа» [1].

Представленные в пособии примеры задач заимствованы из задачника [2].

## 1 Краткие теоретические сведения

### Основные допущения

Для приближенного расчета течения жидкости или газа по протяженным каналам допустимо отвлечься от сложных деталей этого движения и принять поток за *одномерный*, т.е. такой в котором величина и направление скорости, а так же термодинамические параметры среды (давление, плотность, температура, и т.д.) меняются только вдоль канала. Указанные параметры течения в данном случае следует понимать как осредненные, причем осреднение осуществлено таким образом, что в исходном и осредненном потоках одинаковы значения расхода газа, полной энергии и импульса. В таком случае балансовые соотношения, записываемые для одномерной постановки задачи, будут корректны и для реального потока.

Несмотря на высокий уровень абстракции, одномерный подход к описанию среды по сей день применяется для течений, где характерные расстояния течения среды значительно превышает размер проходного сечения, к этому случаю относятся различные газопроводы, в том числе газоздушный тракт комбинированного ДВС. Следует иметь в виду, что хотя уравнения допускают изменение площади проходного сечения по длине канала, они справедливы только если это изменение происходит плавно и достаточно медленно; в противном случае может произойти отрыв потока от стенок канала с возникновением пространственного течения и значительных потерь энергии на местном сопротивлении. Расчет местных сопротивлений может быть проведен с помощью соответствующей справочной литературы, но данный вопрос не входит в рамки данного пособия.

Течение газа, характеризующееся изменением в каждой точке пространства векторов скоростей и термодинамических параметров во времени, называют *нестационарным*. Если в каждой точке пространства указанные параметры не изменяются во времени, то течение газа называют *стационарным* или *установившимся*. Очевидно, турбулентное

[«Оглавление»](#)

течение является нестационарным по определению, однако для практических задач допустимо использовать для турбулентного потока уравнения для установившегося течения, при условии, что его осредненные по времени параметры не меняются. Турбулентность потока при этом учитывается при задании коэффициентов потерь, зависящих от режима течения.

Существует некоторая неоднозначность в определениях газодинамики и термодинамики.

В газовой динамике под *идеальным течением* понимается «*модель идеальной жидкости*», т.е. течение, в котором отсутствуют вязкость и теплопроводность. В случае если идеальное течение происходит при отсутствии теплообмена с окружающей средой (т.е. адиабатно) говорят об идеальном адиабатном или *изоэнтропном течении*.

Газ, идеальный в термодинамическом смысле, т.е. подчиняющийся термическому уравнению состояния вида

$$p = \rho RT,$$

обычно называют *термически совершенным газом*. Теплоемкость термически совершенного газа является функцией только температуры.

Второе – калорическое уравнение состояния позволяет ввести понятие о *калорически совершенном газе* – т.е. газе, для которого можно пренебречь зависимостью теплоемкости от температуры и считать ее константой. Модель термически и калорически совершенного газа широко применяется в газовой динамике и часто обозначается термином «*политропный газ*».

Следует отметить, что в литературе так же часто встречается словосочетание «идеальный газ», под которым может пониматься и модель идеальной жидкости, и термически совершенный, и политропный газ. В силу неоднозначности данного термина автор данного пособия не рекомендует его использовать.

Для всех задач данного домашнего задания справедливы допущения об одномерном стационарном течении политропного газа.

### **Базовая система уравнений**

Для стационарного одномерного течения, рассматривая два произвольных сечения 1 и 2, можно записать следующие уравнения.

Уравнение расхода

$$G_1 = A_1 \rho_1 u_1 = A_2 \rho_2 u_2 = G_2.$$

[«Оглавление»](#)

Данное уравнение выражает собой закон сохранения массы вещества. В случае стационарного течения величина плотности не изменяется для любого участка канала. Следовательно, количество массы между двумя произвольными сечениями остается неизменным. Для соблюдения закона сохранения массы необходимо, чтобы массовые расходы в двух сечениях равнялись друг другу.

Обобщенное уравнение Бернулли

$$-L = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \int_1^2 \frac{dp}{d\rho} + L_{fr},$$

где  $L$  – производимая газом работа, Дж/кг;

$L_{fr}$  – работа сил трения, Дж/кг.

Уравнение Бернулли представляет собой закон сохранения энергии в механической форме. Представленный интеграл называется интегралом Бернулли и его реальное значение определяется характером протекающего процесса. В зависимости от допущений, накладываемых на среду и протекающий процесс уравнение Бернулли может быть конкретизировано. Так, для случая несжимаемой жидкости ( $\rho = \text{const}$ ), в пренебрежении работой сил трения и отсутствии работы газа уравнение Бернулли приобретает хорошо знакомый вид

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \left( \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) = 0.$$

Для случая изоэнтропного течения сжимаемого газа, пренебрегая работой газа и изменением потенциальной энергии, можно записать

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left( \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) = 0.$$

Для изоэнтропного течения так же будет справедливо уравнение изоэнтропы

$$\frac{p_1}{\rho_1^\gamma} = \frac{p_2}{\rho_2^\gamma}.$$

Для связи давления и плотности газа с его температурой можно применять уравнение состояния совершенного газа

$$p = \rho RT.$$

Данное уравнение справедливо для в достаточной степени разреженных газов.

### **Параметры заторможенного потока и газодинамические функции**

Непосредственное использование базовой системы уравнений для решения практических задач часто является затруднительным, поэтому для расчетов сжимаемой

[«Оглавление»](#)

среды часто используются так называемые газодинамические функции. *Газодинамические функции* представляют собой безразмерные характеристики одномерного газового потока, выражающие связь его термогазодинамических параметров в виде простых функций безразмерных скоростей ( $M$ ,  $\lambda$ ). Например, семейство энергетических газодинамических функций (в которое входят функции  $\pi$ ,  $\tau$ ,  $\epsilon$ ) выражают связь статических параметров газа с *параметрами заторможенного потока*. Последние представляют собой термодинамические параметры газа, принимаемые им при изоэнтропном, энергоизолированном торможении до скорости равной нулю, т.е. соответствуют случаю, когда вся кинетическая энергия направленного движения переходит в тепловую энергию.

Наиболее распространенные стационарные газодинамические функции приведены ниже в таблице 1. При необходимости в приложении А можно найти основные из этих функций в графическом и табулированном виде для случая  $\gamma = 1,4$  (т.е. для воздуха).

Газодинамические функции зависят исключительно от свойств рассматриваемой среды; показатель адиабаты, газовая константа и коэффициент в формуле для определения расхода для некоторых распространенных газов приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Стационарные газодинамические функции

Функциональная зависимость от числа М	Функциональная зависимость от числа $\lambda$	Физический смысл зависимости
$M = \frac{u}{a} = \sqrt{\frac{\frac{2}{\gamma+1} \lambda^2}{1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2}}$	$\lambda = \frac{u}{a_{kr}} = \sqrt{\frac{\frac{\gamma+1}{2} M^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2}}$	Приведенная скорость
$a = \sqrt{\gamma RT}$	$a_{kr} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} RT^*}$	Скорость звука
$\tau = \frac{1}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2}$	$\tau = 1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2$	$\tau = \frac{T}{T^*}$
$\pi = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}}$	$\pi = \left(1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$	$\pi = \frac{p}{p^*}$
$\varepsilon = \frac{\pi}{\tau} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-\frac{1}{\gamma-1}}$	$\varepsilon = \frac{\pi}{\tau} = \left(1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$	$\varepsilon = \frac{\rho}{\rho^*}$
$q = M \cdot \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$	$q = \lambda \cdot \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \left(1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$	$G = m \cdot \frac{p^*}{\sqrt{T^*}} \cdot A \cdot q$
$y = \frac{q}{\pi} = M \cdot \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{2}}$	$y = \frac{q}{\pi} = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \frac{\lambda}{1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2}$	$G = m \cdot \frac{p}{\sqrt{T^*}} \cdot A \cdot y$
Не используется	$z = \lambda + \frac{1}{\lambda}$	$Gu + pA = \frac{\gamma+1}{2\gamma} Ga_{kr} z$
Не используется	$f = (\lambda^2 + 1) \left(1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$	$Gu + pA = p^* A \cdot f$
Не используется	$r = \frac{1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2}{1 + \lambda^2}$	$Gu + pA = \frac{p \cdot A}{r}$

[«Оглавление»](#)



Таблица 2 – Физические свойства газов

Газ	$\gamma$	R, Дж/кг·К	m, с·√К/м
Воздух	1,4	287	0,0405
Водород	1,4	4160	0,0106
Азот	1,4	295	0,0398
Гелий	1,66	2080	0,0161
Неон	1,66	416	0,0360
Аргон	1,66	208	0,0500

Для газов, отсутствующих в таблице величина  $m$  может быть определена по формуле

$$m = \sqrt{\gamma \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \sqrt{\frac{1}{R}}.$$

### Связь параметров течения в различных сечениях канала

Основная идея применения газодинамических функций при решении практических задач заключается в том, что параметры заторможенного потока в различных сечениях канала связаны друг с другом в зависимости от характера энергетического взаимодействия потока на данном участке с окружающей средой.

Для изоэнтропного течения (т.е. когда отсутствует теплообмен с внешней средой и отсутствует вязкое трение) параметры заторможенного потока неизменны.

Для энергоизолированного течения с потерями заторможенная температура не меняется, а полное давление уменьшается, что может быть охарактеризовано коэффициентами потерь, в частности коэффициентом сохранения полного давления  $\sigma < 1$ , который определяется как отношение полных давлений в двух сечениях. В практических задачах его величина может быть найдена из справочной литературы.

Таким образом, для двух сечений 1 и 2 для одномерного стационарного течения выполняются соотношения, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 – Связь заторможенных параметров

Изоэнтропное течение	Энергоизолированное течение с потерями ( $\sigma$ )
$T_1^* = T_2^* \Rightarrow T_1/\tau_1 = T_2/\tau_2$	$T_1^* = T_2^* \Rightarrow T_1/\tau_1 = T_2/\tau_2$
$p_1^* = p_2^* \Rightarrow p_1/\pi_1 = p_2/\pi_2$	$\sigma p_1^* = p_2^* \Rightarrow \sigma p_1/\pi_1 = p_2/\pi_2$
$G_1 = G_2 \Rightarrow A_1 q_1 = A_2 q_2$	$G_1 = G_2 \Rightarrow \sigma A_1 q_1 = A_2 q_2$

[«Оглавление»](#)

В случае если протекающий процесс происходит с обменом энергией с внешней средой, равенство заторможенных параметров не соблюдается, и для решения задач следует применять уравнение расхода, закон сохранения импульса и базовую систему уравнений. Подробное рассмотрение данного случая не входит в рамки данного учебного пособия.

### **Истечение струй**

При истечении струи из канала в окружающую среду параметры газа на срезе струи подчиняются определенным зависимостям, приведенным в таблице 4.

Таблица 4 – Истечение струи

	Сужающийся насадок	Сопло Лавалья
Докритический перепад давлений	Давление на срезе струи равно давлению окружающей среды.	
Сверхкритический перепад давлений	Режим запирания сопла. Давление на срезе струи равно давлению, соответствующему критическому перепаду; скорость истечения равна скорости звука.	Параметры на срезе струи определяются степенью расширения сопла Лавалья, и могут отличаться от параметров окружающей среды как в большую, так и в меньшую сторону.  Если в частном случае давление на срезе струи совпало с давлением окружающей среды, говорят, что сопло Лавалья работает на расчетном режиме.

### **Параметры стандартной атмосферы**

При решении практических задач часто возникает необходимость в задании термодинамических параметров внешних условий. Для определения изменения параметров воздуха с высотой в общем случае следует обращаться к ГОСТ 4401-81. В рамках домашнего задания допускается для небольших высот (до 20 км) принимать

[«Оглавление»](#)

допущение о равенстве геопотенциальной и геометрической высоты, а так же считать температуру изменяющейся линейно до высоты 11000 м по формуле

$$T(h) = 301,15 - 0,0065(h + 2000),$$

где  $h$  – геометрическая высота над уровнем моря, м.

Давление в данном диапазоне высот можно приближенно найти как

$$p(h) = 760 \cdot 133,322 \cdot \left(1 - \frac{0,0065 \cdot h}{288}\right)^{\frac{g}{0,0065 \cdot R}},$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

В интервале высот от 11 до 20 км допустимо принимать тропопаузу с постоянной температурой воздуха  $T = 216,65 \text{ К}$ , и давлением, подчиняющимся зависимости

$$p(h) = 169,6 \cdot 133,322 \cdot e^{\frac{-g \cdot (h-11000)}{R \cdot 216,5}}.$$

## 2 Порядок выполнения домашнего задания

Домашнее задание состоит из нескольких задач; обязательно решение всех задач соответствующего варианта. В общем случае может быть предложен следующий порядок решения задачи:

1. Изобразить расчетную схему задачи.
2. Обозначить на расчетной схеме рассматриваемые сечения, а так же известные и искомые параметры, введя соответствующие обозначения.
3. Переписать исходные данные задачи с учетом введенных обозначений, преобразовав размерности всех величин к системе СИ (см. приложение Б).
4. Записать уравнения связывающие между собой параметры газа.
5. Проверить равенство числа уравнений числу неизвестных для полученной системы.
6. Решить систему уравнений.
7. Подставив известные значения получить ответ в количественном виде.
8. Определить режим течения и проверить его согласованность с уравнениями, записанными на этапе 4.
9. Записать полученный ответ.

### 3 Примеры решения задач

#### Задача 1

Воздух из неограниченной емкости вытекает без потерь через простой суживающийся насадок в окружающую среду со стандартными значениями параметров  $p_0 = 10^5$  Па и  $T_0 = 293$  К. Определить параметры воздуха в емкости, если на срезе конического насадка заданы значения скорости  $W = 350$  м/с и температуры  $T = 500$  К.

Свойства среды (воздух):

$$\gamma = 1,4;$$

$$R = 287 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}.$$

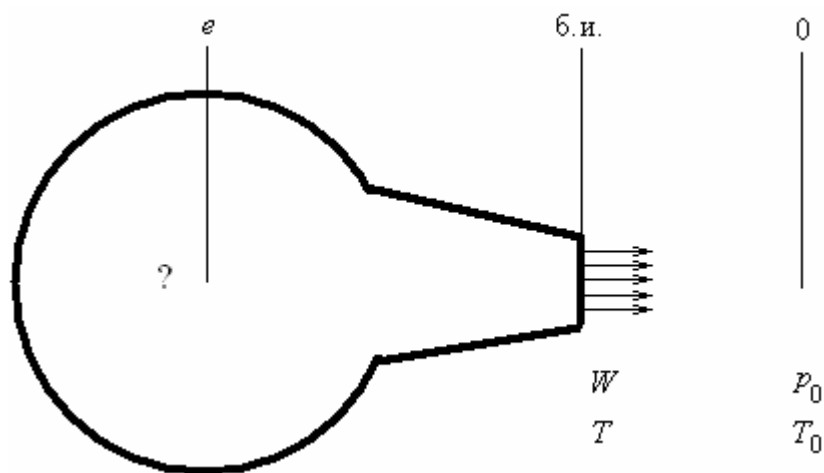


Рисунок 1 – Расчетная схема к задаче 1

Решение без применения газодинамических функций

1. Определим число Маха на срезе насадка:

$$a = \sqrt{\gamma RT} = 448 \text{ м/с};$$

$$M = \frac{W}{a} = 0,78.$$

Режим течения докритический.

2. Так как число Маха меньше единицы, давление на срезе сопла устанавливается равным статическому давлению в области истечения.

$$p = p_0 = 10^5 \text{ Па}.$$

3. Плотность на срезе сопла определяем из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$\rho = \frac{p}{RT} = 0,70 \text{ кг/м}^3.$$

[«Оглавление»](#)

4. Параметры на срезе сопла можно связать с параметрами в емкости по уравнению Бернулли и уравнению изоэнтропы:

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_e}{\rho_e} + 0 = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} + \frac{W^2}{2};$$

$$\frac{p_e}{\rho_e^\gamma} = \frac{p}{\rho^\gamma}.$$

Из второго уравнения можно выразить

$$\frac{p_e}{\rho_e} = \frac{p}{\rho^\gamma} \rho_e^{\gamma-1}$$

Подставляя это выражение в уравнение Бернулли получим

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho^\gamma} \rho_e^{\gamma-1} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} + \frac{W^2}{2}$$

откуда

$$\rho_e = \sqrt[\gamma-1]{\left(\frac{p}{\rho} + \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{W^2}{2}\right) \frac{\rho^\gamma}{p}} = 0,93 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда

$$p_e = p \frac{\rho_e^\gamma}{\rho^\gamma} = 1,50 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_e = \frac{p_e}{R \rho_e} = 561 \text{ К}.$$

Ответ

Параметры в емкости составляют

$$p_e = 1,50 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_e = 561 \text{ К}; \rho_e = 0,93 \text{ кг/м}^3.$$

Решение через газодинамические функции.

1. Определим число Маха на срезе насадка:

$$a = \sqrt{\gamma RT} = 448 \text{ м/с};$$

$$M = \frac{W}{a} = 0,78.$$

Режим течения докритический.

2. Так как число Маха меньше единицы, давление на срезе сопла устанавливается равным статическому давлению в области истечения.

$$p = p_0 = 10^5 \text{ Па}.$$

[«Оглавление»](#)

3. Заторможенные давления и температуры в емкости и на срезе одинаковые, следовательно:

$$p_e = p_e^* = p^* = \frac{P}{\pi(M)} = 1,50 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_e = T_e^* = T^* = \frac{T}{\tau(M)} = 561 \text{ К}.$$

4. Из уравнения состояния определим плотность в емкости:

$$\rho_e = \frac{P_e}{RT_e} = 0,93 \text{ кг/м}^3.$$

Ответ

Параметры в емкости составляют

$$p_e = 1,50 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_e = 561 \text{ К}; \rho_e = 0,93 \text{ кг/м}^3.$$

### Задача 2

Местная звуковая скорость на верхней поверхности крыла самолета ( $M_{kr} = 1$ ) наступает при относительной скорости полета  $M_{fly} = 0,85$ . С какой максимальной скоростью может лететь самолет на высоте  $h = 8000$  м, не превышая критической скорости полета? Определить температуру потока, при которой местная скорость равна скорости звука.

Свойства среды (воздух):

$$\gamma = 1,4;$$

$$R = 287 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}.$$

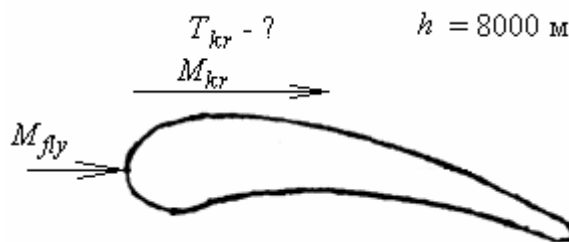


Рисунок 2 – Расчетная схема к задаче 2

Решение

1. На высоте 8000 м согласно ГОСТ о стандартной атмосфере температура воздуха составляет

$$T = 301,15 - 0,0065(h + 2000) = 236 \text{ К}.$$

[«Оглавление»](#)

Скорость звука

$$a = \sqrt{\gamma RT} = 309 \text{ м/с}.$$

2. Следовательно, предельную скорость движения самолета можно определить как

$$u_{fly} = M_{fly} \cdot a = 263 \text{ м/с}.$$

3. При данной скорости полета заторможенная температура составит

$$T^* = \frac{T}{\tau(M_{fly})} = 270 \text{ К}.$$

Так как скорость обтекания крылового профиля в отдельных участках превосходит скорость движения самолета, число Маха в них по условию задачи равно единице и температура опустится ниже температуры среды до величины

$$T_{kr} = T^* \tau(1) = 225 \text{ К}.$$

Ответ

$$u_{fly} = 263 \text{ м/с}; T_{kr} = 225 \text{ К}.$$

### Задача 3

В начальном участке трубы переменного сечения известны параметры воздушного потока:  $u_1 = 150 \text{ м/с}$ ,  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $T_1 = 350 \text{ К}$ . Определить параметры потока во втором сечении, если известны диаметры трубопровода в сечениях  $D_1 = 1,8 \text{ см}$ ,  $D_2 = 2,1 \text{ см}$ . Течение газа считать изоэнтропным.

Свойства среды (воздух):

$$\gamma = 1,4;$$

$$R = 287 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

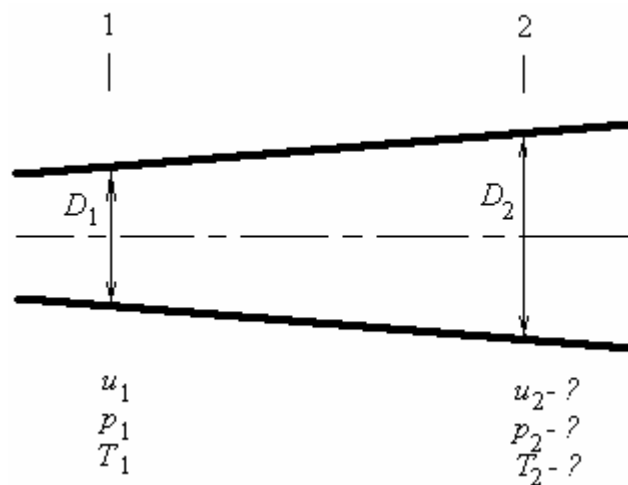


Рисунок 3 – Расчетная схема к задаче 3

Решение

1. Определим недостающие параметры газа в первом сечении:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = 1,00 \text{ кг/м}^3;$$

$$a_1 = \sqrt{\gamma RT_1} = 375 \text{ м/с};$$

$$M_1 = \frac{u_1}{a_1} = 0,4.$$

2. Из условия равенства расходов воздуха через сечения 1 и 2 найдем число Маха во втором сечении:

$$G = m \cdot \frac{p_1^*}{\sqrt{T_1^*}} \cdot A_1 \cdot q(M_1) = m \cdot \frac{p_2^*}{\sqrt{T_2^*}} \cdot A_2 \cdot q(M_2);$$

Так как в силу изэнтропности течения  $p_1^* = p_2^*$  и  $T_1^* = T_2^*$ , можно записать

$$A_1 \cdot q(M_1) = A_2 \cdot q(M_2)$$

или

$$q(M_2) = \frac{A_1}{A_2} q(M_1) = \frac{D_1^2}{D_2^2} q(M_1) = 0,462.$$

Как следует из таблицы газодинамических функций, данное значение  $q$  соответствует числу Маха

$$M_2 = 0,28.$$

3. Зная число Маха во втором сечении, найдем параметры газа из равенства заторможенных параметров.

$$p_1^* = p_2^*;$$

$$p_1/\pi(M_1) = p_2/\pi(M_2);$$

$$p_2 = p_1 \frac{\pi(M_2)}{\pi(M_1)} = 1,057 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Аналогично для температуры и плотности:

$$T_2 = T_1 \frac{\tau(M_2)}{\tau(M_1)} = 356 \text{ К};$$

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{\varepsilon(M_2)}{\varepsilon(M_1)} = 1,036 \text{ кг/м}^3.$$

4. Скорость звука во втором сечении

$$a_2 = \sqrt{\gamma RT_2} = 378 \text{ м/с}.$$

[«Оглавление»](#)



Следовательно, скорость течения

$$u_2 = a_2 M_2 = 106 \text{ м/с}.$$

Ответ:

$$p_2 = 1,057 \cdot 10^6 \text{ Па}; \rho_2 = 1,036 \text{ кг/м}^3; T_2 = 356 \text{ К}; u_2 = 106 \text{ м/с}.$$

## 4 Задачи для самостоятельной проработки

### Задача 1

Самолет летит на высоте 5000 м. Насадок полного давления, установленный на самолете, показал давление 684 мм рт. ст. (давление заторможенного потока). Какова скорость самолета и на сколько ее надо увеличить, чтобы лететь со скоростью, равной скорости звука на этой высоте?

### Задача 2

Определить разрежение, число Маха и температуру в рабочей части аэродинамической трубы, работающей на расширении атмосферного воздуха ( $B_0 = 760$  мм рт. ст. и  $T_0 = 288$  К) если известна скорость потока в рабочей части аэродинамической трубы  $u = 610$  м/с.

### Задача 3

Рассчитать и построить график изменения давления потока на срезе простого конического идеального сопла при изменении полного давления на входе в сопло от  $10^5$  до  $10^6$  Па. Из сопла вытекает воздух в среду с давлением 735 мм рт. ст.

### Задача 4

Действительное число Маха на выходе из сопла составляет 2,61, при этом потери полного давления в сопле оценивают коэффициентом  $\sigma = p_d^*/p_c^* = 0,92$ . Определить коэффициент скорости сопла  $\varphi = u_d/u$ , считая, что процессы расширения газа в сопле в идеальном и реальном случаях происходят до одного и того же давления.

## 5 Требования к оформлению домашнего задания

Домашнее задание может быть оформлено как с использованием электронных средств, так и «от руки». При рукописном оформлении следует следить за аккуратностью оформления и разборчивостью текста. При электронном наборе следует использовать шрифт не менее 14 кегля. Допускается использование систем компьютерной математики (*MathCAD*, *MatLab*, *Maple* и т.д.) с сохранением оригинального синтаксиса, однако решение должно быть надлежащим образом прокомментировано и структурировано.

Обязательные компоненты домашнего задания:

- титульный лист с подписью автора;
- текст задачи в исходной форме;
- расчетная схема, с указанными на ней обозначениями;
- условие задачи с указанными введенными обозначениями;
- пронумерованная последовательность решения задачи;
- ответ с обязательным указанием размерностей полученных величин.

Предпочтительно не сшивать домашнее задание, а соединять листы скрепкой или помещать в прозрачный файл.

## 6 Защита домашнего задания

Защита домашнего задания проводится в письменном виде по приведенному ниже списку контрольных вопросов. Успешная защита подразумевает корректный ответ на четыре вопроса из пяти.

- В чем заключается допущение об одномерности течения?
- Для каких задач используются одномерные модели течения?
- В чем заключается отличие между реальным течением и его одномерным представлением при течении газа в прямой протяженной трубе?
- Может ли изменяться площадь сечения трубы по ее длине при использовании одномерного представления?
- Какое течение называется стационарным?

[«Оглавление»](#)

- Что подразумевается под стационарным турбулентным течением?
- Какой газ называется (термически) совершенным?
- Какое понятие является более широким: «совершенный газ» или «политропный газ»?
- Какой газ называется политропным?
- Какое течение называется адиабатным?
- Какие допущения принимаются для изоэнтропного течения газа?
- Перечислите три уравнения, описывающие одномерное стационарное течение идеального газа.
- Поясните, почему уравнение равенства расходов в сечениях неверно для нестационарного течения.
- При каких допущениях справедливо уравнение Бернулли?
- Как изменяются скорость и статическое давление при течении газа в диффузоре?
- Как изменяются скорость и статическое давление при течении газа в конфузоре?
- Чему равны параметры газа на срезе насадка при истечении затопленной струи?
- Что такое параметры заторможенного потока?
- Что такое число Маха?
- Что такое газодинамические функции?

## **Заключение**

Представленные в данном пособии методики являются базовыми для расчета течений сжимаемой жидкости. С их помощью может быть решен ряд практических задач, например, таких как определение расхода через клапан поршневого двигателя, температуры заторможенного потока, вызывающей аэродинамический нагрев при полете летательного аппарата в воздухе, или закона изменения термодинамических параметров по длине канала. Основным фактором, определяющим точность данных методов, является корректное задание коэффициентов потерь на протяженных участках и в местных сопротивлениях. В случае наличия достоверных данных об этих значениях расчеты могут быть проведены с приемлемой для инженерной практики точностью. Основным источником для определения данных коэффициентов является справочная литература. Поскольку методология приведения потерь может отличаться в разных источниках, в

[«Оглавление»](#)

данном пособии этот вопрос опущен и при работе следует обращаться к указаниям, приведенным непосредственно в справочной литературе.

### **Список литературы**

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1: Учеб. руководство: Для вузов. - 5-е изд., перераб и доп. - М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. лит, 1991. - 600 с. - ISBN 5-02-014015-5
2. Степчков, А.А. Задачник по гидрогазовой динамике / А.А. Степчков. М.: Машиностроение, 1980. 183 с.
3. Таблицы газодинамических функций. Справочное пособие / Сост.: Ф.И. Лухтура. – Мариуполь: ПГТУ, 2007. – 152 с.
4. Давидсон, В.Е. Основы гидрогазодинамики в примерах и задачах: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В.Е. Давидсон. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 320 с.

## Приложение А – Стационарные газодинамические функции

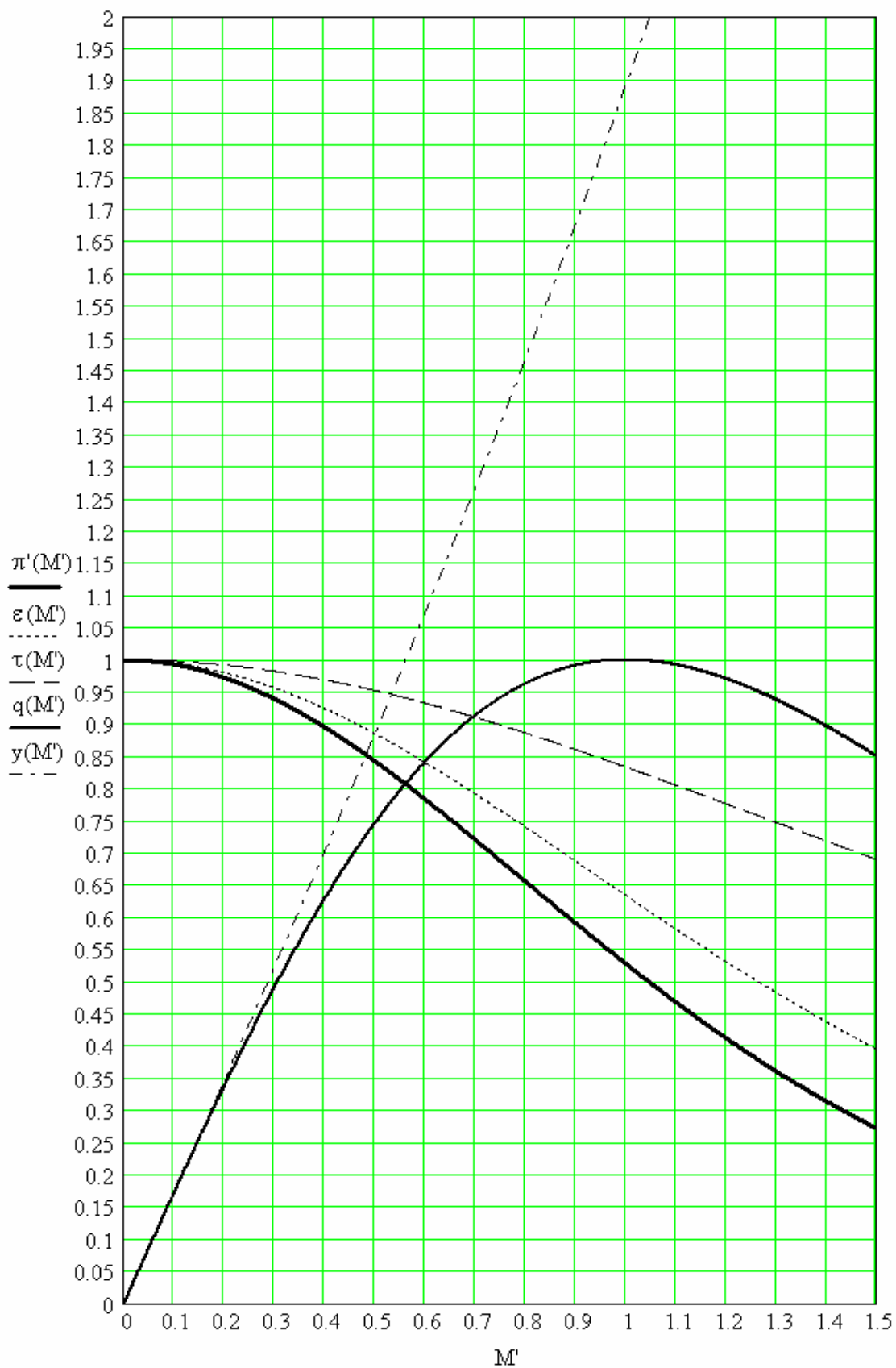


Рисунок А.1 – Основные газодинамические функции от числа Маха ( $\gamma = 1,4$ )

[«Оглавление»](#)

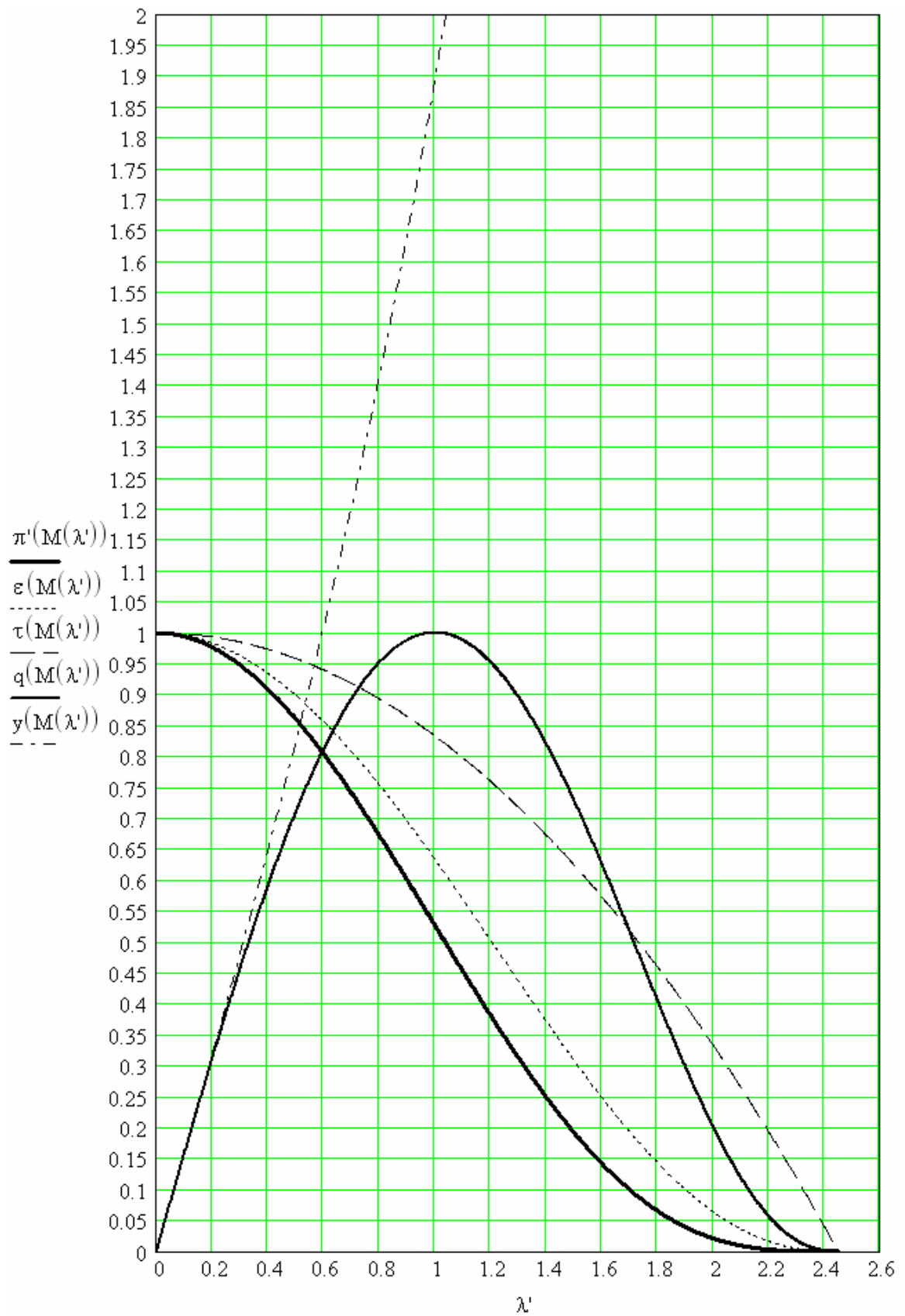


Рисунок А.2 – Основные газодинамические функции от числа  $\lambda$  ( $\gamma = 1,4$ )

[«Оглавление»](#)

Таблица А.1 – Основные газодинамические функции ( $\gamma = 1,4$ )

М	$\lambda$	$\tau$	$\pi$	$q$	М	$\lambda$	$\tau$	$\pi$	$q$
0,00	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,59	0,6249	0,9349	0,7901	0,8331
0,01	0,0110	1,0000	0,9999	0,0173	0,60	0,6348	0,9328	0,7840	0,8416
0,02	0,0219	0,9999	0,9997	0,0346	0,61	0,6447	0,9307	0,7778	0,8499
0,03	0,0329	0,9998	0,9994	0,0518	0,62	0,6545	0,9286	0,7716	0,8579
0,04	0,0438	0,9997	0,9989	0,0691	0,63	0,6643	0,9265	0,7654	0,8657
0,05	0,0548	0,9995	0,9983	0,0863	0,64	0,6740	0,9243	0,7591	0,8732
0,06	0,0657	0,9993	0,9975	0,1035	0,65	0,6837	0,9221	0,7528	0,8806
0,07	0,0766	0,9990	0,9966	0,1206	0,66	0,6934	0,9199	0,7465	0,8877
0,08	0,0876	0,9987	0,9955	0,1377	0,67	0,7031	0,9176	0,7401	0,8945
0,09	0,0985	0,9984	0,9944	0,1548	0,68	0,7127	0,9153	0,7338	0,9012
0,10	0,1094	0,9980	0,9930	0,1718	0,69	0,7223	0,9131	0,7274	0,9076
0,11	0,1204	0,9976	0,9916	0,1887	0,70	0,7318	0,9107	0,7209	0,9138
0,12	0,1313	0,9971	0,9900	0,2056	0,71	0,7413	0,9084	0,7145	0,9197
0,13	0,1422	0,9966	0,9883	0,2224	0,72	0,7508	0,9061	0,7080	0,9254
0,14	0,1531	0,9961	0,9864	0,2391	0,73	0,7602	0,9037	0,7016	0,9309
0,15	0,1639	0,9955	0,9844	0,2557	0,74	0,7696	0,9013	0,6951	0,9362
0,16	0,1748	0,9949	0,9823	0,2723	0,75	0,7789	0,8989	0,6886	0,9412
0,17	0,1857	0,9943	0,9800	0,2887	0,76	0,7883	0,8964	0,6821	0,9461
0,18	0,1965	0,9936	0,9776	0,3051	0,77	0,7975	0,8940	0,6756	0,9507
0,19	0,2074	0,9928	0,9751	0,3213	0,78	0,8068	0,8915	0,6691	0,9551
0,20	0,2182	0,9921	0,9725	0,3374	0,79	0,8160	0,8890	0,6625	0,9592
0,21	0,2290	0,9913	0,9697	0,3534	0,80	0,8251	0,8865	0,6560	0,9632
0,22	0,2398	0,9904	0,9668	0,3693	0,81	0,8343	0,8840	0,6495	0,9669
0,23	0,2506	0,9895	0,9638	0,3851	0,82	0,8433	0,8815	0,6430	0,9704
0,24	0,2614	0,9886	0,9607	0,4007	0,83	0,8524	0,8789	0,6365	0,9737
0,25	0,2722	0,9877	0,9575	0,4162	0,84	0,8614	0,8763	0,6300	0,9769
0,26	0,2829	0,9867	0,9541	0,4315	0,85	0,8704	0,8737	0,6235	0,9798
0,27	0,2936	0,9856	0,9506	0,4467	0,86	0,8793	0,8711	0,6170	0,9824
0,28	0,3043	0,9846	0,9470	0,4618	0,87	0,8882	0,8685	0,6106	0,9849
0,29	0,3150	0,9835	0,9433	0,4767	0,88	0,8970	0,8659	0,6041	0,9872
0,30	0,3257	0,9823	0,9395	0,4914	0,89	0,9058	0,8632	0,5977	0,9893
0,31	0,3364	0,9811	0,9355	0,5059	0,90	0,9146	0,8606	0,5913	0,9912
0,32	0,3470	0,9799	0,9315	0,5203	0,91	0,9233	0,8579	0,5849	0,9929
0,33	0,3576	0,9787	0,9274	0,5345	0,92	0,9320	0,8552	0,5785	0,9944
0,34	0,3682	0,9774	0,9231	0,5486	0,93	0,9407	0,8525	0,5721	0,9958
0,35	0,3788	0,9761	0,9188	0,5624	0,94	0,9493	0,8498	0,5658	0,9969
0,36	0,3893	0,9747	0,9143	0,5761	0,95	0,9578	0,8471	0,5595	0,9979
0,37	0,3999	0,9733	0,9098	0,5896	0,96	0,9663	0,8444	0,5532	0,9986
0,38	0,4104	0,9719	0,9052	0,6029	0,97	0,9748	0,8416	0,5469	0,9992
0,39	0,4209	0,9705	0,9004	0,6160	0,98	0,9833	0,8389	0,5407	0,9997
0,40	0,4313	0,9690	0,8956	0,6289	0,99	0,9916	0,8361	0,5345	0,9999
0,41	0,4418	0,9675	0,8907	0,6416	1,00	1,0000	0,8333	0,5283	1,0000
0,42	0,4522	0,9659	0,8857	0,6541	1,01	1,0083	0,8306	0,5221	0,9999
0,43	0,4626	0,9643	0,8807	0,6663	1,02	1,0166	0,8278	0,5160	0,9997
0,44	0,4729	0,9627	0,8755	0,6784	1,03	1,0248	0,8250	0,5099	0,9993
0,45	0,4833	0,9611	0,8703	0,6903	1,04	1,0330	0,8222	0,5039	0,9987
0,46	0,4936	0,9594	0,8650	0,7019	1,05	1,0411	0,8193	0,4979	0,9980
0,47	0,5038	0,9577	0,8596	0,7134	1,06	1,0492	0,8165	0,4919	0,9971
0,48	0,5141	0,9559	0,8541	0,7246	1,07	1,0573	0,8137	0,4860	0,9961
0,49	0,5243	0,9542	0,8486	0,7356	1,08	1,0653	0,8108	0,4800	0,9949
0,50	0,5345	0,9524	0,8430	0,7464	1,09	1,0733	0,8080	0,4742	0,9936
0,51	0,5447	0,9506	0,8374	0,7569	1,10	1,0812	0,8052	0,4684	0,9921
0,52	0,5548	0,9487	0,8317	0,7672	1,11	1,0891	0,8023	0,4626	0,9905
0,53	0,5649	0,9468	0,8259	0,7773	1,12	1,0970	0,7994	0,4568	0,9888
0,54	0,5750	0,9449	0,8201	0,7872	1,13	1,1048	0,7966	0,4511	0,9870
0,55	0,5851	0,9430	0,8142	0,7968	1,14	1,1126	0,7937	0,4455	0,9850
0,56	0,5951	0,9410	0,8082	0,8063	1,15	1,1203	0,7908	0,4398	0,9828
0,57	0,6051	0,9390	0,8022	0,8154	1,16	1,1280	0,7879	0,4343	0,9806
0,58	0,6150	0,9370	0,7962	0,8244	1,17	1,1356	0,7851	0,4287	0,9782

[«Оглавление»](#)

## Продолжение таблицы А.1

М	$\lambda$	$\tau$	$\pi$	$\rho$	М	$\lambda$	$\tau$	$\pi$	$\rho$
1,18	1,1432	0,7822	0,4232	0,9758	1,77	1,5203	0,6148	0,1822	0,7107
1,19	1,1508	0,7793	0,4178	0,9732	1,78	1,5256	0,6121	0,1794	0,7054
1,20	1,1583	0,7764	0,4124	0,9705	1,79	1,5308	0,6095	0,1767	0,7002
1,21	1,1658	0,7735	0,4070	0,9676	1,80	1,5360	0,6068	0,1740	0,6949
1,22	1,1732	0,7706	0,4017	0,9647	1,81	1,5411	0,6041	0,1714	0,6897
1,23	1,1806	0,7677	0,3964	0,9617	1,82	1,5463	0,6015	0,1688	0,6845
1,24	1,1879	0,7648	0,3912	0,9586	1,83	1,5514	0,5989	0,1662	0,6792
1,25	1,1952	0,7619	0,3861	0,9553	1,84	1,5564	0,5963	0,1637	0,6740
1,26	1,2025	0,7590	0,3809	0,9520	1,85	1,5614	0,5936	0,1612	0,6688
1,27	1,2097	0,7561	0,3759	0,9486	1,86	1,5664	0,5910	0,1587	0,6636
1,28	1,2169	0,7532	0,3708	0,9451	1,87	1,5714	0,5884	0,1563	0,6584
1,29	1,2240	0,7503	0,3658	0,9415	1,88	1,5763	0,5859	0,1539	0,6533
1,30	1,2311	0,7474	0,3609	0,9378	1,89	1,5812	0,5833	0,1516	0,6481
1,31	1,2382	0,7445	0,3560	0,9341	1,90	1,5861	0,5807	0,1492	0,6430
1,32	1,2452	0,7416	0,3512	0,9302	1,91	1,5909	0,5782	0,1470	0,6379
1,33	1,2522	0,7387	0,3464	0,9263	1,92	1,5957	0,5756	0,1447	0,6328
1,34	1,2591	0,7358	0,3417	0,9223	1,93	1,6005	0,5731	0,1425	0,6277
1,35	1,2660	0,7329	0,3370	0,9182	1,94	1,6052	0,5705	0,1403	0,6226
1,36	1,2729	0,7300	0,3323	0,9141	1,95	1,6099	0,5680	0,1381	0,6175
1,37	1,2797	0,7271	0,3277	0,9099	1,96	1,6146	0,5655	0,1360	0,6125
1,38	1,2864	0,7242	0,3232	0,9056	1,97	1,6192	0,5630	0,1339	0,6075
1,39	1,2932	0,7213	0,3187	0,9013	1,98	1,6239	0,5605	0,1318	0,6025
1,40	1,2999	0,7184	0,3142	0,8969	1,99	1,6284	0,5580	0,1298	0,5975
1,41	1,3065	0,7155	0,3098	0,8925	2,00	1,6330	0,5556	0,1278	0,5926
1,42	1,3131	0,7126	0,3055	0,8880	2,01	1,6375	0,5531	0,1258	0,5877
1,43	1,3197	0,7097	0,3012	0,8834	2,02	1,6420	0,5506	0,1239	0,5828
1,44	1,3262	0,7069	0,2969	0,8788	2,03	1,6465	0,5482	0,1220	0,5779
1,45	1,3327	0,7040	0,2927	0,8742	2,04	1,6509	0,5458	0,1201	0,5730
1,46	1,3392	0,7011	0,2886	0,8695	2,05	1,6553	0,5433	0,1182	0,5682
1,47	1,3456	0,6982	0,2845	0,8647	2,06	1,6597	0,5409	0,1164	0,5634
1,48	1,3520	0,6954	0,2804	0,8599	2,07	1,6640	0,5385	0,1146	0,5586
1,49	1,3583	0,6925	0,2764	0,8551	2,08	1,6683	0,5361	0,1128	0,5538
1,50	1,3646	0,6897	0,2724	0,8502	2,09	1,6726	0,5337	0,1111	0,5491
1,51	1,3708	0,6868	0,2685	0,8453	2,10	1,6769	0,5313	0,1094	0,5444
1,52	1,3770	0,6840	0,2646	0,8404	2,11	1,6811	0,5290	0,1077	0,5397
1,53	1,3832	0,6811	0,2608	0,8354	2,12	1,6853	0,5266	0,1060	0,5350
1,54	1,3894	0,6783	0,2570	0,8304	2,13	1,6895	0,5243	0,1043	0,5304
1,55	1,3955	0,6754	0,2533	0,8254	2,14	1,6936	0,5219	0,1027	0,5258
1,56	1,4015	0,6726	0,2496	0,8203	2,15	1,6977	0,5196	0,1011	0,5212
1,57	1,4075	0,6698	0,2459	0,8152	2,16	1,7018	0,5173	0,0996	0,5167
1,58	1,4135	0,6670	0,2423	0,8101	2,17	1,7059	0,5150	0,0980	0,5122
1,59	1,4195	0,6642	0,2388	0,8050	2,18	1,7099	0,5127	0,0965	0,5077
1,60	1,4254	0,6614	0,2353	0,7998	2,19	1,7139	0,5104	0,0950	0,5032
1,61	1,4313	0,6586	0,2318	0,7947	2,20	1,7179	0,5081	0,0935	0,4988
1,62	1,4371	0,6558	0,2284	0,7895	2,21	1,7219	0,5059	0,0921	0,4944
1,63	1,4429	0,6530	0,2250	0,7843	2,22	1,7258	0,5036	0,0906	0,4900
1,64	1,4487	0,6502	0,2217	0,7791	2,23	1,7297	0,5014	0,0892	0,4856
1,65	1,4544	0,6475	0,2184	0,7739	2,24	1,7336	0,4991	0,0878	0,4813
1,66	1,4601	0,6447	0,2151	0,7686	2,25	1,7374	0,4969	0,0865	0,4770
1,67	1,4657	0,6419	0,2119	0,7634	2,26	1,7412	0,4947	0,0851	0,4727
1,68	1,4713	0,6392	0,2088	0,7581	2,27	1,7450	0,4925	0,0838	0,4685
1,69	1,4769	0,6364	0,2057	0,7529	2,28	1,7488	0,4903	0,0825	0,4643
1,70	1,4825	0,6337	0,2026	0,7476	2,29	1,7526	0,4881	0,0812	0,4601
1,71	1,4880	0,6310	0,1996	0,7423	2,30	1,7563	0,4859	0,0800	0,4560
1,72	1,4935	0,6283	0,1966	0,7371	2,31	1,7600	0,4837	0,0787	0,4519
1,73	1,4989	0,6256	0,1936	0,7318	2,32	1,7637	0,4816	0,0775	0,4478
1,74	1,5043	0,6229	0,1907	0,7265	2,33	1,7673	0,4794	0,0763	0,4437
1,75	1,5097	0,6202	0,1878	0,7212	2,34	1,7709	0,4773	0,0751	0,4397
1,76	1,5150	0,6175	0,1850	0,7160	2,35	1,7745	0,4752	0,0740	0,4357

[«Оглавление»](#)



## Окончание таблицы А.1

М	$\lambda$	$\tau$	$\pi$	$\rho$	М	$\lambda$	$\tau$	$\pi$	$\rho$
2.36	1,7781	0,4731	0,0728	0,4317	2,95	1,9521	0,3649	0,0293	0,2477
2.37	1,7817	0,4709	0,0717	0,4278	2,96	1,9545	0,3633	0,0289	0,2453
2.38	1,7852	0,4688	0,0706	0,4239	2,97	1,9569	0,3618	0,0285	0,2430
2.39	1,7887	0,4668	0,0695	0,4200	2,98	1,9593	0,3602	0,0281	0,2407
2.40	1,7922	0,4647	0,0684	0,4161	2,99	1,9616	0,3587	0,0276	0,2384
2.41	1,7956	0,4626	0,0673	0,4123	3,00	1,9640	0,3571	0,0272	0,2362
2.42	1,7991	0,4606	0,0663	0,4085	3,01	1,9663	0,3556	0,0268	0,2339
2.43	1,8025	0,4585	0,0653	0,4048	3,02	1,9686	0,3541	0,0264	0,2317
2.44	1,8059	0,4565	0,0643	0,4010	3,03	1,9709	0,3526	0,0260	0,2295
2.45	1,8092	0,4544	0,0633	0,3973	3,04	1,9732	0,3511	0,0256	0,2273
2.46	1,8126	0,4524	0,0623	0,3937	3,05	1,9755	0,3496	0,0253	0,2252
2.47	1,8159	0,4504	0,0613	0,3900	3,06	1,9777	0,3481	0,0249	0,2230
2.48	1,8192	0,4484	0,0604	0,3864	3,07	1,9800	0,3466	0,0245	0,2209
2.49	1,8225	0,4464	0,0594	0,3828	3,08	1,9822	0,3452	0,0242	0,2188
2.50	1,8257	0,4444	0,0585	0,3793	3,09	1,9844	0,3437	0,0238	0,2168
2.51	1,8290	0,4425	0,0576	0,3757	3,10	1,9866	0,3422	0,0234	0,2147
2.52	1,8322	0,4405	0,0567	0,3722	3,11	1,9888	0,3408	0,0231	0,2127
2.53	1,8354	0,4386	0,0559	0,3688	3,12	1,9910	0,3393	0,0228	0,2107
2.54	1,8386	0,4366	0,0550	0,3653	3,13	1,9931	0,3379	0,0224	0,2087
2.55	1,8417	0,4347	0,0542	0,3619	3,14	1,9953	0,3365	0,0221	0,2067
2.56	1,8448	0,4328	0,0533	0,3585	3,15	1,9974	0,3351	0,0218	0,2048
2.57	1,8479	0,4309	0,0525	0,3552	3,16	1,9995	0,3337	0,0215	0,2028
2.58	1,8510	0,4289	0,0517	0,3519	3,17	2,0016	0,3323	0,0211	0,2009
2.59	1,8541	0,4271	0,0509	0,3486	3,18	2,0037	0,3309	0,0208	0,1990
2.60	1,8571	0,4252	0,0501	0,3453	3,19	2,0058	0,3295	0,0205	0,1971
2.61	1,8602	0,4233	0,0493	0,3421	3,20	2,0079	0,3281	0,0202	0,1953
2.62	1,8632	0,4214	0,0486	0,3389	3,21	2,0099	0,3267	0,0199	0,1934
2.63	1,8662	0,4196	0,0478	0,3357	3,22	2,0119	0,3253	0,0196	0,1916
2.64	1,8691	0,4177	0,0471	0,3325	3,23	2,0140	0,3240	0,0194	0,1898
2.65	1,8721	0,4159	0,0464	0,3294	3,24	2,0160	0,3226	0,0191	0,1880
2.66	1,8750	0,4141	0,0457	0,3263	3,25	2,0180	0,3213	0,0188	0,1863
2.67	1,8779	0,4122	0,0450	0,3232	3,26	2,0200	0,3199	0,0185	0,1845
2.68	1,8808	0,4104	0,0443	0,3202	3,27	2,0220	0,3186	0,0183	0,1828
2.69	1,8837	0,4086	0,0436	0,3172	3,28	2,0239	0,3173	0,0180	0,1810
2.70	1,8865	0,4068	0,0430	0,3142	3,29	2,0259	0,3160	0,0177	0,1793
2.71	1,8894	0,4051	0,0423	0,3112	3,30	2,0278	0,3147	0,0175	0,1777
2.72	1,8922	0,4033	0,0417	0,3083	3,31	2,0297	0,3134	0,0172	0,1760
2.73	1,8950	0,4015	0,0410	0,3054	3,32	2,0317	0,3121	0,0170	0,1743
2.74	1,8978	0,3998	0,0404	0,3025	3,33	2,0336	0,3108	0,0167	0,1727
2.75	1,9005	0,3980	0,0398	0,2996	3,34	2,0355	0,3095	0,0165	0,1711
2.76	1,9033	0,3963	0,0392	0,2968	3,35	2,0373	0,3082	0,0163	0,1695
2.77	1,9060	0,3945	0,0386	0,2940	3,36	2,0392	0,3069	0,0160	0,1679
2.78	1,9087	0,3928	0,0380	0,2912	3,37	2,0411	0,3057	0,0158	0,1663
2.79	1,9114	0,3911	0,0374	0,2884	3,38	2,0429	0,3044	0,0156	0,1648
2.80	1,9140	0,3894	0,0368	0,2857	3,39	2,0447	0,3032	0,0153	0,1632
2.81	1,9167	0,3877	0,0363	0,2830	3,40	2,0466	0,3019	0,0151	0,1617
2.82	1,9193	0,3860	0,0357	0,2803	3,41	2,0484	0,3007	0,0149	0,1602
2.83	1,9219	0,3844	0,0352	0,2777	3,42	2,0502	0,2995	0,0147	0,1587
2.84	1,9246	0,3827	0,0347	0,2750	3,43	2,0520	0,2982	0,0145	0,1572
2.85	1,9271	0,3810	0,0341	0,2724	3,44	2,0537	0,2970	0,0143	0,1558
2.86	1,9297	0,3794	0,0336	0,2698	3,45	2,0555	0,2958	0,0141	0,1543
2.87	1,9323	0,3777	0,0331	0,2673	3,46	2,0573	0,2946	0,0139	0,1529
2.88	1,9348	0,3761	0,0326	0,2648	3,47	2,0590	0,2934	0,0137	0,1515
2.89	1,9373	0,3745	0,0321	0,2622	3,48	2,0607	0,2922	0,0135	0,1501
2.90	1,9398	0,3729	0,0317	0,2598	3,49	2,0625	0,2910	0,0133	0,1487
2.91	1,9423	0,3712	0,0312	0,2573	3,50	2,0642	0,2899	0,0131	0,1473
2.92	1,9448	0,3696	0,0307	0,2549	3,51	2,0659	0,2887	0,0129	0,1459
2.93	1,9472	0,3681	0,0302	0,2524	3,52	2,0676	0,2875	0,0127	0,1446
2.94	1,9497	0,3665	0,0298	0,2500	3,53	2,0693	0,2864	0,0126	0,1432

[«Оглавление»](#)

**Приложение Б – Преобразование размерностей некоторых величин****Давление**

$$1 \text{ мм. рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм. вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па}$$

$$1 \text{ кг/см}^2 = 98066,5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ бар} = 100000 \text{ Па}$$

**Температура**

$$1^\circ \text{C} = 1 \text{ K} = \frac{5}{9} ^\circ \text{F}$$

$$T_C = T_K - 273.15 \text{ K} = \frac{5}{9} (T_F - 32 ^\circ \text{F})$$