

MANUAL OF THE
ICAO STANDARD ATMOSPHERE

extended to 80 kilometres (262 500 feet)

MANUEL DE
L'ATMOSPHERE TYPE OACI

élargie jusqu'à 80 kilomètres (262 500 pieds)

MANUAL DE
LA ATMÓSFERA TIPO DE LA OACI

ampliada hasta 80 kilómetros (262 500 pies)

РУКОВОДСТВО
ПО СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЕ ИКАО

с верхней границей, поднятой до 80 километров (262 500 футов)



THIRD EDITION — TROISIÈME ÉDITION
TERCERA EDICIÓN — ТРЕТЬЕ ИЗДАНИЕ

1993

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION
ORGANISATION DE L'AVIATION CIVILE INTERNATIONALE
ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL
МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

MANUAL OF THE
ICAO STANDARD ATMOSPHERE
extended to 80 kilometres (262 500 feet)

MANUEL DE
L'ATMOSPHERE TYPE OACI
élargie jusqu'à 80 kilomètres (262 500 pieds)

MANUAL DE
LA ATMÓSFERA TIPO DE LA OACI
ampliada hasta 80 kilómetros (262 500 pies)

РУКОВОДСТВО
ПО СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЕ ИКАО
с верхней границей, поднятой до 80 километров (262 500 футов)

Doc 7488/3



THIRD EDITION — TROISIÈME ÉDITION
TERCERA EDICIÓN — ТРЕТЬЕ ИЗДАНИЕ

1993

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	E-iii
INTRODUCTION	E-vii
TABLES	1-1

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	F-III
INTRODUCTION	F-VII
TABLEAUX	1-1

ÍNDICE

PREÁMBULO	S-iii
INTRODUCCIÓN	S-vii
TABLAS	1-1

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	R-iii
ВВЕДЕНИЕ	R-vii
ТАБЛИЦЫ	1-1

FOREWORD

As the result of recommendations made by the Airworthiness, the Operations and Meteorological Divisions, the ICAO Council at a meeting on 23 June 1950 agreed that a joint sub-commission of the Commission for Aeronautical Meteorology and the Aerological Commission of the International Meteorological Organization be established. Its mandate was to discuss with representatives of ICAO the establishment of a detailed specification of and the collection of data for the ICAO standard atmosphere defined in general terms in Part I of Annex 8 to the Convention on International Civil Aviation.

A working group consisting of the above-mentioned representatives met in July/August 1950 in Montreal and drafted a proposal for a detailed specification of the ICAO standard atmosphere. This proposal was included in Doc 7041 and at the beginning of 1951 was circulated to all Contracting States for comment.

On 7 November 1952 the Council approved the specification as detailed in Doc 7041 and directed the Secretary General to publish the specification and its associated tables and figures in the form of a technical manual.

All assumptions and basic data used in that manual were those adopted by the Council of ICAO. The mechanical work of calculating and checking the detailed tables and figures of the ICAO standard atmosphere was carried out by the United States National Advisory Committee for Aeronautics in co-operation with the Directorate General of Civil Aviation, Italy. By courtesy of these two governments, their work was made available for inclusion in that manual, which was published as ICAO Document 7488 (May 1954).

Even before publication of Doc 7488, it had become apparent that the ICAO standard atmosphere needed to be extended above the previously adopted limit of 20 km. In 1953 a Committee was created in the United States sponsored jointly by the Geophysics Research Directorate of the Air Force Cambridge Research Center and the United States Weather Bureau. During the same year representatives of 24 United States scientific and engineering organizations — both governmental and private — attended a meeting, to which ICAO sent an observer. The Committee decided to appoint a “Working Group on Extension to the Standard Atmosphere” to reconsider the temperature-altitude profile and to

recommend basic values and parameters. The working group continued its activities during the years 1953 to 1956 and its recommendations, including a definition of the temperature-altitude profile up to 32 km, were adopted with modifications by the parent committee in 1956. In 1958 a report entitled “U.S. Extension to the ICAO Standard Atmosphere Tables and Data to 300 Standard Geopotential Kilometers” was issued in Washington, D.C. In 1959 the report was sent to the Secretary General of ICAO by the Representative of the United States on the Council of ICAO proposing international adoption of the 20 to 32 km portion of the report; however, the proposal was subsequently withdrawn pending the availability of revised data.

In 1962 detailed proposals for changes in certain constants associated with the ICAO standard atmosphere and for the extension of the standard atmosphere were submitted by the United States, together with the document “U.S. Standard Atmosphere — ICAO Standard Atmosphere to 20 km, Proposed ICAO extension to 32 km, Tables and Data to 700 km.” This revised U.S. proposal was circulated for comment to all Contracting States, the International Air Transport Association, the International Federation of Air Line Pilots’ Associations and the World Meteorological Organization.

On 12 November 1963 the Council approved the revised detailed specification of the ICAO standard atmosphere, and directed the Secretary General to re-issue the Tables of ICAO Standard Atmosphere, incorporating the revision and extension prepared by the United States. In accordance with the foregoing directive, the second edition of the manual was published in 1964.

On 23 March 1979 the Council approved the alignment of the system of units of measurement used in aviation (as specified in Annex 5) with the international system (SI). In line with the Council’s wish that all ICAO documents comply with Annex 5 in respect of the units used, arrangements were made to revise the Manual of the ICAO Standard Atmosphere. Due to the fact that the second edition of the manual contained a complex mixture of SI units and non-SI units, the data in some of the tables had to be recalculated.

In addition to the question of the alignment of the units with Annex 5, two States (the Union of Soviet Socialist Republics and the United States), noting the possibility of

the development in the foreseeable future of aircraft capable of flying at very high altitudes, requested that the ICAO standard atmosphere be extended from the existing upper limit of 32 km to 80 km, which would correspond approximately to the height of the mesopause. The proposal to extend the upper limit of the standard atmosphere was circulated to all Contracting States for comment, and following consideration of States' replies, the Council, on 22 March 1988, adopted Amendment No.95 to Annex 8, which included the extension of the standard atmosphere to 80 km. As the revision of the manual to align it with Annex 5 already entailed recalculation of some of the tables, it was considered that this would also be an appropriate time to extend the atmosphere's upper limit.

The recalculation of the data in certain of the existing tables and the extension of the data in all tables from 32 km to 80 km necessarily required the use of sophisticated computer facilities in order to retain the existing level of accuracy of the data. At the time this task was started, the International Organization for Standardization (ISO) had recently published a standard atmosphere up to 80 km based upon the ICAO parameters defined in Annex 8. In an attempt to align the ICAO and ISO standard atmospheres, ISO was approached for assistance in providing the data needed for the revision and extension of the ICAO standard

atmosphere. The competent ISO working body, Subcommittee ISO/TC-20/SC-6-Standard Atmosphere, in a meeting held in Moscow in October 1985, decided unanimously to provide assistance in recalculating the tables required for the alignment of Doc 7488 with Annex 5 and in extending its upper limit in accordance with Annex 8.

The method used for calculating the parameters and the necessary software were developed in the Central Aero-Hydrodynamic Institute (TSAGI), Union of Soviet Socialist Republics. The actual calculations were also carried out by the Union of Soviet Socialist Republics on behalf of the ISO committee, in accordance with the ICAO requirements and the ISO/TC-20/SC-6 plans. The result of the ISO work is being issued in parallel as Addendum 2 to International Standard ISO 2533: 1975, Standard Atmosphere.

This manual is intended to facilitate the uniform application of the ICAO standard atmosphere defined in Annex 8 and to provide users of the standard atmosphere with convenient sets of data that are accurate enough for practical applications, and that are based on internationally agreed physical constants and conversion factors. In view of the fact that the data tables published for the ICAO and ISO Standard Atmospheres are identical, any future amendments will be the subject of co-ordination between the two organizations.

TABLE OF CONTENTS

INTRODUCTION

1.	SCOPE AND FIELD OF APPLICATION	E-vii
2.	BASIC PRINCIPLES AND CALCULATION FORMULAE	E-vii
2.1	Primary constants and characteristics	E-vii
2.2	The hydrostatic equation and the perfect gas law	E-vii
2.3	Geopotential and geometric altitudes; acceleration due to gravity	E-viii
2.4	Atmospheric composition and mean molar mass	E-ix
2.5	Physical characteristics of the atmosphere at mean sea level	E-ix
2.6	Temperature and vertical temperature gradient	E-xi
2.7	Pressure	E-xi
2.8	Density and specific weight	E-xii
2.9	Pressure scale height	E-xii
2.10	Number density	E-xiii
2.11	Mean particle speed	E-xiii
2.12	Mean free path	E-xiii
2.13	Collision frequency	E-xiii
2.14	Speed of sound	E-xiii
2.15	Dynamic viscosity	E-xiii
2.16	Kinematic viscosity	E-xiii
2.17	Thermal conductivity	E-xiii
3.	COMMENTS ON PRESENTATION OF THE TABLES	E-xiv
4.	REFERENCES	E-xiv

TABLES

TABLE 1 — Temperature, pressure, density and acceleration due to gravity in terms of geometrical altitude and geopotential altitude (altitudes in metres)	1-1
TABLE 2 — Ratio of p/P_0 , ρ/ρ_0 and $\sqrt{\rho/\rho_0}$, speed of sound, dynamic and kinematic viscosity and thermal conductivity in terms of geometrical altitude and geopotential altitude (altitude in metres)	2-1
TABLE 3 — Pressure scale height, specific weight, number density, mean particle speed, collision frequency and mean free path in terms of geometrical altitude and geopotential altitude (altitude in metres)	3-1
TABLE 4 — Temperature, pressure, density and acceleration due to gravity in terms of geometrical altitude and geopotential altitude (altitude in feet)	4-1
TABLE 5 — Ratio of p/P_0 , ρ/ρ_0 and $\sqrt{\rho/\rho_0}$, speed of sound, dynamic and kinematic viscosity and thermal conductivity in terms of geometrical altitude and geopotential altitude (altitude in feet)	5-1
TABLE 6 — Pressure scale height, specific weight, number density, mean particle speed, collision frequency and mean free path in terms of geometrical altitude and geopotential altitude (altitude in feet)	6-1
TABLE 7 — Geopotential altitude as a function of pressure	7-1

INTRODUCTION

General Note.— The decimal notation used in this manual conforms to ICAO practice. The ISO practice is to use a decimal point (.) in imperial measurements and a comma (,) in metric measurements.

1. SCOPE AND FIELD OF APPLICATION

This international standard specifies the characteristics of an ICAO standard atmosphere. It is intended for use in calculations in the design of aircraft, in presenting test results of aircraft and their components under identical conditions, and to facilitate standardization in the development and calibration of instruments. Its use is also recommended in the processing of data from geophysical and meteorological observations.

2. BASIC PRINCIPLES AND CALCULATION FORMULAE

2.1 Primary constants and characteristics

The tables of the ICAO standard atmosphere have been calculated assuming the air to be a perfect gas free from moisture and dust and based on conventional initial values of temperature, pressure and density of the air for mean sea level. The following constants and characteristics are used for calculations and their numerical values are given in Table A:

g_0 standard acceleration due to gravity. It conforms with latitude $\varphi = 45^\circ 32' 33''$ using Lambert's equation of the acceleration due to gravity as a function of latitude φ (see reference 1):

$$g_\varphi = 9.806\,16(1 - 0.002\,637\,3 \cos 2\varphi + 0.000\,005\,9 \cos^2 2\varphi)$$

M_0 sea level mean molar mass, as obtained from the perfect gas law (equation (2)) when introducing the primary constants P_0 , ρ_0 , T_0 , R^* (see Table A);

N_A Avogadro constant, based on the value of the nuclide ^{12}C , atomic mass = 12.000, as

adopted in 1961 by the Conference of the International Union of Pure and Applied Chemistry as the basic atomic mass unity;

P_0 sea level atmospheric pressure;

R^* universal gas constant;

$R = R^*/M_0$ specific gas constant;

S and β_s Sutherland's empirical constants in the equation for dynamic viscosity;

T_i temperature of the ice point at mean sea level;

T_0 sea level temperature;

t_i Celsius temperature of the ice point at mean sea level;

t_0 Celsius sea level temperature;

$\kappa = c_p/c_v$ adiabatic index, the ratio of the specific heat of air at constant pressure to its specific heat at constant volume;

ρ_0 sea level atmospheric density;

σ effective collision diameter of an air molecule; taken as constant with altitude.

2.2 The hydrostatic equation and the perfect gas law

Being static with respect to the earth, the atmosphere is subject to gravity. The conditions of air static equilibrium are determined by the hydrostatic equation which relates air pressure p , density ρ , acceleration due to gravity g and altitude h as follows:

$$-dp = \rho g dh \quad (1)$$

Table A. Primary constants and characteristics adopted for the calculation of the ICAO standard atmosphere

Symbol	Value	Unit of measurement
g_0	9.806 65	m/s ²
M_0 (see Note)	28.964 420	kg/kmol
N_A	602.257×10^{24}	kmol ⁻¹
P_0	101.325×10^3	Pa
	1 013.250	hPa
R^*	8 314.32	J/(K · kmol) or kg · m ² /(s ² · K · kmol)
R (see Note)	287.052 87	J/(K · kg) or m ² /(K · s ²)
S	110.4	K
T_i	273.15	K
T_0	288.15	K
t_i	0.00	°C
t_0	15.00	°C
β_s	1.458×10^{-6}	kg/(m · s · K ^{1/2})
κ	1.4	dimensionless
ρ_0	1.225	kg/m ³
σ	0.365×10^{-9}	m

Note.— Not a primary constant per se; derived from primary constants.

The perfect gas law relates air pressure to density and temperature as follows:

$$p = \frac{\rho R^* T}{M_0} \quad (2)$$

At the altitudes considered in this International Standard,

$$\frac{R^*}{M_0} = \text{constant} = R$$

then

$$p = \rho R T \quad (3)$$

2.3 Geopotential and geometric altitudes; acceleration due to gravity

In considering pressure distribution in the atmosphere, it is convenient to introduce the gravity potential or geopotential Φ , which characterizes the potential energy of an air particle at a given point.

Any point with x, y, z coordinates may be characterized by a single value of gravity potential $\Phi(x, y, z)$ in it. The surface defined by the equation

$$\Phi(x, y, z) = \text{constant}$$



is of the same potential in all points and is called an isopotential or geopotential surface. When moving along an external normal from any point on the surface Φ_1 , to the infinitely close point where the value of the potential is $\Phi_2 = \Phi_1 + d\Phi$, the work performed for shifting a unit mass from the first surface to the second one will be:

$$d\Phi = g(h)dh \quad (4)$$

hence

$$\Phi = \int_0^h g(h)dh \quad (5)$$

By dividing the geopotential Φ by the standard acceleration due to gravity g_0 , one obtains the value of a length dimension which, symbolized as H , will be:

$$H = \frac{\Phi}{g_0} = \frac{1}{g_0} \int_0^h g(h)dh \quad (6)$$

Expressed in metres, the value H is numerically equal to the geopotential altitude, which in meteorology is measured in so-called standard geopotential metres; hence, this value will be called geopotential altitude. The mean sea level is taken as a reference for readings for both geopotential and geometrical altitudes.

Note.— The standard geopotential metre (m), which is equal to 9.806 65 m²/s², has been adopted by the World Meteorological Organization (see Technical Regulations, WMO, No. 49, Volume 1, ed. 1971 — Appendix C) and from 1 July 1972 replaces the geopotential metre formerly in use. Its value was 1 gpm = 9.8 m²/s².

From equation (6) it can be seen that, in order to relate geopotential and geometric altitudes, it is necessary first to find a relationship between acceleration due to gravity g and geometric altitude h .

It is known that gravity is a vectorial summation of the gravitational attraction and the centrifugal force induced by the earth's rotation; it is therefore a complex function of a latitude and a radial distance from the earth's centre and the expression for acceleration due to gravity is generally awkward and unpractical for use. However, the acceleration g may be obtained with sufficient accuracy for the purpose of this standard atmosphere by formally neglecting centrifugal acceleration and using only Newton's gravitation law. In this case:

$$g = g_0 \left(\frac{r}{r + h} \right)^2 \quad (7)$$

where $r = 6\,356\,766$ m is the nominal earth's radius (see reference 1), for which acceleration due to gravity and the

vertical gradient of acceleration at mean sea level are very close to true values at the latitude 45°32'33".

The values of g , as calculated using the simplified equation (7) with $g_0 = 9.806\,65$ m/s² for the altitude of 60 000 m, do not differ by more than 0.001 per cent from the values calculated using the more accurate equation (6).

Integration of equation (6), substituting for g with its function from equation (7), gives the following relationship between geopotential and geometric altitudes:

$$H = \frac{rh}{r + h} \quad (8)$$

$$h = \frac{rH}{r - H} \quad (9)$$

2.4 Atmospheric composition and mean molar mass

The earth's atmosphere is a mixture of gas, water vapour and a certain quantity of aerosol. Under certain conditions, the quantities of water vapour, carbon dioxide and ozone, as well as other components which occur in insignificant amounts in the atmosphere, may vary. The water vapour undergoes the greatest variations. Its concentration at the earth's surface may reach 4 per cent under high temperature conditions; however, this decreases with altitude as the temperature decreases. Dry, clean air composition up to altitudes of 90 to 95 km remains practically constant and corresponds to that given in Table B.

The mean molar mass is determined from the perfect gas law (equation (2)) using the standard values of pressure P_0 , density ρ_0 and temperature T_0 for mean sea level, as well as the universal gas constant R^* .

2.5 Physical characteristics of the atmosphere at mean sea level

For the calculation of the ICAO standard atmosphere, the mean sea level is defined as zero altitude for which the initial characteristics g_0 , P_0 , ρ_0 and T_0 given in Table A apply. The remaining characteristics have been calculated using the initial ones as a basis and are presented in Table C:

a_0 speed of sound;

H_{p0} pressure scale height;



Table B. Dry, clean air composition near sea level¹

Gas	Content of volume %	Molar mass <i>M</i> kg/kmol
Nitrogen (N ₂)	78.084	28.013 4
Oxygen (O ₂)	20.947 6	31.998 8
Argon (Ar)	0.934	39.948
Carbon dioxide (CO ₂)	0.031 4*	44.009 95
Neon (Ne)	1.818×10^{-3}	20.183
Helium (He)	524.0×10^{-6}	4.002 6
Krypton (Kr)	114.0×10^{-6}	83.80
Xenon (Xe)	8.7×10^{-6}	131.30
Hydrogen (H ₂)	50.0×10^{-6}	2.015 94
Nitrogen monoxide (N ₂ O)	50.0×10^{-6} *	44.012 8
Methane (CH ₄)	0.2×10^{-3}	16.043 03
Ozone (O ₃) in summer	up to 7.0×10^{-6} *	47.998 2
in winter	up to 2.0×10^{-6} *	47.998 2
Sulphur dioxide (SO ₂)	up to 0.1×10^{-3} *	64.062 8
Nitrogen dioxide (NO ₂)	up to 2.0×10^{-6} *	46.005 5
Iodine (I ₂)	up to 1.0×10^{-6} *	253.808 8
Air	100	28.964 420**

* The content of the gas may undergo significant variations from time to time or from place to place.

** This value is obtained from the perfect gas law (equation (2)).

1. *U.S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere: U.S. Standard Atmosphere*, 1962. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 1963.

l_0	mean free path;
n_0	number density;
$\overline{v_0}$	mean particle speed;
γ_0	specific weight;
ν_0	kinematic viscosity;
λ_0	thermal conductivity;
μ_0	dynamic viscosity;
ω_0	collision frequency.

According to the temperature variations with altitude, the atmosphere is divided into several layers. The transitional zones between these layers are called tropopause, stratopause and mesopause respectively. For calculating a standard atmosphere, the temperature of each layer is taken as a linear function of geopotential altitude, so that

$$T = T_b + \beta(H - H_b) \quad (11)$$

where T_b and H_b are respectively the temperature and the geopotential altitude of the lower limit of the layer concerned and β is the vertical temperature gradient, dT/dH .

The values of temperature and its vertical gradients adopted for the ICAO standard atmosphere are given in Table D.

2.6 Temperature and vertical temperature gradient

Temperature of the ice point under a pressure of 1 013.25 hPa is taken as $T_i = 273.15$ K. Temperature T (in Kelvins, K) is:

$$T = T_i + t \quad (10)$$

where t is the Celsius temperature.

2.7 Pressure

Assuming a linear variation of the temperature with geopotential altitude, the simultaneous solution of the hydrostatic equation (equation (1)) and the perfect gas law (equation (2)) yields the following expression for pressure:

Table C. Physical characteristics of the atmosphere at mean sea level

Symbol	Value	Unit of measurement
a_0	340.294	m/s
H_{p_0}	8 434.5	m
l_0	66.328×10^{-9}	m
n_0	25.471×10^{24}	m^{-3}
$\overline{v_0}$	458.94	m/s
γ_0	12.013	N/m ³
ν_0	14.607×10^{-6}	m ² /s
λ_0	25.343×10^{-3}	W/(m · K)
μ_0	17.894×10^{-6}	Pa · s
ω_0	$6.919 3 \times 10^9$	s ⁻¹

$$\ln p = \ln p_b - \frac{g_0}{\beta R} \ln \frac{T_b + \beta(H - H_b)}{T_b}$$

or

$$p = p_b \left[1 + \frac{\beta}{T_b} (H - H_b) \right]^{-g_0/\beta R} \text{ for } \beta \neq 0 \quad (12)$$

and

$$\ln p = \ln p_b - \frac{g_0}{RT} (H - H_b)$$

or

$$p = p_b \exp \left[-\frac{g_0}{RT} (H - H_b) \right] \text{ for } \beta = 0 \quad (13)$$

Here subscript “b” refers the values of the pertinent characteristics to the lower limit of the layer concerned.

2.8 Density and specific weight

The density ρ is calculated from the pressure and the temperature using the perfect gas law:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (14)$$

The specific weight γ is the weight per unit volume of air, that is:

$$\gamma = \rho g \quad (15)$$

2.9 Pressure scale height

Pressure scale height H_p is determined by the equation

$$H_p = \frac{R^*}{M_0} \cdot \frac{T}{g} = \frac{RT}{g} \quad (16)$$

Table D. Temperatures and vertical temperature gradients

Geopotential altitude H , km	Temperature T , K	Temperature gradient β , K/km
-5.00	320.65	
0.00	288.15	-6.50
11.00	216.65	-6.50
20.00	216.65	0.00
32.00	228.65	+1.00
47.00	270.65	+2.80
51.00	270.65	0.00
71.00	214.65	-2.80
80.00	196.65	-2.00



2.10 Number density

The number density n , i.e the number of neutral air particles per unit volume, is given by the equation

$$n = \frac{N_A P}{R^* T} \quad (17)$$

2.11 Mean particle speed

The mean particle speed $\bar{v}$ is defined as the arithmetic average of air-particle speeds obtained from Maxwell's distribution of molecular speeds in the monatomic perfect gas under thermodynamical equilibrium conditions disregarding any exterior force; hence

$$\bar{v} = \left(\frac{8}{\pi} R^* T \right)^{1/2} = 1.595\,769 \sqrt{R^* T} \quad (18)$$

2.12 Mean free path

An air particle between two successive collisions moves uniformly along a straight line, passing a certain average distance, called a mean free path of air particles. Taking into account the distribution of relative speeds of colliding particles, the mean free path is defined by the expression

$$l = \frac{R^*}{\sqrt{2} \pi N_A \sigma^2} \cdot \frac{T}{P} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n} \quad (19)$$

2.13 Collision frequency

The collision frequency ω is the mean particle speed divided by the mean free path at the same altitude, i.e. $\omega = \bar{v}/l$; hence, taking into account equations (18) and (19),

$$\omega = 4 \sigma^2 N_A \left(\frac{\pi}{R^* M_0} \right)^{1/2} \cdot \frac{P}{T^{1/2}} = 0.944\,541 \times 10^{-18} n \sqrt{R^* T} \quad (20)$$

2.14 Speed of sound

The speed of sound a is given by the expression

$$a = (\kappa R^* T)^{1/2} = 20.046\,796 \sqrt{T} \quad (21)$$

where

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$$

This expression (equation (21)) presents the speed of propagation of an infinitesimal perturbation in a gas. That is why this formula may not be used for calculation, for example, of the speed of propagation of shock waves induced by blast, detonation, body motion in the air at supersonic speed, etc.

The concept of speed of sound loses its meaning with very intensive attenuation of sound pulses which occurs above the altitude limits considered for the ICAO standard atmosphere.

2.15 Dynamic viscosity

The dynamic viscosity μ is defined as the value of internal friction between two neighbouring layers of air moving at different speeds. The tables are established using the following equation based on the kinetic theory with constants derived from experiments:

$$\mu = \frac{\beta_s T^{3/2}}{T + S} \quad (22)$$

In this equation β_s and S are Sutherland's empirical constants (see Table A).

Equation (22) is invalid for very high or very low temperatures and under conditions occurring at altitudes above 90 km.

2.16 Kinematic viscosity

The kinematic viscosity ν is defined as the ratio of the dynamic viscosity to the air density, i.e.:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (23)$$

The limits for the use of this equation are similar to those of the dynamic viscosity.

2.17 Thermal conductivity

The thermal conductivity λ is calculated from the following empirical formula:

$$\lambda = \frac{2.648 \ 151 \times 10^{-3} \cdot T^{3/2}}{T + [245.4 \times 10^{-(12/T)}]} \quad (24)$$

where λ is expressed in $W/(m \cdot K)$ and T in Kelvins.

3. COMMENTS ON PRESENTATION OF THE TABLES

The tables contained in the following part of this manual were calculated using the constants, coefficients and equations given in Section 2 above.

Calculations were made on a Minsk-22 digital computer and the calculation of separate control points was made on other machines. The tables were established directly by digital printing devices on the computers and have been reproduced by a digital optical scanner in order to reduce the possibility of errors to a minimum.

Data in the tables are given in SI units except in Tables 1 and 4, in which temperatures are given in Celsius degrees,

and in Tables 4, 5 and 6 as well as on the right-hand pages of Table 7, in which heights are given in feet.

Note 1.— A one- or two-digit number (preceded by a plus or a minus sign) following the initial entry of each block indicates the power of ten by which that entry and each succeeding entry of that block should be multiplied. A change of power occurring within a block is indicated by a similar notation.

Note 2.— All the tables are calculated for the layer from -5 to 80 km except for the hypsometrical tables (Table 7) which are published up to 32 km only.

4. REFERENCES

1. R.J. List, ed. *Smithsonian Meteorological Tables*, Sixth Revised Edition. Washington, D.C. 1963.
2. U.S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere. *U.S. Standard Atmosphere*, 1962. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 1962.

AVANT-PROPOS

À la suite de recommandations formulées par la Division des certificats de navigabilité, la Division de l'exploitation et la Division de météorologie, le Conseil de l'OACI a approuvé, le 23 juin 1950, la convocation d'une sous-commission mixte de la Commission de Météorologie aéronautique et de la Commission aérologique de l'Organisation météorologique internationale, en vue d'étudier, avec des représentants de l'OACI, la détermination détaillée et les données de l'atmosphère type OACI dont la définition générale figure à la 1^{re} Partie de l'Annexe 8 à la Convention relative à l'aviation civile internationale.

Un groupe d'étude formé de représentants des organes mentionnés plus haut s'est réuni à Montréal (juillet-août 1950) et a établi un projet de détermination détaillée de l'atmosphère type OACI. Ce projet fait l'objet du document 7041 qui, au début de 1951, a été communiqué pour avis à tous les États contractants.

Le 7 novembre 1952, le Conseil de l'OACI a approuvé la détermination détaillée de l'atmosphère type OACI (Doc 7041) et a chargé le Secrétaire général de la publier, ainsi que les tableaux et graphiques correspondants, sous forme de manuel technique.

Toutes les hypothèses et données fondamentales utilisées dans ce manuel étaient celles adoptées par le Conseil de l'OACI. Les opérations matérielles de calcul et de vérification des tableaux détaillés et figures correspondant à l'atmosphère type OACI ont été réalisées par le National Advisory Committee for Aeronautics des États-Unis, en coopération avec la Direction générale de l'aviation civile d'Italie. Le gouvernement des États-Unis et le gouvernement italien ont bien voulu mettre ces éléments à la disposition de l'OACI, en vue de leur insertion dans ce manuel (document 7488 de l'OACI, publié en mai 1954).

Même avant la publication du document 7488, il était évident qu'il serait nécessaire d'étendre l'atmosphère type OACI au-delà de la limite supérieure de 20 km précédemment adoptée. En 1953, on a institué aux États-Unis un comité sous le patronage conjoint de la Geophysics Research Directorate de l'Air Force Cambridge Research Center, et de l'United States Weather Bureau. La même année, des représentants de 24 organismes scientifiques et techniques des États-Unis, publics et privés, ont participé à une réunion à laquelle l'OACI était représentée par un observateur. Ce comité a chargé un groupe d'étude sur l'extension de l'atmosphère type de procéder à un nouvel

examen de la courbe température-altitude et de proposer des valeurs et des paramètres fondamentaux. Ce groupe d'étude a poursuivi ses travaux de 1953 à 1956 et ses recommandations, y compris une définition de la courbe température-altitude jusqu'à 32 km, ont été adoptées en 1956, après modification, par le comité qui l'avait institué. Un rapport intitulé "US Extension to the ICAO Standard Atmosphere Tables and Data to 300 Standard Geopotential Kilometers" (Projet d'extension de l'atmosphère type OACI établi par les États-Unis, Tableaux et données jusqu'à 300 kilomètres géopotentiels standard) a été publié à Washington, D.C., en 1958. Il a été communiqué en 1959 au Secrétaire général de l'OACI par le représentant des États-Unis au Conseil de l'OACI, en même temps qu'une proposition d'adoption à l'échelle internationale de la partie du rapport traitant des altitudes comprises entre 20 et 32 km; toutefois, la proposition a été retirée par la suite en attendant que les données révisées soient prêtes.

Les États-Unis ont présenté en 1962 des propositions détaillées de modification de certaines constantes ayant un rapport avec l'atmosphère type OACI, et d'extension de l'atmosphère type, ainsi que le document "U.S. Standard Atmosphere — ICAO Standard Atmosphere to 20 km, Proposed ICAO extension to 32 km, Tables and Data to 700 km". Cette proposition révisée des États-Unis a été communiquée pour avis à tous les États contractants, à l'Association du transport aérien international, à la Fédération internationale des associations de pilotes de ligne et à l'Organisation météorologique mondiale.

Le 12 novembre 1963, le Conseil a adopté les spécifications détaillées révisées de l'atmosphère type OACI et chargé le Secrétaire général de publier une nouvelle édition des tableaux de l'atmosphère type OACI en tenant compte de la révision et de l'extension préparées par les États-Unis. Conformément à la directive précitée, la deuxième édition du Manuel a été publiée en 1964.

Le 23 mars 1979, le Conseil a approuvé la proposition visant à aligner les unités de mesure utilisées en aviation (conformément à l'Annexe 5) sur le Système international (SI). En vertu de la décision du Conseil selon laquelle tous les documents OACI doivent respecter l'Annexe 5 en ce qui concerne les unités utilisées, des dispositions ont été prises pour que le Manuel de l'atmosphère type OACI soit révisé. Étant donné que des unités SI et non SI sont utilisées dans la deuxième édition de ce manuel, il a fallu recalculer les données de certains tableaux.

Outre la question de l'alignement des unités sur l'Annexe 5, deux États (l'Union des républiques socialistes soviétiques et les États-Unis), notant la mise au point possible, dans un avenir prévisible, d'aéronefs capables d'évoluer à de très hautes altitudes, ont demandé que la limite supérieure de l'atmosphère type OACI soit portée de 32 km à 80 km, c'est-à-dire environ à l'altitude de la mésopause. La proposition d'extension de l'atmosphère type a été communiquée à tous les États contractants pour qu'ils fassent leurs observations, et le 22 mars 1988, après examen des réponses des États, le Conseil a adopté l'Amendement n° 95 de l'Annexe 8, qui fixait la limite supérieure de l'atmosphère type à 80 km. Comme il fallait déjà recalculer les valeurs de quelques tableaux pour harmoniser le Manuel et l'Annexe 5, on a jugé le moment opportun pour augmenter la hauteur de l'atmosphère type.

Afin de maintenir le degré de précision actuel des données, il a fallu recourir à des systèmes informatiques perfectionnés pour recalculer les valeurs de certains tableaux existants et établir les données relatives aux altitudes comprises entre 32 km et 80 km. Au début des travaux, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) venait tout juste de publier une norme concernant une atmosphère type s'étendant jusqu'à 80 km et fondée sur les caractéristiques définies dans l'Annexe 8 de l'OACI. Dans le but d'harmoniser les atmosphères types ISO et OACI, l'ISO a été appelée à contribuer aux travaux en fournissant les renseignements nécessaires à la révision et à l'extension des données relatives à l'atmosphère type

OACI. Lors d'une réunion tenue à Moscou en octobre 1985, l'organe de travail compétent de l'ISO, le Sous-comité 6 du Comité technique 20 (ISO/TC-20/SC-6) a décidé à l'unanimité de prêter son concours en recalculant les tableaux nécessaires à l'alignement du Doc 7488 sur l'Annexe 5 et à l'extension de la limite supérieure de l'atmosphère type conformément à l'Annexe 8.

La méthode qui a servi au calcul des paramètres ainsi que le logiciel nécessaire ont été élaborés par l'institut central d'aéro-hydrodynamique (TSAGI) de l'Union des Républiques socialistes soviétiques. Ce dernier État a également effectué les calculs pour le compte du comité de l'ISO et conformément aux spécifications de l'OACI ainsi que des plans du Sous-Comité ISO/TC-20/SC-6. Les résultats des travaux de l'ISO sont publiés séparément dans l'Additif 2 à la Norme internationale ISO 2533 : 1975, Atmosphère type.

Le présent manuel vise à faciliter l'utilisation uniforme de l'atmosphère type OACI définie dans l'Annexe 8 et à fournir aux usagers de l'atmosphère type des ensembles de données qui sont d'une exactitude suffisante pour des applications pratiques et qui sont fondées sur des constantes physiques et des facteurs de conversion admis sur le plan international. Du fait que les tableaux de données concernant les atmosphères types OACI et ISO sont identiques, toute modification qu'il faudra leur apporter à l'avenir fera l'objet d'une coordination entre les deux organismes.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

1.	OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION	F-VII
2.	HYPOTHÈSES FONDAMENTALES ET FORMULES DE CALCUL	F-VII
2.1	Constantes et caractéristiques principales	F-VII
2.2	Équation hydrostatique et loi des gaz parfaits	F-VII
2.3	Altitude géopotentielle et altitude géométrique; accélération due à la pesanteur	F-VIII
2.4	Composition de l'atmosphère et masse molaire moyenne	F-IX
2.5	Caractéristiques physiques de l'atmosphère au niveau moyen de la mer	F-IX
2.6	Température et gradient vertical de température	F-XI
2.7	Pression	F-XI
2.8	Masse volumique et poids spécifique	F-XII
2.9	Altitude en échelle barométrique	F-XII
2.10	Nombre volumique	F-XII
2.11	Vitesse moyenne des particules	F-XIII
2.12	Libre parcours moyen	F-XIII
2.13	Fréquence des chocs	F-XIII
2.14	Vitesse du son	F-XIII
2.15	Viscosité dynamique	F-XIII
2.16	Viscosité cinématique	F-XIII
2.17	Conductivité thermique	F-XIII
3.	OBSERVATIONS SUR LA PRÉSENTATION DES TABLEAUX	F-XIV
4.	RÉFÉRENCES	F-XIV

TABLEAUX

TABLEAU 1 — Température, pression, densité et accélération due à la pesanteur en fonction de l'altitude géométrique et de l'altitude géopotentielle, en mètres	1-1
TABLEAU 2 — Rapports p/P_0 , ρ/ρ_0 et $\sqrt{\rho/\rho_0}$, vitesse du son, viscosité dynamique viscosité cinématique et conductivité thermique en fonction de l'altitude géométrique et de l'altitude géopotentielle, en mètres	2-1
TABLEAU 3 — Altitude en échelle barométrique, poids spécifique, nombre volumique vitesse moyenne des particules, fréquence des chocs et libre parcours moyen en fonction de l'altitude géométrique et de l'altitude géopotentielle, en mètres	3-1
TABLEAU 4 — Température, pression, densité et accélération due à la pesanteur en fonction de l'altitude géométrique et de l'altitude géopotentielle, en pieds	4-1
TABLEAU 5 — Rapports p/P_0 , ρ/ρ_0 et $\sqrt{\rho/\rho_0}$, vitesse du son, viscosité dynamique, viscosité cinématique et conductivité thermique en fonction de l'altitude géométrique et de l'altitude géopotentielle, en pieds	5-1
TABLEAU 6 — Altitude en échelle barométrique, poids spécifique, nombre volumique, vitesse moyenne des particules, fréquence des chocs et libre parcours moyen en fonction de l'altitude géométrique et de l'altitude géopotentielle, en pieds	6-1
TABLEAU 7 — Altitude géopotentielle en fonction de la pression.	7-1

INTRODUCTION

Note générale.— La notation décimale utilisée dans le présent manuel est conforme à l'usage de l'OACI. L'ISO utilise le point décimal dans les mesures impériales, et la virgule dans les mesures métriques.

1. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

La présente norme internationale spécifie les caractéristiques d'une atmosphère type OACI et est destinée à être utilisée dans les calculs et l'étude de projets d'aéronefs, pour présenter, dans des conditions identiques, les résultats des essais des aéronefs et de leurs éléments, et permettre une unification dans le domaine de l'étude et de l'étalonnage des instruments. Son utilisation est également recommandée pour le traitement des résultats des observations géophysiques et météorologiques.

2. HYPOTHÈSES FONDAMENTALES ET FORMULES DE CALCUL

2.1 Constantes et caractéristiques principales

Les tableaux de l'atmosphère type OACI ont été calculés dans l'hypothèse selon laquelle l'air est un gaz parfait, propre et sec; ils sont également basés sur les valeurs initiales conventionnelles pour la température, la pression et la masse volumique de l'air au niveau moyen de la mer. Les constantes et les caractéristiques suivantes sont utilisées dans les calculs, et leurs valeurs numériques sont données dans le Tableau A :

g_0 accélération normalisée due à la pesanteur. Elle correspond à la latitude $\varphi = 45^\circ 32' 33''$ d'après l'équation de Lambert de l'accélération due à la pesanteur en fonction de la latitude φ [voir référence 1] :

$$g_\varphi = 9,806\,16(1 - 0,002\,637\,3 \cos 2\varphi + 0,000\,005\,9 \cos^2 2\varphi)$$

M_0 masse molaire moyenne au niveau de la mer, obtenue à partir de l'équation d'état des gaz parfaits [équation (2)] lors de la substitution des constantes principales P_0 , ρ_0 , T_0 , R^* (voir Tableau A);

N_A constante d'Avogadro, calculée à partir de la valeur de la masse atomique du nuclide $^{12}\text{C} = 12,000$, adoptée en 1961 par le Congrès de l'Union internationale de chimie pure et appliquée comme l'unité de base de la masse atomique;

P_0 pression atmosphérique au niveau de la mer;

R^* constante universelle des gaz;

$R = R^*/M_0$ constante spécifique des gaz;

S et β_s coefficients empiriques de Sutherland dans l'équation de la viscosité dynamique;

T_i température du point de fusion de la glace au niveau moyen de la mer;

T_0 température de l'air au niveau de la mer;

t_i température Celsius de fusion de la glace au niveau moyen de la mer;

t_0 température Celsius au niveau de la mer;

$\kappa = c_p/c_v$ indice adiabatique, rapport des chaleurs spécifiques de l'air à pression constante et à volume constant;

ρ_0 masse volumique de l'air au niveau de la mer;

σ diamètre effectif des molécules d'air lors des chocs; supposé constant pour toutes les altitudes.

2.2 Équation hydrostatique et loi des gaz parfaits

L'atmosphère, immobile par rapport à la Terre, est soumise à la pesanteur. Les conditions d'équilibre statique de l'air sont déterminées par l'équation hydrostatique

**Tableau A. Constantes et caractéristiques principales adoptées
dans le calcul de l'atmosphère type OACI**

Symbole	Valeur	Unité de mesure
g_0	9,806 65	m/s ²
M_0 (voir Note)	28,964 420	kg/kmol
N_A	$602,257 \times 10^{24}$	kmol ⁻¹
P_0	$101,325 \times 10^3$	Pa
	1 013,250	hPa
R^*	8 314,32	J/(K · kmol) ou kg · m ² /(s ² · K · kmol)
R (voir Note)	287,052 87	J/(K · kg) ou m ² /(K · s ²)
S	110,4	K
T_i	273,15	K
T_0	288,15	K
t_i	0,00	°C
t_0	15,00	°C
β_s	$1,458 \times 10^{-6}$	kg/(m · s · K ^{1/2})
κ	1,4	sans dimension
ρ_0	1,225	kg/m ³
σ	$0,365 \times 10^{-9}$	m

Note.— N'est pas une constante principale à proprement parler; calculé à partir de constantes principales.

suivante, liant la pression de l'air p , la masse volumique ρ , l'accélération due à la pesanteur g et l'altitude h :

$$-dp = \rho g dh \quad (1)$$

La loi des gaz parfaits lie la pression de l'air à la masse volumique et à la température comme suit :

$$p = \frac{\rho R^* T}{M_0} \quad (2)$$

Pour les altitudes considérées dans la présente norme internationale,

$$\frac{R^*}{M_0} = \text{constante} = R$$

d'où

$$p = \rho R T \quad (3)$$

2.3 Altitude géopotentielle et altitude géométrique; accélération due à la pesanteur

Dans l'étude de la répartition de la pression dans l'atmosphère, il est préférable d'introduire le potentiel de la force de la pesanteur ou le géopotentiel Φ , qui définit l'énergie potentielle d'une particule d'air située en un point donné.

Tout point des coordonnées x, y, z peut être caractérisé par une valeur unique de son potentiel de la force de la pesanteur $\Phi(x, y, z)$. La surface représentée par l'équation

$$\Phi(x, y, z) = \text{constante}$$

a un même potentiel dans tous les points et est appelée surface isopotentielle ou surface géopotentielle. Si l'on passe, suivant la normale extérieure d'un point situé sur la surface Φ_1 , à un point infiniment plus proche, dont la



valeur de potentiel sera $\Phi_2 = \Phi_1 + d\Phi$, pour transférer l'unité de masse de la première surface à la seconde il est nécessaire d'effectuer un travail

$$d\Phi = g(h)dh \quad (4)$$

d'où, en intégrant,

$$\Phi = \int_0^h g(h)dh \quad (5)$$

Ayant divisé le géopotential Φ par l'accélération normalisée due à la pesanteur g_0 , la valeur, en prenant en considération la longueur, désignée par le symbole H , sera

$$H = \frac{\Phi}{g_0} = \frac{1}{g_0} \int_0^h g(h)dh \quad (6)$$

Exprimée en mètres, la valeur H est, en valeur numérique, égale à l'altitude géopotentielle qui est mesurée, en météorologie, en mètres géopotentiels normaux; cette valeur sera donc dénommée «altitude géopotentielle». Le niveau moyen de la mer est pris comme référence pour les lectures des altitudes géopotentielle et géométrique.

Note.— Le mètre géopotential normal (m'), qui équivaut à $9,806\,65\,m^2/s^2$, est adopté par l'Organisation météorologique mondiale (voir le Règlement technique de l'OMM, n° 49, vol. 1, éd. 1971 – Appendice C) et, depuis le 1^{er} juillet 1972, remplace le «mètre géopotential», employé jusqu'à présent. La valeur de ce dernier était $1\,gpm = 9,8\,m^2/s^2$.

L'équation (6) montre que, pour établir la correspondance existant entre l'altitude géopotentielle et l'altitude géométrique, il faut connaître la valeur de l'accélération due à la pesanteur g en fonction de l'altitude géométrique h .

On sait que la force de la pesanteur est la somme vectorielle de la force d'attraction terrestre et de la force centrifuge due à la rotation de la Terre; elle est donc une fonction compliquée de la latitude et de la distance radiale au centre de la Terre, et l'expression de l'accélération due à la pesanteur est généralement peu pratique à l'utilisation. Mais il est cependant possible, dans le cas particulier de l'atmosphère définie ici, d'obtenir avec une précision suffisante une valeur approchée g ne tenant pas compte de l'accélération centrifuge et en n'utilisant que l'accélération d'attraction newtonienne. Dans ce cas,

$$g = g_0 \left(\frac{r}{r + h} \right)^2 \quad (7)$$

où $r = 6\,356\,766\,m$ est le rayon terrestre fictif [voir référence 1] pour lequel l'accélération due à la pesanteur

et son gradient vertical, au niveau moyen de la mer, sont les plus rapprochés des valeurs réelles pour la latitude $45^\circ 32' 33''$.

La valeur de g déduite de l'équation simplifiée (7) avec $g_0 = 9,806\,65\,m/s^2$, pour les altitudes de $60\,000\,m$, ne diffère au plus que de $0,001\,\%$ des valeurs calculées suivant l'équation plus précise (6).

De l'intégration de l'équation (6), après substitution de la valeur de g donnée par l'équation (7), résultent les relations suivantes entre l'altitude géopotentielle et l'altitude géométrique :

$$H = \frac{rh}{r + h} \quad (8)$$

$$h = \frac{rH}{r - H} \quad (9)$$

2.4 Composition de l'atmosphère et masse molaire moyenne

L'atmosphère terrestre est un mélange de gaz, de vapeur d'eau et d'une certaine quantité d'aérosols. Mais les quantités de vapeur d'eau, d'anhydride carbonique et d'ozone et de quelques autres constituants de l'air, dont le titre molaire est insignifiant, changent dans des conditions déterminées. C'est la teneur en vapeur d'eau qui est la plus variable de toutes; sa concentration à la surface de la Terre, en présence de fortes températures, peut atteindre $4\,\%$, et diminuer rapidement lorsque l'altitude augmente et lorsque la température diminue. La composition de l'air propre et sec figurant au Tableau B demeure pratiquement constante jusqu'aux altitudes voisines de 90 à $95\,km$.

La masse molaire moyenne est déterminée en remplaçant, dans l'équation des gaz parfaits (2), la pression P_0 , la masse volumique ρ_0 la température T_0 au niveau moyen de la mer et la constante universelle des gaz R^* , par leurs valeurs normalisées.

2.5 Caractéristiques physiques de l'atmosphère au niveau moyen de la mer

Dans les calculs de l'atmosphère type OACI, le niveau moyen de la mer est défini comme étant l'altitude zéro à laquelle les caractéristiques initiales, g_0 , P_0 , ρ_0 et T_0 données dans le Tableau A, sont applicables. Les autres caractéristiques, calculées d'après les caractéristiques initiales, sont présentées dans le Tableau C :



**Tableau B. Composition de l'air propre et sec
à proximité du niveau de la mer¹**

Gaz	Titre molaire %	Masse molaire <i>M</i> kg/kmol
Azote (N ₂)	78,084	28,013 4
Oxygène (O ₂)	20,947 6	31,998 8
Argon (Ar)	0,934	39,948
Anhydride carbonique (CO ₂)	0,031 4*	44,009 95
Néon (Ne)	$1,818 \times 10^{-3}$	20,183
Hélium (He)	$524,0 \times 10^{-6}$	4,002 6
Krypton (Kr)	$114,0 \times 10^{-6}$	83,80
Xénon (Xe)	$8,7 \times 10^{-6}$	131,30
Hydrogène (H ₂)	$50,0 \times 10^{-6}$	2,015 94
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	$50,0 \times 10^{-6}$ *	44,012 8
Méthane (CH ₄)	$0,2 \times 10^{-3}$	16,043 03
Ozone (O ₃)	en été jusqu'à $7,0 \times 10^{-6}$ *	47,998 2
	en hiver jusqu'à $2,0 \times 10^{-6}$ *	47,998 2
Anhydride sulfureux (SO ₂)	jusqu'à $0,1 \times 10^{-3}$ *	64,062 8
Peroxyde d'azote (NO ₂)	jusqu'à $2,0 \times 10^{-6}$ *	46,005 5
Iode (I ₂)	jusqu'à $1,0 \times 10^{-6}$ *	253,808 8
Air	100	28,964 420**

* La concentration des gaz peut varier dans des proportions notables, selon le temps et le lieu.

** La valeur est obtenue d'après l'équation de l'état des gaz parfaits [équation (2)].

1. *U.S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere: U.S. Standard Atmosphere*, 1962. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 1963.

a_0	vitesse du son;
H_{p0}	altitude en échelle barométrique;
l_0	libre parcours moyen;
n_0	nombre volumique;
$\bar{v}_0$	vitesse moyenne des particules;
γ_0	poids spécifique;
ν_0	viscosité cinématique;
λ_0	conductivité thermique;
μ_0	viscosité dynamique;
ω_0	fréquence des chocs des particules d'air.

Selon la variation de la température en fonction de l'altitude, l'atmosphère est divisée en plusieurs régions. Les zones de transition d'une région à l'autre s'appellent dans l'ordre : tropopause, stratopause et mésopause. Pour le calcul de l'atmosphère type, on admet que la température de chaque région est une fonction linéaire de l'altitude géopotentielle, soit

$$T = T_b + \beta(H - H_b) \quad (11)$$

où T_b et H_b sont respectivement la température et l'altitude géopotentielle de la limite inférieure de la région considérée, et $\beta = dT/dH$ le gradient vertical de température.

Les valeurs des températures et des gradients verticaux de température adoptées pour l'atmosphère type OACI sont données dans le Tableau D.

2.6 Température et gradient vertical de température

On admet que la température de fusion de la glace à la pression de 1 013,25 kPa est égale à $T_i = 273,15$ K. La température T (en kelvins, K) est égale à :

$$T = T_i + t \quad (10)$$

où t est la température Celsius.

2.7 Pression

La résolution du système d'équations (1) et (2) donne, en admettant un gradient linéaire de température en fonction de l'altitude géopotentielle, les expressions suivantes pour la pression :

$$\ln p = \ln p_b - \frac{g_0}{\beta R} \ln \frac{T_b + \beta(H - H_b)}{T_b}$$

Tableau C. Caractéristiques physiques de l'atmosphère au niveau moyen de la mer

Symbole	Valeur	Unité de mesure
a_0	340,294	m/s
H_{p0}	8 434,5	m
l_0	$66,328 \times 10^{-9}$	m
n_0	$25,471 \times 10^{24}$	m^{-3}
$\bar{v}_0$	458,94	m/s
γ_0	12,013	N/m ³
ν_0	$14,607 \times 10^{-6}$	m ² /s
λ_0	$25,343 \times 10^{-3}$	W/(m · K)
μ_0	$17,894 \times 10^{-6}$	Pa · s
ω_0	$6,919 3 \times 10^9$	s ⁻¹



ou

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (14)$$

$$p = p_b \left[1 + \frac{\beta}{T_b} (H - H_b) \right]^{-g_0/\beta R} \quad \text{pour } \beta \neq 0 \quad (12)$$

Le poids spécifique, γ , est le poids par unité de volume de l'air, c'est-à-dire

et

$$\gamma = \rho g \quad (15)$$

$$\ln p = \ln p_b - \frac{g_0}{RT} (H - H_b)$$

ou

2.9 Altitude en échelle barométrique

$$p = p_b \exp \left[-\frac{g_0}{RT} (H - H_b) \right] \quad \text{pour } \beta = 0 \quad (13)$$

L'altitude en échelle barométrique, H_p , est déterminée par l'équation

$$H_p = \frac{R^*}{M_0} \cdot \frac{T}{g} = \frac{RT}{g} \quad (16)$$

L'indice «*b*» désigne les valeurs des caractéristiques correspondant à la limite inférieure de la région considérée.

2.10 Nombre volumique

2.8 Masse volumique et poids spécifique

La masse volumique, ρ , se calcule en fonction de la pression et de la température à l'aide de la loi des gaz parfaits :

Le nombre volumique, n , c'est-à-dire le nombre de particules d'air neutres contenues dans l'unité de volume, est déterminée par l'équation

$$n = \frac{N_A p}{R^* T} \quad (17)$$

Tableau D. Températures et gradients verticaux de l'atmosphère

Altitude géopotentielle H , km	Température T , K	Gradient de température β , K/km
-5,00	320,65	-6,50
0,00	288,15	-6,50
11,00	216,65	0,00
20,00	216,65	+1,00
32,00	228,65	+2,80
47,00	270,65	0,00
51,00	270,65	-2,80
71,00	214,65	-2,00
80,00	196,65	



2.11 Vitesse moyenne des particules

La vitesse moyenne des particules, $\bar{v}$, est la moyenne arithmétique des vitesses des particules d'air obtenue à partir de la distribution de Maxwell pour les vitesses des molécules d'un gaz parfait monoatomique dans les conditions d'équilibre thermodynamique et en absence de forces extérieures, d'où

$$\bar{v} = \left(\frac{8}{\pi} RT \right)^{1/2} = 1,595\ 769 \sqrt{RT} \quad (18)$$

2.12 Libre parcours moyen

Entre deux chocs successifs, la particule d'air effectue un mouvement rectiligne uniforme, en se déplaçant d'une certaine distance moyenne, appelée libre parcours moyen des particules d'air. Compte tenu de la distribution des vitesses relatives des particules subissant des chocs, ce libre parcours moyen s'exprime par l'expression suivante :

$$l = \frac{R^*}{\sqrt{2}\pi N_A \sigma^2} \cdot \frac{T}{P} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi \sigma^2 n} \quad (19)$$

2.13 Fréquence des chocs

La fréquence des chocs des particules d'air, ω , est égale au rapport de la vitesse moyenne des particules d'air au libre parcours moyen des particules d'air à la même altitude, c'est-à-dire $\omega = \bar{v}/l$ d'où, d'après les équations (18) et (19)

$$\omega = 4\sigma^2 N_A \left(\frac{\pi}{R^* M_0} \right)^{1/2} \cdot \frac{P}{T^{1/2}} = 0,944\ 541 \times 10^{-18} n \sqrt{RT} \quad (20)$$

2.14 Vitesse du son

La vitesse du son, a , est donnée par la formule

$$a = (\kappa RT)^{1/2} = 20,046\ 796 \sqrt{T} \quad (21)$$

où

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$$

L'équation (21) désigne la vitesse de propagation d'une perturbation infiniment petite de gaz. Mais cette formule

ne convient pas pour le calcul des ondes de choc lors d'une détonation ou d'une explosion, et des mouvements de corps dans l'air aux vitesses supersoniques, etc.

La notion de la vitesse du son perd tout son sens en présence de la très forte extinction des vibrations sonores qui a lieu en dehors des limites des altitudes considérées pour l'atmosphère type OACI.

2.15 Viscosité dynamique

La viscosité dynamique, μ , est déterminée par la valeur du frottement interne entre deux couches d'air voisines, se déplaçant à des vitesses différentes. Pour le calcul des tableaux, on utilise l'expression suivante, basée sur la théorie cinétique, mais avec les constantes obtenues expérimentalement :

$$\mu = \frac{\beta_s T^{3/2}}{T + S} \quad (22)$$

Dans cette équation, β_s et S sont les coefficients empiriques de Sutherland (voir Tableau A).

L'équation (22) n'est pas applicable aux très hautes ou aux très basses températures, ainsi que dans les conditions rencontrées au-dessus de 90 km.

2.16 Viscosité cinématique

Par définition, la viscosité cinématique, ν , est le rapport de la viscosité dynamique de l'air à sa masse volumique, soit :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (23)$$

L'emploi de cette équation appelle les mêmes réserves que celles formulées pour l'équation de la viscosité dynamique.

2.17 Conductivité thermique

La conductivité thermique, λ , se calcule d'après la formule empirique :

$$\lambda = \frac{2,648\ 151 \times 10^{-3} \cdot T^{3/2}}{T + [245,4 \times 10^{-(12/T)}]} \quad (24)$$

où λ est exprimé en $W/(m \cdot K)$, et T en kelvins.

3. OBSERVATIONS SUR LA PRÉSENTATION DES TABLEAUX

Les tableaux ci-après ont été calculés à l'aide des constantes, des coefficients et des équations figurant dans la section 2 ci-dessus.

Les calculs ont été effectués à l'aide d'une calculatrice numérique Minsk-22 et les calculs de certains points de contrôle ont été effectués sur d'autres calculatrices. Les tableaux ont été directement obtenus sur une imprimante reliée à la calculatrice et reproduits au moyen d'un lecteur optique numérique afin de réduire les risques d'erreurs au minimum.

Les tableaux ne sont donnés que dans le système SI, à l'exception des données des Tableaux 1 et 4, dans lesquels la température est présentée en degrés Celsius, et de celles des Tableaux 4, 5 et 6 ainsi que des pages de droite du Tableau 7, dans lesquels les hauteurs sont présentées en pieds.

Note 1.— Un nombre de un ou de deux chiffres (précédé du signe + ou -), placé à la suite de la première valeur d'un groupe, indique la puissance de 10 qui doit multiplier toutes les valeurs de ce groupe. Lorsque cette puissance change à partir d'une certaine valeur, la nouvelle puissance est indiquée à la suite de cette valeur.

Note 2.— Tous les tableaux portent sur les altitudes comprises entre -5 et 80 km sauf les tableaux hypsométriques (Tableau 7), qui ont trait aux altitudes jusqu'à 32 km seulement.

4. RÉFÉRENCES

1. R.J. List, ed. *Smithsonian Meteorological Tables*, Sixth Revised Edition. Washington, D.C. 1963.
2. U.S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere. *U.S. Standard Atmosphere*, 1962. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 1962.

PREÁMBULO

En virtud de las recomendaciones formuladas por los Departamentos de aeronavegabilidad, de operaciones y de meteorología, el Consejo de la OACI, en sesión celebrada el 23 de junio de 1950, convino en que debía crearse una subcomisión mixta, integrada por elementos de la Comisión de meteorología aeronáutica y de la Comisión aerológica de la Organización Meteorológica Internacional, para discutir con los representantes de la OACI el problema de la especificación detallada y de la presentación de datos de la atmósfera tipo de la OACI, definida en términos generales en la Parte I del Anexo 8 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional.

En los meses de julio y agosto de 1950, se reunió en Montreal un grupo de estudio formado por los representantes de los órganos antes mencionados y formuló una propuesta referente a la especificación detallada de la atmósfera tipo de la OACI. Esta propuesta se incluyó en el Doc 7041, y a comienzos de 1951 se envió a todos los Estados contratantes rogándoles que la comentaran.

El 7 de noviembre de 1952 el Consejo aprobó la especificación detallada de la atmósfera tipo de la OACI contenida en el Doc 7041 y encargó al Secretario General que la publicara junto con sus correspondientes tablas y gráficos en forma de manual técnico.

Todas las hipótesis y los datos básicos utilizados en aquel manual eran los adoptados por el Consejo de la OACI. La labor material de cálculo y verificación de tablas y figuras de la atmósfera tipo de la OACI la llevó a cabo el National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), de los Estados Unidos, en cooperación con la Dirección General de Aviación Civil de Italia. Los gobiernos de ambos países tuvieron la amabilidad de poner a disposición de la OACI los resultados obtenidos para su inserción en el manual, que se publicó como Doc 7488 de la OACI (mayo de 1954).

Aun antes de la publicación del Doc 7488 se había ido viendo claro que haría falta ampliar la atmósfera tipo de la OACI por encima del límite de 20 km previamente adoptado. En 1953, se creó en Estados Unidos un comité, patrocinado conjuntamente por la Dirección de investigaciones geofísicas del Centro Investigador de Cambridge, de la Fuerza Aérea, y por el Servicio Meteorológico de los Estados Unidos. Durante el mismo año, representantes de 24 organismos científicos y técnicos — tanto gubernamentales como privados — de los Estados Unidos asistieron a una conferencia, a la cual la OACI

envió un observador. El comité en cuestión decidió crear un “Grupo de estudio sobre la extensión de la atmósfera tipo”, con idea de que considerara de nuevo el perfil temperatura-altitud y para que recomendara valores y parámetros básicos. El grupo de estudio continuó sus actividades durante los años 1953 a 1956 y sus recomendaciones, comprendida una definición del perfil temperatura-altitud hasta 32 km, fueron adoptadas, con modificaciones, por el Comité de que dependía, en 1956. En Washington, D.C. se publicó en 1958 un informe titulado “US Extension to the ICAO Standard Atmosphere Tables and Data to 300 Standard Geopotential Kilometers” (Extensión de la atmósfera tipo de la OACI adoptada por los Estados Unidos — Tablas y valores hasta 300 km geopotenciales normalizados). En 1959 el Representante de los Estados Unidos en el Consejo de la OACI envió el informe al Secretario General de la Organización proponiendo la adopción internacional de la parte del informe que se refería a altitudes de 20 a 30 km; no obstante, más tarde se retiró la propuesta pendiente en espera de los datos revisados.

En 1962 los Estados Unidos sometieron propuestas detalladas de modificaciones en ciertas constantes relacionadas con la atmósfera tipo de la OACI y referentes a la extensión de la atmósfera tipo, junto con el documento “Atmósfera tipo de los EUA – Atmósfera tipo de la OACI hasta 20 km, propuesta de extensión de la atmósfera de la OACI hasta 32 km, tablas y datos hasta 700 km”. Esta propuesta revisada de los Estados Unidos se transmitió a todos los Estados contratantes, a la Asociación del Transporte Aéreo Internacional, a la Federación de Asociaciones de Pilotos de Línea Aérea y a la Organización Meteorológica Mundial, a fin de conocer sus comentarios.

El 12 de noviembre de 1963 el Consejo aprobó la especificación detallada y revisada de la atmósfera tipo de la OACI y encargó al Secretario General que volviera a publicar las tablas de la atmósfera tipo de la OACI, incorporando la revisión y extensión preparadas por los Estados Unidos.

El 23 de marzo de 1979 el Consejo decidió ajustar el sistema de unidades de medida utilizadas en la aviación (como se especifica en el Anexo 5) con el sistema internacional (SI). De conformidad con el deseo del Consejo de que en todos los documentos de la OACI se respetara el Anexo 5 en lo que atañe al uso de unidades de medida, se han adoptado las medidas necesarias para

revisar el manual de la atmósfera tipo de la OACI. Dado que la segunda edición del manual contenía una mezcla complicada de unidades SI y otras ajenas al sistema SI, fue menester calcular de nuevo los datos en algunas de las tablas.

Además de la cuestión del ajuste de las unidades de medida con las disposiciones del Anexo 5, dos Estados (los Estados Unidos y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas), tomando nota de la posibilidad de que se fabricaran en el futuro próximo aeronaves para vuelos a muy grandes altitudes, solicitaron que la atmósfera tipo de la OACI se extendiera, pasando el límite superior existente de 32 km a 80 km, lo que correspondería aproximadamente a la altura de la mesopausa. Se comunicó dicha propuesta a todos los Estados contratantes con objeto de obtener sus comentarios; luego, habiéndose examinado las respuestas recibidas, el Consejo adoptó, el 22 de marzo de 1988, la Enmienda 95 del Anexo 8 incluyendo la extensión de la atmósfera tipo hasta 80 km. Dado que la revisión del manual para ajustarlo a las disposiciones del Anexo 5 ya implicaba que se calcularan de nuevo algunas tablas, se consideró que ese era el momento oportuno para extender el límite superior de la atmósfera.

El nuevo cálculo de los datos en algunas de las tablas existentes y la extensión de los datos en todas las tablas, pasando de 32 a 80 km, exigía necesariamente el uso de instalaciones computadorizadas perfeccionadas con objeto de mantener el actual nivel de precisión de los datos. Cuando se inició esta tarea, se sabía que la Organización Internacional de Normalización (ISO) acababa de publicar una norma relativa a la atmósfera tipo hasta 80 km basada en los parámetros de la OACI definidos en el Anexo 8.

Con objeto de ajustar las atmósferas tipo de la OACI y de la ISO, se solicitó la asistencia de esta última para proporcionar los datos que se necesitaban para la revisión y extensión de la atmósfera tipo de la OACI. El grupo de trabajo competente de la ISO, el subcomité ISO/TC-20/SC-6-atmósfera tipo, decidió por unanimidad, en una reunión celebrada en Moscú en octubre de 1985, proporcionar asistencia para calcular de nuevo las tablas necesarias a fin de que en el Doc 7488 se respetaran las disposiciones del Anexo 5 y se ampliara su límite superior de conformidad con el Anexo 8.

El método utilizado para calcular los parámetros y el soporte lógico necesario fueron elaborados en el Instituto Central Aerohidrodinámico (TSAGI) de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas; además, los cálculos mismos se llevaron asimismo a cabo en la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas en nombre del Comité ISO, de conformidad con los requisitos de la OACI y los planes del ISO/TC-20/SC-6. El resultado de la labor de la ISO se publicará paralelamente como Adendo 2 a la Norma Internacional ISO 2533: 1975, Atmósfera tipo.

El presente manual tiene por objeto facilitar la aplicación uniforme de la atmósfera tipo de la OACI, definida en el Anexo 8, y proporcionar a los usuarios unas series de datos de consulta fácil, cuya precisión permite aplicaciones prácticas y que están basados en constantes físicas y factores de conversión convenidos internacionalmente. Dado que las tablas de datos publicadas para las atmósferas tipo de la OACI y de la ISO son idénticas, las eventuales enmiendas serán objeto de coordinación entre ambos organismos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

1.	OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	S-vii
2.	PRINCIPIOS BÁSICOS Y FÓRMULAS DE CÁLCULO	S-vii
2.1	Constantes y características primarias	S-vii
2.2	La ecuación hidrostática y la ley de los gases perfectos	S-vii
2.3	Altitudes geopotencial y geométrica; aceleración debida a la gravedad	S-viii
2.4	Composición de la atmósfera y masa molar media	S-ix
2.5	Características físicas de la atmósfera al nivel medio del mar	S-x
2.6	Temperatura y gradiente térmico vertical	S-xi
2.7	Presión	S-xii
2.8	Densidad y peso específico	S-xii
2.9	Altura en la escala de presión	S-xiii
2.10	Densidad numérica	S-xiii
2.11	Velocidad media de las partículas	S-xiii
2.12	Camino libre medio	S-xiii
2.13	Frecuencia de colisión	S-xiii
2.14	Velocidad del sonido	S-xiii
2.15	Viscosidad dinámica	S-xiii
2.16	Viscosidad cinemática	S-xiv
2.17	Conductibilidad térmica	S-xiv
3.	OBSERVACIONES RELATIVAS A LA PRESENTACIÓN DE LAS TABLAS	S-xiv
4.	REFERENCIAS	S-xiv

TABLAS

TABLA 1 — Temperatura, presión, densidad y aceleración debida a la gravedad en función de la altitud geométrica y geopotencial (altitudes en metros)	1-1
TABLA 2 — Relación de p/P_0 , ρ/ρ_0 y $\sqrt{\rho/\rho_0}$, velocidad del sonido, viscosidad dinámica y cinemática y conductibilidad térmica en función de la altitud geométrica y geopotencial (altitudes en metros)	2-1
TABLA 3 — Altitud en la escala de presión, peso específico, densidad numérica, velocidad media de las partículas, frecuencia de colisión y camino libre medio en función de la altitud geométrica y geopotencial (altitudes en metros)	3-1
TABLA 4 — Temperatura, presión, densidad y aceleración debida a la gravedad en función de la altitud geométrica y geopotencial (altitudes en pies)	4-1
TABLA 5 — Relación de p/P_0 , ρ/ρ_0 y $\sqrt{\rho/\rho_0}$, velocidad del sonido, viscosidad dinámica y cinemática y conductibilidad térmica en función de la altitud geométrica y geopotencial (altitudes en pies)	5-1
TABLA 6 — Altitud en la escala de presión, peso específico, densidad numérica, velocidad media de las partículas, frecuencia de colisión y camino libre medio en función de la altitud geométrica y geopotencial (altitudes en pies)	6-1
TABLA 7 — Altitud geopotencial como función de la presión	7-1

INTRODUCCIÓN

Nota.— En el presente Manual se han adoptado las presentaciones siguientes: a) en los números decimales, la parte entera está separada de la decimal por un punto (en vez de una coma); b) entre los símbolos, “ft” significa “pies”, y “sec” (en vez de “s”) designa los segundos.

1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

La presente norma internacional, en la que se especifican las características de una atmósfera tipo de la OACI, se ha elaborado para ser utilizada en los cálculos y el diseño de aeronaves, para presentar, en condiciones idénticas, los resultados de los ensayos de las aeronaves y de sus elementos y para permitir la unificación en el campo del desarrollo y la calibración de instrumentos. Su uso se recomienda, asimismo, para el procesamiento de los datos procedentes de observaciones geofísicas y meteorológicas.

2. PRINCIPIOS BÁSICOS Y FÓRMULAS DE CÁLCULO

2.1 Constantes y características primarias

Las tablas de la atmósfera tipo de la OACI se han calculado basándose en la hipótesis de que el aire es un gas perfecto desprovisto de humedad y polvo y basándose en valores iniciales convencionales para la temperatura, la presión y la densidad del aire al nivel medio del mar. Se han utilizado para los cálculos las constantes y características siguientes, cuyos valores numéricos aparecen en la Tabla A:

g_0 valor normalizado de la aceleración debida a la gravedad. Corresponde a la latitud $\varphi = 45^\circ 32' 33''$ utilizando la ecuación de Lambert de la aceleración debida a la gravedad en función de la latitud φ (véase la referencia 1):

$$g_\varphi = 9,806\ 16\ (1 - 0,002\ 637\ 3\ \cos 2\varphi + 0,000\ 005\ 9\ \cos^2 2\varphi)$$

M_0 masa molar media a nivel del mar, como se obtiene de la ley de los gases perfectos [ecuación (2)] al introducir las constantes primarias P_0 , ρ_0 , T_0 , R^* (véase la Tabla A);

N_A constante de Avogadro, basada en el valor del núclido ^{12}C , masa atómica = 12,000, adoptada en 1961 por la Conferencia de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada como unidad básica de masa atómica;

P_0 presión atmosférica a nivel del mar;

R^* constante universal de los gases;

$R = R^*/M_0$ constante específica de los gases;

S y β_s coeficientes empíricos de Sutherland en la ecuación relativa a la viscosidad dinámica;

T_i temperatura de fusión del hielo al nivel medio del mar;

T_0 temperatura a nivel del mar;

t_i temperatura de fusión del hielo al nivel medio del mar expresada en grados Celsius;

t_0 temperatura a nivel del mar expresada en grados Celsius;

$\kappa = c_p/c_v$ índice adiabático: relación entre el calor específico del aire a presión constante y su calor específico a volumen constante;

ρ_0 densidad de la atmósfera a nivel del mar;

σ diámetro efectivo de colisión de una molécula de aire; se considera constante respecto a la altitud.

2.2 La ecuación hidrostática y la ley de los gases perfectos

Dado su carácter estático respecto a la tierra, la atmósfera está sometida a la gravedad. Las condiciones del equilibrio estático del aire quedan determinadas por la ecuación hidrostática en la que se relacionan entre sí la presión del aire p , la densidad ρ , la aceleración debida a la gravedad g y la altitud h , como se indica a continuación:

$$-dp = \rho g dh \quad (1)$$

Tabla A. Constantes y características primarias adoptadas para el cálculo de la atmósfera tipo de la OACI

Símbolo	Valor	Unidad de medida
g_0	9,806 65	m/s ²
M_0 (véase la nota)	28,964 420	kg/kmol
N_A	$602,257 \times 10^{24}$	kmol ⁻¹
P_0	$101,325 \times 10^3$	Pa
	1 013,250	hPa
R^*	8 314,32	J/(K · kmol) ó kg · m ² /(s ² · K · kmol)
R (véase la Nota)	287,052 87	J/(K · kg) ó m ² /(K · s ²)
S	110,4	K
T_i	273,15	K
T_0	288,15	K
t_i	0,00	°C
t_0	15,00	°C
β_s	$1,458 \times 10^{-6}$	kg/(m · s · K ^{1/2})
κ	1,4	adimensional
ρ_0	1,225	kg/m ³
σ	$0,365 \times 10^{-9}$	m

Nota.— No constituye una constante primaria en sí; se deriva de constantes primarias)

La ley de los gases perfectos relaciona entre sí la presión del aire a la densidad y a la temperatura como se indica a continuación:

$$p = \frac{\rho R^* T}{M_0} \quad (2)$$

En las altitudes consideradas en la presente norma internacional,

$$\frac{R^*}{M_0} = \text{constante} = R$$

luego,

$$p = \rho R T \quad (3)$$

2.3 Altitudes geopotencial y geométrica; aceleración debida a la gravedad

Al examinar la distribución de la presión de la atmósfera es conveniente introducir el potencial de la gravedad o el geopotencial Φ , que caracteriza la energía potencial de una partícula de aire en un punto dado.

Cualquier punto con las coordenadas x, y, z puede caracterizarse por un valor único de su potencial de gravedad $\Phi(x, y, z)$. La superficie definida por la ecuación

$$\Phi(x, y, z) = \text{constante}$$

tiene el mismo potencial en todos los puntos y se llama superficie equipotencial o geopotencial. Si se recorre, siguiendo una normal exterior, desde un punto situado en la superficie Φ_1 hasta un punto infinitamente más cercano, cuyo potencial tiene el valor de $\Phi_2 = \Phi_1 + d\Phi$, el trabajo necesario para transferir una unidad de masa desde la primera superficie a la segunda será:

$$d\Phi = g(h)dh \quad (4)$$

de aquí

$$\Phi = \int_0^h g(h)dh \quad (5)$$

Al dividir el geopotencial Φ por el valor normalizado de la aceleración debida a la gravedad g_0 , se obtiene el valor de una dimensión de longitud que, representada por el símbolo H , será:

$$H = \frac{\Phi}{g_0} = \frac{1}{g_0} \int_0^h g(h)dh \quad (6)$$

Expresado en metros, el valor H tiene el mismo valor numérico que la altitud geopotencial, que se mide en meteorología en el llamado metro geopotencial normal; por consiguiente, dicho valor se llamará altitud geopotencial. El nivel medio del mar se utiliza como referencia para las lecturas de las altitudes tanto geopotencial como geométrica.

Nota.— El metro geopotencial patrón (m), que equivale a $9,806\,65\,m^2/S^2$ fue adoptado por la Organización Meteorológica Mundial (véase el Reglamento técnico, OMM, Núm. 49, Volumen 1, ed. 1971 — Apéndice C); a partir del 1 de julio de 1972 reemplaza al metro geopotencial que se utilizaba anteriormente y cuyo valor era de $1\,gpm = 9,8\,m^2/S^2$.

La ecuación (6) indica que, a fin de establecer la correspondencia que existe entre la altitud geopotencial y la altitud geométrica, se debe primero hallar la relación que existe entre la aceleración debida a la gravedad g y la altitud geométrica h .

Se sabe que la gravedad es la suma vectorial de la atracción gravitatoria y de la fuerza centrífuga debida a la rotación de la tierra. Por consiguiente, constituye una función compleja de una latitud y de una distancia radial respecto al centro de la tierra, y la expresión relativa a la aceleración debida a la gravedad es generalmente poco práctica para ser utilizada. No obstante, la aceleración g puede obtenerse con bastante precisión para los fines de la presente atmósfera tipo haciendo abstracción de la aceleración centrífuga y utilizando únicamente la ley de la gravedad de Newton. En este caso:

$$g = g_0 \left(\frac{r}{r + h} \right)^2 \quad (7)$$

en que $r = 6\,356\,766\,m$ es el radio nominal de la tierra (véase la referencia 1), para el cual la aceleración debida a la gravedad y el gradiente vertical de aceleración al nivel medio del mar se acercan considerablemente de los valores reales en la latitud de $45^\circ 32' 33''$.

Los valores de g , que se calculan mediante la ecuación simplificada (7) con $g_0 = 9,806\,65\,m/s^2$ para la altitud de $60\,000\,m$ no difiere más de $0,001\%$ de los valores calculados utilizando la ecuación (6) más precisa.

La integración de la ecuación (6), sustituyendo la g por la función que se obtiene de la ecuación (7), da lugar a las relaciones siguientes entre las altitudes geopotencial y geométrica:

$$H = \frac{rh}{r + h} \quad (8)$$

$$h = \frac{rH}{r - H} \quad (9)$$

2.4 Composición de la atmósfera y masa molar media

La atmósfera de la tierra es una mezcla de gases, vapor de agua y cierta cantidad de aerosoles. En ciertas condiciones, pueden variar las cantidades de vapor de agua, anhídrido carbónico y ozono, así como otros ingredientes cuyo porcentaje en la atmósfera es poco significativo. Las variaciones más grandes corresponden al contenido de vapor de agua; la concentración de este último en la superficie de la tierra puede alcanzar el 4% en condiciones de temperaturas elevadas y disminuye abruptamente cuando aumenta la altitud y disminuye la temperatura. La composición del aire seco y limpio hasta altitudes de 90 a 95 km se mantiene prácticamente constante y corresponde a la que aparece en la Tabla B.

La masa molar media se determina mediante la ley de gases perfectos (ecuación (2)) utilizando los valores normalizados de presión P_0 , densidad ρ_0 y temperatura T_0 al nivel medio del mar, así como la constante universal de los gases R^* .

2.5 Características físicas de la atmósfera al nivel medio del mar

Para el cálculo de la atmósfera tipo de la OACI, el nivel medio del mar se ha definido como la altitud cero a la que se aplican las características iniciales g_0 , P_0 , ρ_0 y T_0 que aparecen en la Tabla A. Las demás características, que se han calculado basándose en las características iniciales, aparecen en la Tabla C:

a_0 velocidad del sonido;

Tabla B. Composición del aire seco y limpio cerca del nivel del mar¹

Gas	Contenido, % en volumen	Masa molar M kg/kmol
Nitrógeno (N ₂)	78,084	28,013 4
Oxígeno (O ₂)	20,947 6	31,998 8
Argón (Ar)	0,934	39,948
Anhídrido carbónico (CO ₂)	0,031 4*	44,009 95
Neón (Ne)	1,818 x 10 ⁻³	20,183
Helio (He)	524,0 x 10 ⁻⁶	4,002 6
Criptón (Kr)	114,0 x 10 ⁻⁶	83,80
Xenón (Xe)	8,7 x 10 ⁻⁶	131,30
Hidrógeno (H ₂)	50,0 x 10 ⁻⁶	2,015 94
Monóxido de nitrógeno (N ₂ O)	50,0 x 10 ^{-6*}	44,012 8
Metano (CH ₄)	0,2 x 10 ⁻³	16,043 03
Ozono (O ₃) en el verano	hasta 7,0 x 10 ^{-6*}	47,998 2
en el invierno	hasta 2,0 x 10 ^{-6*}	47,998 2
Dióxido de azufre (SO ₂)	hasta 0,1 x 10 ^{-3*}	64,062 8
Anhídrido nitroso (NO ₂)	hasta 2,0 x 10 ^{-6*}	46,005 5
Iodina (I ₂)	hasta 1,0 x 10 ^{-6*}	253,808 8
Aire	100	28,964 420**

* La concentración de los gases puede variar considerablemente según el tiempo y el lugar.

** Este valor se obtiene mediante la ley de los gases perfectos (ecuación (2)).

1. *U.S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere: U.S. Standard Atmosphere*, 1962. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 1963

H_{p_0}	altura en la escala de presión;
l_0	camino libre medio;
n_0	densidad numérica;
$\overline{v_0}$	velocidad media de las partículas;
γ_0	peso específico;
ν_0	viscosidad cinemática;
λ_0	conductibilidad térmica;
μ_0	viscosidad dinámica;
ω_0	frecuencia de colisión.

Se divide la temperatura en varias capas según las variaciones de la temperatura en función de la altitud. Las zonas de transición entre dichas capas se denominan tropopausa, estratopausa y mesopausa respectivamente. Para calcular una atmósfera tipo, la temperatura de cada capa se toma como una función lineal de la altitud geopotencial, de modo que

$$T = T_b + \beta(H - H_b) \quad (11)$$

en que T_b y H_b son, respectivamente, la temperatura y la altitud geopotencial del límite inferior de la capa en cuestión y β , el gradiente térmico vertical, dT/dH

Los valores correspondientes a la temperatura y a sus gradientes verticales, adoptados para la atmósfera tipo de la OACI, aparecen en la Tabla D.

2.6 Temperatura y gradiente térmico vertical

Se toma $T_i = 273,15$ K como la temperatura de fusión del hielo a una presión de 1 013,25 hPa. La temperatura T (en Kelvins, K) es:

$$T = T_i + t \quad (10)$$

en que t es la temperatura en grados Celsius.

2.7 Presión

Adoptando la hipótesis de una variación lineal de la temperatura en función de la altitud geopotencial, la solución simultánea de la ecuación hidrostática (ecuación (1)) y de la ley de los gases perfectos (ecuación (2)) produce la siguiente expresión para la presión:

Tabla C. Características físicas de la atmósfera al nivel medio del mar

Símbolo	Valor	Unidad de medida
a_0	340,294	m/s
H_{p_0}	8 434,5	m
l_0	$66,328 \times 10^{-9}$	m
n_0	$25,471 \times 10^{24}$	m^{-3}
$\overline{v_0}$	458,94	m/s
γ_0	12,013	N/m ³
ν_0	$14,607 \times 10^{-6}$	m ² /s
λ_0	$25,343 \times 10^{-3}$	W/(m · K)
μ_0	$17,894 \times 10^{-6}$	Pa · s
ω_0	$6,919 3 \times 10^9$	s ⁻¹

$$\ln p = \ln p_b - \frac{g_0}{\beta R} \ln \frac{T_b + \beta(H - H_b)}{T_b}$$

o

$$p = p_b \left[1 + \frac{\beta}{T_b} (H - H_b) \right]^{-g_0/\beta R} \quad \text{para } \beta \neq 0 \quad (12)$$

y

$$\ln p = \ln p_b - \frac{g_0}{RT} (H - H_b)$$

o

$$p = p_b \exp \left[-\frac{g_0}{RT} (H - H_b) \right] \quad \text{para } \beta = 0 \quad (13)$$

Aquí el subíndice “b” relaciona los valores de las características pertinentes con el límite inferior de la capa en cuestión.

2.8 Densidad y peso específico

La densidad ρ se calcula a partir de la presión y la temperatura utilizando la ley de los gases perfectos:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (14)$$

El peso específico γ es el peso por unidad de volumen de aire, o sea:

$$\gamma = \rho g \quad (15)$$

2.9 Altura en la escala de presión

La altura en la escala de presión H_p se determina mediante la ecuación

$$H_p = \frac{R^*}{M_0} \cdot \frac{T}{g} = \frac{RT}{g} \quad (16)$$

Tabla D. Temperaturas y gradientes térmicos verticales

Altitud geopotential H , km	Temperatura T , K	Gradiente térmico β , K/km
-5,00	320,65	-6,50
0,00	288,15	-6,50
11,00	216,65	0,00
20,00	216,65	+1,00
32,00	228,65	+2,80
47,00	270,65	0,00
51,00	270,65	-2,80
71,00	214,65	-2,00
80,00	196,65	



2.10 Densidad numérica

La densidad numérica n , o sea, el número de partículas neutras del aire por unidad de volumen, se obtiene mediante la ecuación

$$n = \frac{N_A p}{R^* T} \quad (17)$$

2.11 Velocidad media de las partículas

La velocidad media de las partículas $\bar{v}$ se define como la media aritmética de las velocidades de las partículas de aire que se obtiene mediante la distribución de las velocidades moleculares de Maxwell en el gas perfecto monatómico en condiciones de equilibrio termodinámico, haciendo abstracción de toda fuerza exterior; de donde

$$\bar{v} = \left(\frac{8}{\pi} RT \right)^{1/2} = 1,595\,769 \sqrt{RT} \quad (18)$$

2.12 Camino libre medio

Una partícula de aire entre dos colisiones sucesivas se desplaza de manera uniforme a lo largo de una línea recta, pasando cierta distancia media, llamada camino libre medio de partículas de aire. Teniendo en cuenta la distribución de las velocidades relativas de las partículas en colisión el camino libre medio se define mediante la expresión

$$l = \frac{R^*}{\sqrt{2} \pi N_A \sigma^2} \cdot \frac{T}{p} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n} \quad (19)$$

2.13 Frecuencia de colisión

La frecuencia de colisión ω es la velocidad media de las partículas dividida por el camino libre medio a la misma altitud, o sea, $\omega = \bar{v}/l$ de aquí, teniendo en cuenta las ecuaciones (18) y (19)

$$\omega = 4 \sigma^2 N_A \left(\frac{\pi}{R^* M_0} \right)^{1/2} \cdot \frac{p}{T^{1/2}} = 0,944\,541 \times 10^{-18} n \sqrt{RT} \quad (20)$$

2.14 Velocidad del sonido

La velocidad del sonido a se obtiene mediante la expresión

$$a = (\kappa RT)^{1/2} = 20,046\,796 \sqrt{T} \quad (21)$$

en que

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$$

Esta expresión (ecuación (21)) presenta la velocidad de propagación de una perturbación infinitesimal en un gas. Debido a ello, esta fórmula no puede utilizarse para el cálculo, por ejemplo, de la velocidad de propagación de las ondas de choque causadas por una explosión, una detonación, el movimiento de un cuerpo en el aire a velocidad supersónica, etc.

El concepto de velocidad del sonido pierde su sentido con una atenuación muy intensa de los impulsos sónicos que tiene lugar por encima de los límites de altitud que se consideran para la atmósfera tipo de la OACI.

2.15 Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica μ se define como el valor de la fricción interna entre dos capas vecinas de aire que se desplazan a velocidades diferentes. Las tablas se establecen utilizando la ecuación siguiente, que se basa en la teoría cinética pero con constantes derivadas de experimentos:

$$\mu = \frac{\beta_s T^{3/2}}{T + S} \quad (22)$$

En esta ecuación, β_s y S son los coeficientes empíricos de Sutherland (véase la Tabla A).

La ecuación (22) es inválida para temperaturas muy altas o muy bajas y en las condiciones correspondientes a las altitudes superiores a 90 km.

2.16 Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática ν se define como la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del aire, o sea:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (23)$$

Los límites para el uso de esta ecuación son semejantes a los de la viscosidad dinámica.

2.17 Conductibilidad térmica

La conductibilidad térmica λ se calcula mediante la fórmula empírica siguiente:

$$\lambda = \frac{2,648\ 151 \times 10^{-3} \cdot T^{3/2}}{T + [245,4 \times 10^{-(12/T)}]} \quad (24)$$

en que λ se expresa como $W/(m \cdot K)$ y T en Kelvins.

3. OBSERVACIONES RELATIVAS A LA PRESENTACIÓN DE LAS TABLAS

Las tablas que figuran en la parte siguiente del presente manual se han calculado utilizando las constantes, coeficientes y ecuaciones que aparecen en la Sección 2.

Los cálculos se han llevado a cabo utilizando una computadora numérica Minsk-22 y el cálculo de los puntos de control separados con otros aparatos. Las tablas se han establecido directamente mediante dispositivos de impresión numéricos en las computadoras y se han reproducido mediante un lector óptico numérico con objeto de reducir al mínimo las posibilidades de error.

Los datos en las tablas se indican en unidades SI excepto en las Tablas 1 y 4, en las que las temperaturas se dan en grados Celsius y en las Tablas 4, 5 y 6, así como en la parte derecha de la Tabla 7, en las que las alturas se expresan en pies (ft).

Nota 1.— Un número de uno o dos dígitos (precedido por el signo más o menos) después de la entrada inicial de cada bloque indica la décima potencia que debe utilizarse para multiplicar dicha entrada y cada entrada subsiguiente de dicho bloque. Si se cambia la potencia dentro de un bloque, este hecho se indica mediante una inscripción semejante.

Nota 2.— Todas las tablas se han calculado para la capa desde -5 hasta 80 km, salvo las tablas hipsométricas (Tabla 7 que se han publicado únicamente hasta 32 km.

4. REFERENCIAS

1. R.J. List, ed.: *Smithsonian Meteorological Tables*, Sixth Revised Edition, Washington, D.C., 1963.
2. U.S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere: *U.S. Standard Atmosphere*, 1962. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C., 1962.

ПРЕДИСЛОВИЕ

По рекомендациям специализированных совещаний по летной годности, производству полетов и метеорологии Совет ИКАО на заседании 23 июня 1950 года решил создать объединенную подкомиссию Комиссии по авиационной метеорологии и Аэрологической комиссии Международной метеорологической организации для обсуждения с представителями ИКАО проблемы разработки подробных технических требований и данных Стандартной атмосферы ИКАО, определение которой приводится в общих чертах в части I Приложения 8 к Конвенции о международной гражданской авиации.

В июле-августе 1950 года в Монреале состоялось совещание Рабочей группы в составе вышеуказанных представителей, которое разработало предложение в отношении подробных технических требований к Стандартной атмосфере ИКАО. Это предложение было включено в документ Дос 7041 и в начале 1951 года направлено всем Договаривающимся государствам для замечаний.

7 ноября 1952 года Совет утвердил подробные технические требования к Стандартной атмосфере ИКАО, содержащиеся в документе Дос 7041, и поручил Генеральному секретарю опубликовать подробные требования и связанные с ними таблицы и цифровые данные в виде технического руководства.

Все предположения и основные данные, использованные в этом руководстве, соответствовали принятым Советом ИКАО. Техническая работа по расчетам и проверке подробных таблиц и цифровых данных, связанных со Стандартной атмосферой ИКАО, была выполнена Национальным консультативным комитетом Соединенных Штатов Америки по аэронавтике совместно с Генеральным директоратом гражданской авиации Италии. Благодаря любезности правительств Соединенных Штатов Америки и Италии результаты проделанной в этих странах работы были предоставлены для включения в вышеуказанное руководство, которое было опубликовано в качестве документа ИКАО Doc 7488 (май 1954 года).

Еще до публикации документа Дос 7488 стало очевидно, что верхнюю границу Стандартной атмосферы ИКАО необходимо будет поднять выше ранее принятого предела в 20 км. К 1953 году в Соединенных Штатах Америки совместно Директо-

ратом геофизических исследований, Кембриджским исследовательским центром ВВС и Метеорологическим бюро США был создан комитет. В том же году состоялось совещание представителей 24 научных и технических организаций Соединенных Штатов Америки, как правительственных, так и частных, на котором присутствовал наблюдатель от ИКАО. Вышеназванный комитет решил создать "рабочую группу по изменению верхней границы Стандартной атмосферы" для пересмотра температурно-высотного профиля и разработки рекомендаций в отношении основных значений и параметров. Рабочая группа функционировала в период 1953-1956 гг. и в 1956 году ее рекомендации, включая определение температурно-высотного профиля до высоты 32 км, были приняты с некоторыми изменениями комитетом. В 1958 году в Вашингтоне (округ Колумбия) был выпущен доклад под названием "Предлагаемое США расширение таблиц и данных Стандартной атмосферы ИКАО до 300 стандартных геопотенциальных километров". Этот доклад был направлен в 1959 году Генеральному секретарю ИКАО представителем Соединенных Штатов Америки в Совете ИКАО с предложением принять на международной основе часть доклада, касающуюся участка 20-32 км, однако это предложение впоследствии было снято в ожидании поступления пересмотренных данных.

В 1962 году Соединенные Штаты Америки представили подробные предложения об изменении некоторых констант, связанных со Стандартной атмосферой ИКАО, и о поднятии ее верхней границы вместе с документом, озаглавленным "Стандартная атмосфера США - Стандартная атмосфера ИКАО до 20 км, предлагаемое поднятие верхней границы атмосферы ИКАО до 32 км, таблицы и данные до 700 км". Это пересмотренное предложение США было разослано для представления замечаний всем Договаривающимся государствам, Международной ассоциации воздушного транспорта, Международной федерации ассоциаций линейных пилотов и Всемирной метеорологической организации.

12 ноября 1963 года Совет утвердил пересмотренные подробные технические требования к Стандартной атмосфере ИКАО и поручил Генеральному секретарю переиздать таблицы Стандартной атмосферы ИКАО, включая пересмотренные и расширенные данные, подготовленные Соединенными Штатами Америки. Во

исполнение этого поручения в 1964 году было опубликовано второе издание Руководства.

23 марта 1979 года Совет принял решение привести систему единиц измерения, используемых в авиации (указанные в Приложении 5), в соответствие с международной системой (СИ). В соответствии с пожеланием Совета, чтобы все документы ИКАО соответствовали Приложению 5 в отношении используемых единиц, были приняты меры с целью пересмотра Руководства по Стандартной атмосфере ИКАО. Учитывая тот факт, что второе издание Руководства содержало сложную комбинацию единиц СИ и единиц, не входящих в систему СИ, необходимо было пересчитать данные в некоторых таблицах.

В дополнение к задаче приведения единиц в соответствие с Приложением 5 два государства (Союз Советских Социалистических Республик и Соединенные Штаты Америки), учитывая возможность создания в обозримом будущем воздушных судов, рассчитанных на полеты на очень больших высотах, просили поднять верхнюю границу Стандартной атмосферы ИКАО с установленных 32 км до 80 км, что будет приблизительно соответствовать высоте мезопаузы. Предложение о поднятии верхней границы Стандартной атмосферы было разослано для представления замечаний всем Договаривающимся государствам и 22 марта 1988 года Совет после рассмотрения полученных ответов принял Поправку № 95 к Приложению 8, предусматривающую, в частности, поднятие верхней границы Стандартной атмосферы до 80 км. Поскольку пересмотр Руководства с целью приведения его в соответствие с Приложением 5 уже потребовал перерасчета некоторых данных в таблицах, было сочтено целесообразным также поднять верхнюю границу атмосферы.

В связи с перерасчетом данных в некоторых существующих таблицах и расширением данных во всех таблицах с 32 км до 80 км естественно потребовалось использовать сложные вычислительные средства, с тем чтобы сохранить существующий уровень точности

данных. С самого начала выполнения данной задачи было известно, что Международная организация по стандартизации (ИСО) недавно опубликовала Стандартную атмосферу до 80 км на основе параметров ИКАО, определенных в Приложении 8. Для приведения в соответствие Стандартных атмосфер ИСО и ИКАО к ИСО обратились с просьбой оказать содействие в предоставлении данных, необходимых для пересмотра и поднятия верхней границы Стандартной атмосферы ИКАО. Компетентный рабочий орган ИСО (Подкомитет ISO/TC-20/SC-6 - Стандартная атмосфера) на совещании, состоявшемся в Москве в октябре 1985 года, единогласно принял решение оказать содействие в пересчете таблиц, необходимых для приведения документа Doc 7488 в соответствие с Приложением 5 и поднятия верхней границы атмосферы в соответствии с Приложением 8.

Метод расчета параметров и необходимое программное обеспечение были разработаны в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) Союза Советских Социалистических Республик; сами расчеты также были выполнены в СССР от имени комитета ИСО в соответствии с требованиями ИКАО и планами ISO/TC-20/SC-6. Параллельно публикуются результаты работы ИСО в виде добавления 2 к международному стандарту ИСО 2533: 1975, Стандартная атмосфера.

Настоящее Руководство призвано содействовать единообразному применению Стандартной атмосферы ИКАО, определение которой содержится в Приложении 8, и предоставить в распоряжение тех, кто пользуется Стандартной атмосферой, удобный набор данных, которые являются достаточно точными для практического применения и которые основаны на согласованных на международной основе физических постоянных и переводных коэффициентах. Учитывая, что таблицы данных, опубликованные для Стандартных атмосфер ИКАО и ИСО, являются идентичными, разработка в будущем любых необходимых поправок будет координироваться этими двумя Организациями.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1. СФЕРА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.....	R-vii
2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ.....	R-vii
2.1 Основные постоянные и характеристики.....	R-vii
2.2 Гидростатическое уравнение и уравнение состояния идеального газа.....	R-viii
2.3 Геопотенциальная и геометрическая высоты; ускорение силы тяжести.....	R-ix
2.4 Состав атмосферы и средняя молярная масса.....	R-x
2.5 Физические характеристики атмосферы на среднем уровне моря.....	R-x
2.6 Температура и вертикальный температурный градиент.....	R-x
2.7 Давление.....	R-x
2.8 Плотность и удельный вес.....	R-xiii
2.9 Высота однородной по давлению атмосферы.....	R-xiii
2.10 Концентрация частиц воздуха.....	R-xiii
2.11 Средняя скорость частиц воздуха.....	R-xiii
2.12 Средняя длина свободного пробега частиц воздуха.....	R-xiii
2.13 Частота соударений частиц воздуха.....	R-xiii
2.14 Скорость звука.....	R-xiii
2.15 Динамическая вязкость.....	R-xiv
2.16 Кинематическая вязкость.....	R-xiv
2.17 Теплопроводность.....	R-xiv
3. ЗАМЕЧАНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТАБЛИЦ.....	R-xiv
4. СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ.....	R-xiv

ТАБЛИЦЫ

ТАБЛИЦА 1. Температура, давление, плотность и ускорение силы тяжести в функции геометрической и геопотенциальной высот (высоты в метрах).....	1-1
ТАБЛИЦА 2. Отношения p/P_0 , ρ/ρ_0 и $\sqrt{\rho/\rho_0}$, скорость звука, динамическая и кинематическая вязкость и теплопроводность в функции геометрической и геопотенциальной высот (высоты в метрах).....	2-1
ТАБЛИЦА 3. Высота однородной по давлению атмосферы, удельный вес, концентрация частиц воздуха, средняя скорость частиц воздуха, частота соударений частиц воздуха и средняя длина свободного пробега частиц воздуха в функции геометрической и геопотенциальной высот (высоты в метрах).....	3-1
ТАБЛИЦА 4. Температура, давление, плотность и ускорение силы тяжести в функции геометрической и геопотенциальной высот (высоты в футах).....	4-1
ТАБЛИЦА 5. Отношения p/P_0 , ρ/ρ_0 и $\sqrt{\rho/\rho_0}$, скорость звука, динамическая и кинематическая вязкость и теплопроводность в функции геометрической и геопотенциальной высот (высоты в футах).....	5-1
ТАБЛИЦА 6. Высота однородной по давлению атмосферы, удельный вес, концентрация частиц воздуха, средняя скорость частиц воздуха, частота соударений частиц воздуха и средняя длина свободного пробега частиц воздуха в функции геометрической и геопотенциальной высот (высоты в футах).....	6-1
ТАБЛИЦА 7. Геопотенциальная высота в зависимости от давления в гектопаскалях и долях гектопаскаля (высоты в метрах и футах).....	7-1

ВВЕДЕНИЕ

Примечание общего характера. В настоящем руководстве используется десятичная система счисления, применяемая в практике ИКАО. В соответствии с практикой ИСО для отделения десятичных знаков в имперской системе мер используется точка (.), а в метрической системе мер - запятая (,).

1. СФЕРА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящий Международный стандарт определяет характеристики Стандартной атмосферы ИКАО и предназначен для использования при расчетах и проектировании воздушных судов, представления результатов испытаний воздушных судов и их компонентов в одинаковых условиях и унификации в области разработки и калибровки приборов. Кроме того, этот Стандарт рекомендуется использовать при обработке данных геофизических и метеорологических наблюдений.

2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ

2.1 Основные постоянные и характеристики

Таблицы Стандартной атмосферы ИКАО рассчитаны исходя из предположения, что воздух является идеальным газом, свободным от влаги и пыли, и основаны на принятых исходных значениях температуры, давления и плотности воздуха на среднем уровне моря. При расчетах используются следующие постоянные и характеристики, численные значения которых указаны в таблице А:

g_0 стандартное ускорение силы тяжести. Его величина соответствует значению на широте $\phi = 45^\circ 32' 33''$, используя уравнение Ламберта для расчета ускорения силы тяжести в зависимости от широты ϕ (см. справочный материал 1):

$$g_\phi = 9,806\,16(1 - 0,002\,637\,3 \cos 2\phi + 0,000\,005\,9 \cos^2 2\phi)$$

M_0 средняя молярная масса на уровне моря, определяемая с помощью уравнения

состояния идеального газа (уравнение (2)) для заданных основных постоянных P_0, ρ_0, T_0, R^* (см. таблицу А);

N_A число Авогадро, основанное на значении атомной массы изотопа $C^{12} = 12,000$, которое было принято в 1961 году на конференции Международного союза чистой и прикладной химии в качестве основной единицы атомной массы;

P_0 атмосферное давление на уровне моря;

R^* универсальная газовая постоянная;

$R = R^*/M_0$ специфическая газовая постоянная;

S и β_s эмпирические коэффициенты Сазерленда в уравнении динамической вязкости;

T_i температура точки таяния льда на среднем уровне моря;

T_0 температура на уровне моря;

t_i температура точки таяния льда по Цельсию на среднем уровне моря;

t_0 температура по Цельсию на уровне моря;

$\kappa = c_p/c_v$ адиабатический коэффициент: отношение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении к удельной теплоемкости воздуха при постоянном объеме;

ρ_0 плотность атмосферы на уровне моря;

σ эффективный диаметр соударений молекулы воздуха берется постоянным для всех абсолютных высот.

**Таблица А. Основные постоянные и характеристики, принятые для расчета
Стандартной атмосферы ИКАО**

Условное обозначение	Значение	Единица измерения
g_0	9,806 65	м/с ²
M_0 (см. примечание)	28,964 420	кг/кмоль
N_A	$602,257 \times 10^{24}$	кмоль ⁻¹
P_0	$101,325 \times 10^3$	Па
	1 013,250	гПа
R^*	8 314,32	Дж/(К · кмоль) или кг · м ² /(с ² · К · кмоль)
R (см. примечание)	287,052 87	Дж/(К · кг) или м ² /(К · с ²)
S	110,4	К
T_i	273,15	К
T_0	288,15	К
t_i	0,00	°C
t_0	15,00	°C
β_s	$1,458 \times 10^{-6}$	кг/(м · с · К ^{1/2})
k	1,4	безразмерная величина
ρ_0	1,225	кг/м ³
σ	$0,365 \times 10^{-9}$	м
Примечание. Непосредственно не является основной постоянной; значение получено на основе основных постоянных.		

2.2 Гидростатическое уравнение и уравнение состояния идеального газа

На атмосферу, которая является неподвижной относительно Земли, действует сила тяжести. Условия статического равновесия воздуха определяются с помощью гидростатического уравнения, которое увязывает давление воздуха p , плотность ρ , ускорение силы тяжести g и высоту h следующим образом:

$$-dp = \rho g dh \quad (1)$$

Уравнение состояния идеального газа связывает давление воздуха с плотностью и температурой следующим образом:

$$p = \frac{\rho R^* T}{M_0} \quad (2)$$

На высотах, рассматриваемых в настоящем международном стандарте,

$$\frac{R^*}{M_0} = \text{постоянная} = R,$$

тогда

$$p = \rho RT \quad (3)$$

2.3 Геопотенциальная и геометрическая высоты; ускорение силы тяжести

При рассмотрении распределения давления в атмосфере удобно ввести гравитационный потенциал или геопотенциал Φ , который характеризует потенциальную энергию частицы воздуха в данной точке.

Любая точка с координатами x, y, z может характеризоваться одним значением гравитационного потенциала $\Phi(x, y, z)$ в этой точке. Поверхность, определяемая уравнением

$$\Phi(x, y, z) = \text{постоянная},$$

имеет одинаковый потенциал во всех точках и называется изопотенциальной или геопотенциальной поверхностью. При движении вдоль внешней нормали от любой точки на поверхности Φ_1 к бесконечно приближенной точке, где величина потенциала составляет $\Phi_2 = \Phi_1 + d\Phi$, выполняемая работа по перемещению единицы массы с первой поверхности на вторую будет равна:

$$d\Phi = g(h)dh \quad (4)$$

следовательно,

$$\Phi = \int_0^h g(h)dh \quad (5)$$

Разделив геопотенциал Φ на стандартное ускорение силы тяжести g_0 , получим значение размерности длины, которая обозначается H и равна:

$$H = \frac{\Phi}{g_0} = \frac{1}{g_0} \int_0^h g(h)dh \quad (6)$$

Значение H , выраженное в метрах, численно равно геопотенциальной высоте, которая в метеорологии измеряется в так называемых стандартных геопотенциальных метрах; следовательно, этот параметр будет называться геопотенциальной высотой. Средний уровень моря берется в качестве исходной точки для отсчета геопотенциальной и геометрической высот.

Примечание. Всемирная метеорологическая организация приняла стандартный геопотенциальный метр (м'), который равен 9,806 65 м²/с² (см. Технический регламент ВМО № 49, том 1, издание 1971 года, добавление С), и с 1 июля 1972 года заменяет ранее использовавшийся геопотенциальный метр. Он был равен 9,8 м²/с².

Из уравнения (6) следует, что для соотношения геопотенциальной и геометрической высот в первую очередь необходимо найти зависимость между ускорением силы тяжести g и геометрической высотой h .

Известно, что сила тяжести является векторной суммой силы гравитационного притяжения и центробежной силы, возникающей вследствие вращения Земли; следовательно, это комплексная функция широты и радиального расстояния от центра Земли, и выражение силы тяжести, как правило, является трудным и его нецелесообразно использовать. Однако ускорение g можно определить с достаточной точностью для целей данной Стандартной атмосферы, если формально пренебречь центробежным ускорением и использовать только закон тяготения Ньютона. В этом случае:

$$g = g_0 \left(\frac{r}{r+h} \right)^2, \quad (7)$$

где $r = 6\,356\,766$ м - номинальный радиус Земли (см. справочный материал 1), при котором ускорение силы тяжести и вертикальный градиент ускорения на среднем уровне моря очень близки к истинным значениям на широте 45°32'33".

Значение g , рассчитанное с помощью упрощенного уравнения (7) при $g_0 = 9,806\,65$ м/с² для высоты 60 000 м, отличается от значений, рассчитанных с использованием более точного уравнения (6), не более чем на 0,001 процента.

Интеграция уравнения (6) посредством замены g его функцией из уравнения (7) дает следующее соотношение между геопотенциальной и геометрической высотами:

$$H = \frac{rh}{r+h} \quad (8)$$

$$h = \frac{rH}{r-H} \quad (9)$$

2.4 Состав атмосферы и средняя молярная масса

Атмосфера Земли представляет собой смесь газа, водяного пара и некоторого количества аэрозоли. В определенных условиях количество водяного пара, углекислого газа и озона, а также других ингредиентов, содержание которых в атмосфере является незначительным, может варьироваться. Содержание водяного пара сильно колеблется; его концентрация на поверхности Земли может достигать 4 процентов при высокой температуре и резко уменьшается по мере увеличения высоты и снижения температуры. Состав сухого чистого воздуха до высот 90-95 км остается практически постоянным и соответствует указанному в таблице В.

Средняя молярная масса определяется с помощью уравнения состояния идеального газа (уравнение (2)) с использованием стандартных значений давления P_0 , плотности ρ_0 и температуры T_0 на среднем уровне моря, а также универсальной газовой постоянной R^* .

2.5 Физические характеристики атмосферы на среднем уровне моря

При расчете Стандартной атмосферы ИКАО средний уровень моря определяется как нулевая абсолютная высота, в отношении которой применяются исходные характеристики g_0 , P_0 , ρ_0 и T_0 , указанные в таблице А. Остальные параметры рассчитаны на основе исходных характеристик и представлены в таблице С:

a_0	скорость звука;
H_{p0}	высота однородной по давлению атмосферы;
I_0	средняя длина свободного пробега частиц воздуха;
n_0	концентрация частиц воздуха;
$\bar{V}_0$	средняя скорость частиц воздуха;
γ_0	удельный вес;
ν_0	кинематическая вязкость;
λ_0	теплопроводность;
μ_0	динамическая вязкость;

ω_0 частота соударений частиц воздуха.

2.6 Температура и вертикальный температурный градиент

Температура точки таяния льда при давлении 1013,25 гПа принимается равной $T_i = 273,15$ К. Температура T (по шкале Кельвина, К) равна:

$$T = T_i + t, \quad (10)$$

где t - температура по Цельсию.

Атмосфера делится на несколько слоев в соответствии с изменением температуры с высотой. Переходные зоны между этими слоями называются соответственно тропопаузой, стратопаузой и мезопаузой. При расчете Стандартной атмосферы температура каждого слоя находится в линейной зависимости от геопотенциальной высоты и, таким образом,

$$T = T_b + \beta(H - H_b), \quad (11)$$

где T_b и H_b - соответственно температура и геопотенциальная высота нижней границы рассматриваемого слоя, а β - вертикальный температурный градиент, dT/dH .

Значения температуры и ее вертикальных градиентов, принятые для Стандартной атмосферы ИКАО, указаны в таблице D.

2.7 Давление

Если предположить линейное изменение температуры с геопотенциальной высотой, то одновременное решение гидростатического уравнения (уравнение (1)) и уравнения состояния идеального газа (уравнение (2)) дает следующее выражение для давления:

$$\ln p = \ln p_b - \frac{g_0}{\beta R} \ln \frac{T_b + \beta(H - H_b)}{T_b}$$

или

$$p = p_b \left[1 + \frac{\beta}{T_b} (H - H_b) \right]^{-g_0/\beta R} \quad \text{при } \beta \neq 0 \quad (12)$$

и

Таблица В. Состав сухого чистого воздуха вблизи уровня моря¹

Газ	Объемное содержание %	Молярная масса <i>M</i> кг/кмоль
Азот (N ₂)	78,084	28,013 4
Кислород (O ₂)	20,947 6	31,998 8
Аргон (Ar)	0,934	39,948
Углекислый газ (CO ₂)	0,031 4*	44,009 95
Неон (Ne)	1,818 x 10 ⁻³	20,183
Гелий (He)	524,0 x 10 ⁻⁶	4,002 6
Криптон (Kr)	114,0 x 10 ⁻⁶	83,80
Хсенон (Xe)	8,7 x 10 ⁻⁶	131,30
Водород (H ₂)	50,0 x 10 ⁻⁶	2,015 94
Закись азота (N ₂ O)	50,0 x 10 ^{-6*}	44,012 8
Метан (CH ₄)	0,2 x 10 ⁻³	16,043 03
Озон (O ₃)	летом до 7,0 x 10 ^{-6*}	47,998 2
	зимой до 2,0 x 10 ^{-6*}	47,998 2
Двуокись серы (SO ₂)	до 0,1 x 10 ^{-3*}	64,062 8
Двуокись азота (NO ₂)	до 2,0 x 10 ^{-6*}	46,005 5
Йод (I ₂)	до 1,0 x 10 ^{-6*}	253,808 8
Воздух	100	28,964 420**

* Содержание газа может значительно изменяться в зависимости от времени и места.
 ** Это значение получено с помощью уравнения состояния идеального газа (2).

1. U.S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere: U.S. Standard Atmosphere, 1962.
 U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 1963.

**Таблица С. Физические характеристики атмосферы
на среднем уровне моря**

Условное обозначение	Значение	Единица измерения
a_0	340,294	м/с
H_{p0}	8 434,5	м
I_0	$66,328 \times 10^{-9}$	м
n_0	$25,471 \times 10^{24}$	м ⁻³
$\bar{V}_0$	458,94	м/с
γ_0	12,013	Н/м ³
ν_0	$14,607 \times 10^{-6}$	м ² /с
λ_0	$25,343 \times 10^{-3}$	Вт/(м · К)
μ_0	$17,894 \times 10^{-6}$	Па · с
ω_0	$6,919 3 \times 10^9$	с ⁻¹

**Таблица D. Значения температуры и вертикальных
температурных градиентов**

Геопотенциальная высота H , км	Температура T , К	Температурный градиент β , К/км
-5,00	320,65	
0,00	288,15	-6,50
11,00	216,65	-6,50
20,00	216,65	0,00
32,00	228,65	+1,00
47,00	270,65	+2,80
51,00	270,65	0,00
71,00	214,65	-2,80
80,00	196,65	-2,00

$$\ln p = \ln p_b - \frac{g_0}{RT} (H - H_b)$$

или

$$p = p_b \exp \left[-\frac{g_0}{RT} (H - H_b) \right] \text{ при } \beta = 0 \quad (13)$$

Нижний подстрочный индекс "b" относится к значениям характеристик, соответствующих нижней границе рассматриваемого слоя.

2.8 Плотность и удельный вес

Плотность ρ рассчитывается по давлению и температуре с помощью уравнения состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (14)$$

Удельный вес γ - вес на единицу объема воздуха, т. е.

$$\gamma = \rho g \quad (15)$$

2.9 Высота однородной по давлению атмосферы

Высота однородной по давлению атмосферы H_p определяется по формуле

$$H_p = \frac{R^*}{M_0} \cdot \frac{T}{g} = \frac{RT}{g} \quad (16)$$

2.10 Концентрация частиц воздуха

Концентрация частиц воздуха n , т. е. число нейтральных частиц воздуха на единицу объема, задается уравнением

$$n = \frac{N_A p}{R^* T} \quad (17)$$

2.11 Средняя скорость частиц воздуха

Средняя скорость частиц воздуха $\bar{v}$ определяется как среднее арифметическое скоростей частиц воздуха, полученное из распределения Максвелла молекулярных скоростей в одноатомном идеальном газе в условиях термодинамического равновесия без учета какой-либо внешней силы; следовательно,

$$\bar{v} = \left(\frac{8}{\pi} RT \right)^{1/2} = 1,595\,769 \sqrt{RT} \quad (18)$$

2.12 Средняя длина свободного пробега частиц воздуха

Между двумя последовательными соударениями частица воздуха движется равномерно по прямой линии, проходя определенное среднее расстояние, называемое средней длиной свободного пробега частиц воздуха. С учетом распределения относительных скоростей соударяющихся частиц средняя длина свободного пробега определяется по формуле

$$l = \frac{R^*}{\sqrt{2\pi} N_A \sigma^2} \cdot \frac{T}{p} = \frac{l}{\sqrt{2\pi} \sigma^2 n} \quad (19)$$

2.13 Частота соударений частиц воздуха

Частота соударений частиц воздуха ω - частное от деления средней скорости частиц воздуха на среднюю длину свободного пробега на той же высоте, т. е. $\omega = \bar{v} / l$; следовательно, с учетом уравнений (18) и (19)

$$\omega = 4 \sigma^2 N_A \left(\frac{\pi}{R^* M_0} \right)^{1/2} \cdot \frac{p}{T^{1/2}} = 0,944\,541 \times 10^{-18} n \sqrt{RT} \quad (20)$$

2.14 Скорость звука

Для скорости звука a принято выражение

$$a = (\kappa RT)^{1/2} = 20,046\,796 \sqrt{T} \quad (21)$$

где

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$$

Это выражение (уравнение (21)) представляет собой скорость распространения бесконечно малого возмущения в газе. По этой причине данную формулу нельзя использовать для расчета, например скорости распространения ударных волн в результате взрыва, детонации, движения тела в воздухе и сверхзвуковой скорости и т. д.

Концепция скорости звука теряет свое назначение при очень интенсивном затухании акустических импульсов, которое имеет место выше предельных высот, рассматриваемых в рамках Стандартной атмосферы ИКАО.

2.15 Динамическая вязкость

Динамическая вязкость μ определяется как значение внутреннего трения двух расположенных рядом слоев воздуха, движущихся с разными скоростями. При расчете таблиц используется следующее уравнение, которое взято из кинематической теории, но с постоянными, полученными экспериментальным путем:

$$\mu = \frac{\beta_s T^{3/2}}{T + S} \quad (22)$$

В данном уравнении β_s и S - эмпирические коэффициенты Сазерленда (см. таблицу А).

Уравнение (22) не применимо в случае очень высоких или очень низких температур, а также в условиях, наблюдаемых на высотах выше 90 км.

2.16 Кинематическая вязкость

Кинематическая вязкость ν определяется как отношение динамической вязкости к плотности воздуха, т. е.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (23)$$

Условия применения данного уравнения аналогичны указанным для динамической вязкости.

2.17 Теплопроводность

Теплопроводность λ рассчитывается по следующей эмпирической формуле:

$$\lambda = \frac{2,648\,151 \times 10^{-3} \cdot T^{3/2}}{T + [245,4 \times 10^{(12/T)}]} \quad (24)$$

где λ - Вт/(м · К) и T выражается по шкале Кельвина.

3. ЗАМЕЧАНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТАБЛИЦ

Содержащиеся в следующей части настоящего руководства таблицы рассчитаны с использованием постоянных, коэффициентов и уравнений, приведенных в разделе 2 выше.

Расчеты были выполнены на цифровой вычислительной машине "Минск-22", при этом расчет отдельных контрольных точек осуществлялся на других машинах. Таблицы составлялись непосредственно цифровыми печатающими устройствами ЭВМ и воспроизводились цифровым оптическим сканирующим устройством, с тем чтобы свести к минимуму вероятность ошибок.

Данные в таблицах даны в единицах системы СИ, за исключением таблиц 1 и 4, в которых температура указана в градусах Цельсия, и таблиц 4, 5 и 6, а также правых страниц таблицы 7, где высоты даны в футах.

Примечание 1. Одно- или двух-разрядное число (которому предшествует знак плюс или минус) после исходного значения каждого блока представляет собой показатель степени числа по основанию 10, на которое должно умножаться данное значение и каждое последующее значение этого блока. Изменение показателя степени в блоке указывается аналогичным обозначением.

Примечание 2. Все таблицы рассчитаны для слоя от -5 до 80 км, за исключением гипсометрических таблиц (таблица 7), которые рассчитаны только до высоты 32 км.

4. СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

1. R.J. List, ed. *Smithsonian Meteorological Tables*, Sixth Revised Edition. Washington, D.C. 1963.
2. U.S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere. *U.S. Standard Atmosphere, 1962*. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 1962.

TABLE 1

Temperature (T and t), pressure (p), density (ρ) and acceleration due to gravity (g)
in terms of geometrical altitude (h) and geopotential altitude (H)
(altitudes in metres)

TABLEAU 1

Température (T et t), pression (p), masse volumique (ρ) et accélération due à la pesanteur (g)
en fonction de l'altitude géométrique (h) et de l'altitude géopotentielle (H)
(altitudes en mètres)

TABLA 1

Temperatura (T y t), presión (p), densidad (ρ) y aceleración debida a la gravedad (g)
en función de la altitud geométrica (h) y geopotencial (H)
(altitudes en metros)

ТАБЛИЦА 1

Температура (T и t), давление (p), плотность (ρ) и ускорение силы тяжести (g)
в функции геометрической (h) и геопотенциальной (H) высот
(высоты в метрах)

VALUES IN TERMS OF GEOMETRICAL ALTITUDE
VALEURS EN FONCTION DE L'ALTITUDE GÉOMÉTRIQUE
VALORES EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD GEOMÉTRICA
ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ В ФУНКЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ

h (m)	H (m)	T (K)	t (°C)	p (hPa)	ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)
h (m)	H (m)	T (K)	t (°C)	p (гПа)	ρ (кг/м ³)	g (м/с ²)

VALUES IN TERMS OF GEOPOTENTIAL ALTITUDE
VALEURS EN FONCTION DE L'ALTITUDE GÉOPOTENTIELLE
VALORES EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD GEOPOTENCIAL
ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ В ФУНКЦИИ ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ

H (m)	h (m)	T (K)	t (°C)	p (hPa)	ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)
H (m)	h (m)	T (K)	t (°C)	p (гПа)	ρ (кг/м ³)	g (м/с ²)

VALUES IN TERMS OF GEOMETRICAL ALTITUDE

h (m)	H (m)	T (K)	t (°C)	p (hPa)	ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)
-5 000	-5 004	320.676	47.526	1.77762 +3	1.93113 +0	9.8221
-4 950	-4 954	320.350	47.200	1.76815	1.92280	9.8219
-4 900	-4 904	320.025	46.875	1.75873	1.91450	9.8218
-4 850	-4 854	319.699	46.549	1.74935	1.90622	9.8216
-4 800	-4 804	319.374	46.224	1.74001	1.89798	9.8215
-4 750	-4 754	319.048	45.898	1.73071	1.88976	9.8213
-4 700	-4 703	318.723	45.573	1.72145	1.88157	9.8212
-4 650	-4 653	318.397	45.247	1.71223	1.87340	9.8210
-4 600	-4 603	318.072	44.922	1.70305	1.86527	9.8209
-4 550	-4 553	317.746	44.596	1.69391	1.85716	9.8207
-4 500	-4 503	317.421	44.271	1.68481 +3	1.84907 +0	9.8205
-4 450	-4 453	317.095	43.945	1.67575	1.84102	9.8204
-4 400	-4 403	316.770	43.620	1.66673	1.83299	9.8202
-4 350	-4 353	316.444	43.294	1.65775	1.82499	9.8201
-4 300	-4 303	316.119	42.969	1.64881	1.81701	9.8199
-4 250	-4 253	315.793	42.643	1.63991	1.80907	9.8198
-4 200	-4 203	315.468	42.318	1.63105	1.80115	9.8196
-4 150	-4 153	315.143	41.993	1.62222	1.79325	9.8195
-4 100	-4 103	314.817	41.667	1.61344	1.78538	9.8193
-4 050	-4 053	314.492	41.342	1.60469	1.77754	9.8192
-4 000	-4 003	314.166	41.016	1.59598 +3	1.76973 +0	9.8190
-3 950	-3 952	313.841	40.691	1.58731	1.76194	9.8188
-3 900	-3 902	313.516	40.366	1.57868	1.75418	9.8187
-3 850	-3 852	313.190	40.040	1.57009	1.74644	9.8185
-3 800	-3 802	312.865	39.715	1.56154	1.73873	9.8184
-3 750	-3 752	312.539	39.389	1.55302	1.73105	9.8182
-3 700	-3 702	312.214	39.064	1.54454	1.72339	9.8181
-3 650	-3 652	311.889	38.739	1.53610	1.71576	9.8179
-3 600	-3 602	311.563	38.413	1.52769	1.70816	9.8178
-3 550	-3 552	311.238	38.088	1.51933	1.70058	9.8176
-3 500	-3 502	310.913	37.763	1.51100 +3	1.69303 +0	9.8175
-3 450	-3 452	310.587	37.437	1.50271	1.68550	9.8173
-3 400	-3 402	310.262	37.112	1.49445	1.67800	9.8171
-3 350	-3 352	309.936	36.786	1.48623	1.67052	9.8170
-3 300	-3 302	309.611	36.461	1.47805	1.66307	9.8168
-3 250	-3 252	309.286	36.136	1.46991	1.65565	9.8167
-3 200	-3 202	308.960	35.810	1.46180	1.64825	9.8165
-3 150	-3 152	308.635	35.485	1.45373	1.64088	9.8164
-3 100	-3 102	308.310	35.160	1.44569	1.63353	9.8162
-3 050	-3 051	307.985	34.835	1.43769	1.62620	9.8161
-3 000	-3 001	307.659	34.509	1.42973 +3	1.61891 +0	9.8159
-2 950	-2 951	307.334	34.184	1.42180	1.61163	9.8158
-2 900	-2 901	307.009	33.859	1.41391	1.60439	9.8156
-2 850	-2 851	306.683	33.533	1.40605	1.59716	9.8154
-2 800	-2 801	306.358	33.208	1.39823	1.58997	9.8153
-2 750	-2 751	306.033	32.883	1.39045	1.58279	9.8151
-2 700	-2 701	305.707	32.557	1.38270	1.57565	9.8150
-2 650	-2 651	305.382	32.232	1.37498	1.56852	9.8148
-2 600	-2 601	305.057	31.907	1.36730	1.56143	9.8147
-2 550	-2 551	304.732	31.582	1.35966	1.55435	9.8145
-2 500	-2 501	304.406	31.256	1.35205 +3	1.54731 +0	9.8144
-2 450	-2 451	304.081	30.931	1.34447	1.54028	9.8142
-2 400	-2 401	303.756	30.606	1.33693	1.53328	9.8141
-2 350	-2 351	303.431	30.281	1.32942	1.52631	9.8139
-2 300	-2 301	303.105	29.955	1.32195	1.51936	9.8138
-2 250	-2 251	302.780	29.630	1.31451	1.51243	9.8136
-2 200	-2 201	302.455	29.305	1.30711	1.50553	9.8134
-2 150	-2 151	302.130	28.980	1.29974	1.49865	9.8133
-2 100	-2 101	301.805	28.655	1.29240	1.49180	9.8131
-2 050	-2 051	301.479	28.329	1.28510	1.48497	9.8130

VALUES IN TERMS OF GEOPOTENTIAL ALTITUDE

<i>H</i> (m)	<i>h</i> (m)	<i>T</i> (K)	<i>t</i> (°C)	<i>p</i> (hPa)	ρ (kg/m ³)	<i>g</i> (m/s ²)
-5 000	-4 996	320.650	47.500	1.77687 +3	1.93047 +0	9.8221
-4 950	-4 946	320.325	47.175	1.76743	1.92216	9.8219
-4 900	-4 896	320.000	46.850	1.75802	1.91387	9.8218
-4 850	-4 846	319.675	46.525	1.74866	1.90561	9.8216
-4 800	-4 796	319.350	46.200	1.73933	1.89738	9.8215
-4 750	-4 746	319.025	45.875	1.73005	1.88918	9.8213
-4 700	-4 697	318.700	45.550	1.72081	1.88100	9.8212
-4 650	-4 647	318.375	45.225	1.71160	1.87285	9.8210
-4 600	-4 597	318.050	44.900	1.70244	1.86473	9.8208
-4 550	-4 547	317.725	44.575	1.69332	1.85663	9.8207
-4 500	-4 497	317.400	44.250	1.68423 +3	1.84856 +0	9.8205
-4 450	-4 447	317.075	43.925	1.67519	1.84052	9.8204
-4 400	-4 397	316.750	43.600	1.66618	1.83250	9.8202
-4 350	-4 347	316.425	43.275	1.65722	1.82451	9.8201
-4 300	-4 297	316.100	42.950	1.64829	1.81655	9.8199
-4 250	-4 247	315.775	42.625	1.63940	1.80862	9.8198
-4 200	-4 197	315.450	42.300	1.63056	1.80071	9.8196
-4 150	-4 147	315.125	41.975	1.62175	1.79283	9.8195
-4 100	-4 097	314.800	41.650	1.61297	1.78497	9.8193
-4 050	-4 047	314.475	41.325	1.60424	1.77714	9.8191
-4 000	-3 997	314.150	41.000	1.59555 +3	1.76934 +0	9.8190
-3 950	-3 948	313.825	40.675	1.58689	1.76156	9.8188
-3 900	-3 898	313.500	40.350	1.57827	1.75381	9.8187
-3 850	-3 848	313.175	40.025	1.56969	1.74608	9.8185
-3 800	-3 798	312.850	39.700	1.56115	1.73839	9.8184
-3 750	-3 748	312.525	39.375	1.55264	1.73071	9.8182
-3 700	-3 698	312.200	39.050	1.54418	1.72307	9.8181
-3 650	-3 648	311.875	38.725	1.53575	1.71544	9.8179
-3 600	-3 598	311.550	38.400	1.52735	1.70785	9.8178
-3 550	-3 548	311.225	38.075	1.51900	1.70028	9.8176
-3 500	-3 498	310.900	37.750	1.51068 +3	1.69274 +0	9.8175
-3 450	-3 448	310.575	37.425	1.50240	1.68522	9.8173
-3 400	-3 398	310.250	37.100	1.49415	1.67773	9.8171
-3 350	-3 348	309.925	36.775	1.48594	1.67026	9.8170
-3 300	-3 298	309.600	36.450	1.47777	1.66282	9.8168
-3 250	-3 248	309.275	36.125	1.46964	1.65540	9.8167
-3 200	-3 198	308.950	35.800	1.46154	1.64801	9.8165
-3 150	-3 148	308.625	35.475	1.45348	1.64065	9.8164
-3 100	-3 098	308.300	35.150	1.44545	1.63331	9.8162
-3 050	-3 049	307.975	34.825	1.43746	1.62599	9.8161
-3 000	-2 999	307.650	34.500	1.42950 +3	1.61870 +0	9.8159
-2 950	-2 949	307.325	34.175	1.42158	1.61144	9.8158
-2 900	-2 899	307.000	33.850	1.41370	1.60420	9.8156
-2 850	-2 849	306.675	33.525	1.40585	1.59698	9.8154
-2 800	-2 799	306.350	33.200	1.39804	1.58979	9.8153
-2 750	-2 749	306.025	32.875	1.39026	1.58262	9.8151
-2 700	-2 699	305.700	32.550	1.38252	1.57548	9.8150
-2 650	-2 649	305.375	32.225	1.37481	1.56837	9.8148
-2 600	-2 599	305.050	31.900	1.36714	1.56128	9.8147
-2 550	-2 549	304.725	31.575	1.35950	1.55421	9.8145
-2 500	-2 499	304.400	31.250	1.35190 +3	1.54717 +0	9.8144
-2 450	-2 449	304.075	30.925	1.34433	1.54015	9.8142
-2 400	-2 399	303.750	30.600	1.33679	1.53316	9.8141
-2 350	-2 349	303.425	30.275	1.32929	1.52619	9.8139
-2 300	-2 299	303.100	29.950	1.32183	1.51924	9.8137
-2 250	-2 249	302.775	29.625	1.31439	1.51232	9.8136
-2 200	-2 199	302.450	29.300	1.30700	1.50542	9.8134
-2 150	-2 149	302.125	28.975	1.29963	1.49855	9.8133
-2 100	-2 099	301.800	28.650	1.29230	1.49170	9.8131
-2 050	-2 049	301.475	28.325	1.28500	1.48488	9.8130