

Г.С. Аронин

Практическая аэродинамика

Учебник для летного состава

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Г11

Г11 **Г.С. Аронин**
Практическая аэродинамика: Учебник для летного состава / Г.С. Аронин – М.: Книга по Требованию, 2024. – 384 с.

ISBN 978-5-458-26958-2

Книга предназначена для летного состава ВВС, владеющего элементарными знаниями в области теории и техники полета и знакомого с физикой и математикой в объеме программы средней школы. В книге изложены аэродинамические, летно-тактические и пилотажные свойства самолетов с турбореактивными двигателями, причем особое внимание уделено сверхзвуковым самолетам.

ISBN 978-5-458-26958-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



РАЗДЕЛ I

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА САМОЛЕТ

ГЛАВА I

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЗДУХА И ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

При движении самолета в воздухе возникают силы, которые называют аэродинамическими. Их образование связано с определенными механическими свойствами воздуха, проявляющимися при движении, а именно: инертностью, сжимаемостью и вязкостью.

Инертностью называется стремление тела сохранить состояние покоя или прямолинейного и равномерного движения. Мерой инертности тела является его масса.

Инертность воздуха удобно оценивать его массовой плотностью, которая равна массе одного кубического метра воздуха. Чем больше массовая плотность воздуха, тем он инертнее.

Сжимаемостью называется свойство среды увеличивать свою массовую плотность при повышении давления и уменьшать плотность при понижении давления.

Вязкостью называется свойство среды сопротивляться сдвигу одних ее слоев относительно других (соседних), проявляющееся в возникновении между этими слоями внутреннего трения.

§ 1. Основы молекулярной теории газов

Все тела — твердые, жидкие и газообразные — состоят из молекул. В газообразных телах расстояния между молекулами значительно больше размеров самих молекул, поэтому взаимное притяжение молекул почти отсутствует. Однако размеры молекул столь малы, что, несмотря на относительно большие промежутки между ними, в одном кубическом микроме газа (т. е. в миллиардной доле кубического миллиметра) содержится при нормальных атмосферных условиях почти $3 \cdot 10^7$ молекул.

Каждая молекула обладает некоторой массой. Произведение этой массы на число молекул в 1 м^3 газа представляет собой массовую плотность газа ρ . Масса молекулы пропорциональ-

на молекулярному весу данного вещества. Поэтому при равном количестве молекул в единице объема газы с меньшим молекулярным весом имеют и меньшую массовую плотность. Например, молекулярный вес водорода равен 2, а кислорода 16; значит, массовая плотность последнего в 8 раз выше массовой плотности водорода.

Молекулы газа движутся непрерывно и беспорядочно (хаотически). Скорость движения достигает сотен, а иногда и тысяч метров в секунду. Можно считать, что каждая молекула газа движется прямолинейно и равномерно до тех пор, пока не столкнется с другой молекулой или с поверхностью тела (стенкой сосуда, поверхностью самолета и т. п.). При столкновении величина и направление скорости молекулы изменяются, после чего молекула снова движется равномерно и прямолинейно до нового столкновения. При нормальных атмосферных условиях каждая молекула воздуха испытывает около 7,5 млрд. столкновений в секунду, при этом средняя длина ее пробега между столкновениями составляет менее $\frac{1}{10}$ микрона. Молекула, движущаяся поступательно, обладает кинетической энергией $\frac{m_m v^2}{2}$ (m_m — масса молекулы; v — скорость ее движения).

В смеси газов (например, в воздухе) средние кинетические энергии молекул с разными массами одинаковы: при столкновении тяжелой молекулы с легкой последняя отскакивает с большей скоростью, чем первая; при этом меньшая масса компенсируется большей скоростью. Средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения молекулы пропорциональна степени нагретости, или абсолютной температуре газа, т. е.

$$\left(\frac{m_m v^2}{2} \right)_{\text{ср}} = cT,$$

где T — абсолютная температура;

c — коэффициент пропорциональности.

Если считать массы всех молекул одинаковыми, то получим следующее выражение средней скорости молекулы:

$$v_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{2c}{m_m} \cdot T}.$$

Следовательно, средняя скорость молекул пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры.

Для воздуха при $T = 288^\circ$ абс., т. е. при температуре $t = +15^\circ \text{C}$, $v_{\text{ср}} \approx 500$ м/сек.

Охлаждение газа означает уменьшение кинетической энергии беспорядочного движения молекул. Полное прекращение беспорядочного движения соответствует абсолютному нулю температуры.

Сложные молекулы, состоящие из нескольких атомов, обладают кинетической энергией не только поступательного, но и вращательного движения, которое также является беспорядочным. У двух-

атомных молекул (азота, кислорода, водорода) энергия вращательного движения составляет 40%, а у многоатомных (углекислый газ, водяной пар) — 50% всей энергии хаотического движения.

Суммарную кинетическую энергию молекулярного движения газа можно рассматривать как его внутреннюю энергию. Она так же, как и энергия поступательного движения молекул, пропорциональна абсолютной температуре газа.

Заметим, что внутренняя энергия некоторой массы данного газа зависит только от его температуры и не зависит от объема, в который этот газ заключен, т. е. от его плотности.

Направление движения какой-либо молекулы в данный момент случайно, причем в покоем газе все направления равновероятны. Практически можно полагать, что в данном объеме газа в каждый момент времени в любом направлении движется одинаковое количество молекул. За секунду каждый квадратный метр поверхности сосуда, заключающего газ, или тела, находящегося в газе, подвергается одному и тому же числу ударов молекул. Отскакивая, молекулы оказывают на поверхность силовое воздействие — давление. Хотя из-за шероховатости поверхности и беспорядочности движения молекул направление отскока каждой из них может быть случайным, суммарная сила давления направлена перпендикулярно к поверхности, поскольку все боковые направления равновероятны. Количественно давление оценивается силой, приходящейся на 1 м^2 поверхности.

Величина давления определяется из таких соображений. Пусть молекула движется перпендикулярно к стенке со скоростью v (рис. 1.01). Количество ее движения равно $m_M v$. После отскока от стенки при абсолютно упругом ударе количество движения равно $-m_M v$. Таким образом, при ударе количество движения молекулы в направлении, перпендикулярном к стенке, изменилось на величину $2 m_M v$.

Если 1 м^2 поверхности за 1 сек испытывает N таких ударов молекул, имеющих среднюю скорость v , то общее изменение количества движения за 1 сек выразится величиной $2 m_M v N$. На основании второго закона Ньютона сила будет равна секундному изменению количества движения. Таким образом, сила, действующая на 1 м^2 , т. е. давление, равняется

$$p = 2 N m_M v.$$

Очевидно, величина N тем больше, чем больше молекул находится в объеме, прилегающем

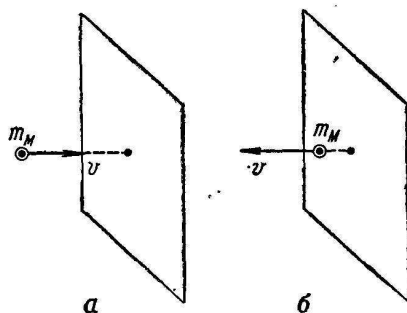


Рис. 1.01. Движение молекулы газа: а — до удара о поверхность стенки; б — после отскока от стенки

к поверхности, и чем быстрее они оборачиваются, т. е. чем выше их средняя скорость v . Количество молекул в 1 м^3 газа равно массе этого газа (т. е. плотности ρ), поделенной на массу одной молекулы, которая пропорциональна молекулярному весу газа μ . Значит, можно написать:

$$N = c_1 \frac{\rho}{\mu} v,$$

где c_1 — коэффициент пропорциональности.

Подставив это выражение в предыдущую формулу, получим

$$p = 2c_1 \frac{\rho}{\mu} m_m v^2.$$

Но, как мы знаем,

$$\frac{m_m v^2}{2} = cT,$$

следовательно,

$$p = 4cc_1 \frac{\rho T}{\mu}.$$

Как показывают расчеты, произведение первых трех постоянных коэффициентов для всех газов равно $8300 \text{ м}^2/\text{сек}^2 \cdot \text{град}$. Значит,

$$p = \frac{8300}{\mu} \rho T.$$

Полученное выражение называется уравнением состояния газов. Для воздуха средний молекулярный вес $\mu = 29$ и уравнение состояния имеет такой вид:

$$p = 286 \rho T, \quad (1.01)$$

где p — давление, $\text{кг}/\text{м}^2$;

ρ — массовая плотность воздуха, $\text{кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$.

Из уравнения состояния вытекают как частные случаи известные законы Бойля-Мариотта и Гей-Люссака, открытые в свое время опытным путем. Так, при неизменной температуре давление прямо пропорционально плотности, т. е. обратно пропорционально объему, занимаемому определенной массой газа (закон Бойля-Мариотта). Если нагревать газ при постоянном давлении, то произведение pT остается неизменным. Это означает, что объем газа растет пропорционально абсолютной температуре (закон Гей-Люссака).

Пользуясь уравнением состояния, можно по любым двум показателям (параметрам), характеризующим состояние газа, вычислить третий. Пусть, например, известно, что температура воздуха равна $+15^\circ \text{С}$, а давление 760 мм рт. ст. , что соответствует $10332 \text{ кг}/\text{м}^2$ (из физики известно, что $1 \text{ мм рт. ст.} \approx 13,6 \text{ кг}/\text{м}^2 = 13,6 \text{ мм вод. ст.}$), тогда плотность воздуха

$$\rho = \frac{p}{286T} = \frac{10332}{286(273 + 15)} \approx 0,125 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4.$$

Такие расчеты представляют практический интерес, так как давление и температура воздуха могут быть просто измерены приборами, чего нельзя сказать о плотности.

Итак, воздух не является сплошной, непрерывной средой; он состоит из молекул, разделенных промежутками. Правда, непрерывное столкновение молекул, их постоянное взаимодействие при огромной частоте этих столкновений и ничтожности длин свободного пробега молекул по сравнению с размерами самолета и его частей позволяют рассматривать воздух как сплошную среду и объяснять различные явления, не прибегая к молекулярной теории.

Рассматривая воздух как сплошную среду, мы будем считать, что его отдельные «частицы» плотно соприкасаются друг с другом. Но при этом под «частицей», как бы мала она ни была, мы будем понимать не молекулу, а совокупность огромного числа молекул, заключенных в объеме частицы и находящихся в непрерывном хаотическом движении независимо от того, движется сама частица или находится в покое.

Когда мы говорим, что частица движется в некотором направлении с какой-то скоростью, то подразумеваем, что средняя скорость молекул этой частицы в данном направлении наибольшая и превышает среднюю скорость в поперечных направлениях на величину скорости частицы. В покоящейся же частице средние скорости молекул во всех направлениях одинаковы.

Каждая частица воздуха обладает массой, равной сумме масс заключенных в ней молекул; хотя имеется непрерывный обмен молекулами между частицами, их массы оказываются практически неизменными во времени. Взаимодействие между частицами выражается в виде сил давления, возникающих от ударов молекул. Кроме того, при движении частиц между ними могут возникать и силы трения, происхождение которых будет объяснено ниже.

§ 2. Краткая характеристика атмосферы

Температура и давление, а следовательно, и плотность воздуха, окружающего земной шар, зависят от ряда факторов.

Чем больше высота, тем меньше вес столба вышерасположенного воздуха, а значит, меньше давление. Это обстоятельство используется при измерении в полете высоты барометрическим высотомером: приборная высота соответствует определенному давлению воздуха.

Уменьшение давления сопровождается и уменьшением плотности, как это следует из формулы (1.01), причем темпы уменьшения этих показателей по мере увеличения высоты не совпадают, потому что одновременно изменяется и температура воздуха. Температура и давление воздуха на данной высоте зависят от географических координат, времени года и суток, от погоды. Многочисленными наблюдениями и исследованиями установлены некоторые средние закономерности изменения с высотой температуры и дав-

ления воздуха, а следовательно, и его плотности, которые приняты в качестве стандартных. Соответствующие данные в виде таблицы стандартной атмосферы (приложение 1) широко используются при аэродинамических расчетах, градуировке авиационных приборов и т. д.

Как видно из таблицы, на уровне моря (или «у земли») стандартными атмосферными условиями являются: температура $t = +15^{\circ}\text{C}$ ($T = 288^{\circ}\text{ абс.}$), барометрическое давление $p = 10\,332\text{ кг/м}^2$ и плотность воздуха $\rho \approx 0,125\text{ кг}\cdot\text{сек}^2/\text{м}^4$; последняя рассчитана по формуле (1.01).

В нижнем слое земной атмосферы, тропосфере, которая для стандартных условий простирается до высоты $H = 11\text{ км}$, температура по мере подъема уменьшается на $6,5^{\circ}$ на каждый километр высоты. Выше начинается стратосфера. Здесь температура до высоты 25—30 км считается постоянной и равной $t = -56,5^{\circ}\text{C}$. Для больших высот стандартные характеристики атмосферы еще не узаконены, но имеются уже достаточно надежные данные, основанные на исследованиях атмосферы аэростатами, ракетами, а также косвенными методами. Согласно этим данным с высоты 25—30 км температура начинает возрастать, достигая на высотах около 50 км величины, близкой к 0°C . Далее начинается новое понижение температуры, и на высотах 70—90 км она равна приблизительно -75°C . Выше 90 км температура опять начинает расти, становясь на высоте 200 км более $+500^{\circ}\text{C}$.

Падение плотности воздуха с высотой означает увеличение средней длины свободного пробега молекул. У земли эта длина составляет около 0,1 микрона, а на высоте 200 км выражается сотнями метров. Если до высот, исчисляемых немногими десятками километров, длины свободного пробега молекул настолько малы, что можно рассматривать воздух как сплошную среду, то на высотах более 100 км эти длины становятся соизмеримыми с длиной летательного аппарата или даже могут быть значительно больше ее. В таких условиях воздушная среда практически состоит из свободных молекул, т. е. молекул, воздействие которых на летательный аппарат почти не связано со взаимодействием (соударениями) самих молекул. Как показали теоретические исследования, некоторые особенности аэродинамики, связанные с увеличением длины свободного пробега молекул, могут ожидать уже при полетах на высотах более 40 км.

§ 3. Проявление инертности воздуха в воздушном потоке. Закон Бернулли

Из определения термина «инертность» вытекает, что инертность воздуха, рассматриваемого как сплошная среда, может проявиться лишь в том случае, когда его частицы испытывают изменение величины или направления скорости. При этом инертность проявляется в виде понижения или повышения давления.

Пусть, например, в сечении 1—1 (рис. 1.02) скорость частиц потока воздуха или жидкости равна V_1 , а переместившись в сечение 2—2, частицы движутся с большей скоростью, равной V_2 .

Но частицы обладают инертностью (имеют массу) и в соответствии со вторым законом Ньютона могут получать ускорение только под действием силы, направленной в сторону движения.

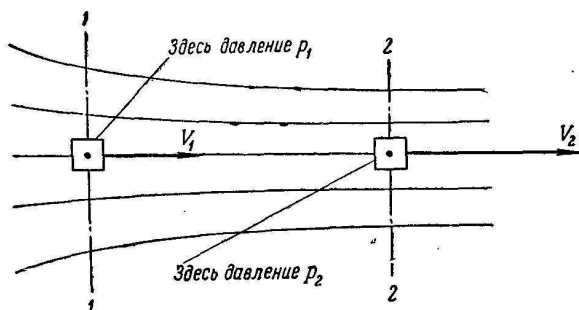


Рис. 1.02. Струя переменного сечения

Значит, на рассматриваемом участке струи позади частиц давление должно быть больше, чем впереди частиц, т. е. в сечении 1—1 оно выше, чем в сечении 2—2.

Итак, наименьшее давление получается там, где скорость наибольшая, и наоборот. В этом состоит сущность закона Бернулли.

Нетрудно найти количественную связь между приростом скорости и изменением давления. Рассмотрим на рис. 1.03 участок горизонтальной струи, имеющий очень малую длину Δx , среднее поперечное сечение f , плотность ρ , среднюю скорость V . Прирост скорости (он будет очень малым) на этом участке обозначим ΔV , а прирост давления Δp . Приросты могут быть и положительными и отрицательными.

По второму закону Ньютона ускорение j равно отношению силы к массе; в потоке, текущем горизонтально без трения, сила создается разностью давлений p и $p + \Delta p$, которая равна $-\Delta p$; поэтому можно написать, что

$$j = \frac{-f \cdot \Delta p}{\rho f \cdot \Delta x} = -\frac{\Delta p}{\rho \cdot \Delta x}.$$

Знак «минус» показывает, что если прирост давления положительный, т. е. давление растет

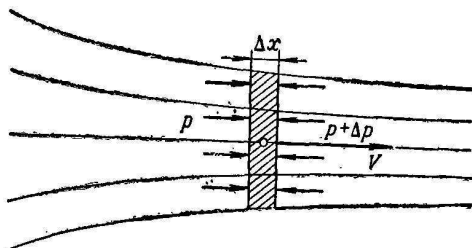


Рис. 1.03. К выводу уравнения Бернулли

по течению, то поток будет тормозиться, ускорение получится отрицательным. И наоборот, при отрицательном приращении давления, т. е. при понижении давления, ускорение становится положительным.

Как и ускорение, разные знаки может иметь и прирост скорости ΔV , равный произведению ускорения на время движения. Так как участок Δx частицы проходят за время $\frac{\Delta x}{V}$, то

$$\Delta V = j \frac{\Delta x}{V} = - \frac{\Delta p}{\rho \cdot \Delta x} \cdot \frac{\Delta x}{V},$$

откуда

$$\Delta p = - \rho V \cdot \Delta V. \quad (1.02)$$

Нетрудно видеть, что при возрастании скорости, т. е. при положительном ΔV , давление падает, $-\Delta p$ получается отрицательным, и что для одного и того же ΔV прирост давления тем больше, чем больше плотность ρ и скорость V . Уравнение (1.02) является наиболее простым математическим выражением закона Бернулли.

Для примера рассчитаем изменение давления для участка воздушного потока, на котором скорость возросла со 195 до 205 м/сек при средней плотности воздуха $\rho = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$. Как видим, на участке средняя скорость $V = 200 \text{ м/сек}$, $\Delta V = 205 - 195 = 10 \text{ м/сек}$, поэтому

$$\Delta p = - 0,1 \cdot 200 \cdot 10 = - 200 \text{ кг/м}^2.$$

Следовательно, давление уменьшилось на 200 кг/м^2 .

Уравнение (1.02) является формой уравнения Бернулли, справедливой как для несжимаемых жидкостей, так и для сжимаемых газов. В этом его достоинство.

Недостатком этой формы является то, что она пригодна для расчета изменения давления и скорости только лишь на очень коротких участках потока. Конечно, длинный участок всегда можно разделить на короткие, но это усложняет расчеты. Существуют формы уравнения Бернулли, удобные для расчетов изменения давления и скорости на больших участках потока. Для несжимаемых и сжимаемых сред эти формы разные. Для потока несжимаемой жидкости, текущего горизонтально без трения, уравнение Бернулли имеет следующий вид:

$$\frac{\rho V_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho V_2^2}{2} + p_2. \quad (1.03)$$

Здесь обозначения величин те же, что и на рис. 1.02.

Величина $\frac{\rho V^2}{2}$ называется скоростным напором. Уравнение (1.03) говорит о том, что сумма скоростного напора и статического давления одинакова во всех сечениях потока. Если в уравнении (1.02) под V по-

нимать среднее арифметическое между V_1 и V_2 , то по обоим уравнениям результаты расчетов получаются одинаковыми.

Для потока сжимаемого газа математическая связь между V_1 , V_2 , p_1 и p_2 будет более сложной, чем в уравнении (1.02). Приведем без вывода уравнение Бернулли для воздушного потока с учетом сжимаемости воздуха:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(1 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2000T_1} \right)^{3,5}.$$

Это уравнение справедливо в том случае, когда на пути между сечениями 1—1 и 2—2 поток не испытывает трения и ударов. Под T_1 понимается абсолютная температура воздуха в сечении 1—1.

§ 4. Сжимаемость воздуха

Говоря о сжимаемости воздуха, мы рассматриваем его как сплошную среду и имеем в виду, что частицы воздуха уменьшают свой объем при повышении давления и увеличивают при понижении, что означает соответственно повышение или понижение плотности воздуха.

Количественно оценивать сжимаемость можно либо абсолютным Δp , либо относительным $\frac{\Delta p}{p}$ приростом плотности, приходящимся на единицу прироста давления Δp , вызвавшего этот прирост плотности. Воспользуемся первым способом. Тогда мерой сжимаемости будет отношение $\frac{\Delta \rho}{\Delta p}$.

Рассчитать эту величину очень просто в том случае, если при сжатии или расширении воздуха его температура остается неизменной (такой процесс называется изотермическим). Действительно, по уравнению состояния (1.01) до сжатия

$$p = 286T\rho,$$

а после сжатия при сохранении прежней температуры

$$p + \Delta p = 286T(\rho + \Delta \rho).$$

Вычитая из последнего равенства предыдущее, получим

$$\Delta p = 286T \cdot \Delta \rho,$$

откуда

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta p} = \frac{1}{286T}.$$

Остается ли в действительности температура неизменной?

Обратимся к молекулярной теории. Пусть стенка, показанная на рис. 1.01, движется, сжимая воздух (рис. 1.04, а). Тогда за счет этого движения скорость молекул после отскока от стенки будет больше, чем до удара. Но увеличение скорости молекул означает возрастание температуры. Таким образом, при сжатии темпера-

тура воздуха стремится повыситься и для получения изотермического сжатия придется осуществить отвод тепла от сжимаемой массы воздуха. Если теплоотвода нет или он недостаточен, то температура при сжатии воздуха повышается. При движении стенки в противоположную сторону (рис. 1.04, б), наоборот, воздух будет расширяться, и если не обеспечить достаточно-го подвода тепла извне, его температура будет понижаться.

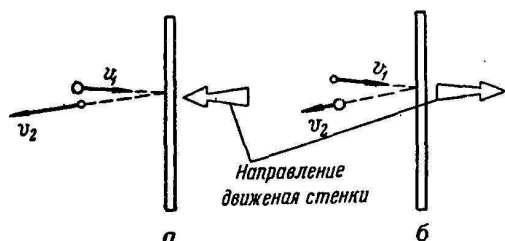


Рис. 1.04. К влиянию сжатия и расширения воздуха на его температуру:

v_1 — скорость молекулы до удара о стенку; v_2 — скорость молекулы после отскока

существовать. Такой процесс, называемый адиабатическим, характеризуется обязательным повышением температуры при сжатии и понижением при расширении. Эти отклонения температуры в известной мере препятствуют изменениям плотности под влиянием изменений давления.

Для воздуха сжимаемость при адиабатическом процессе оказывается хуже, чем при изотермическом, в 1,4 раза, т. е.

$$\frac{\Delta p}{\Delta p} = \frac{1}{1,4 \cdot 286T}$$

или

$$\frac{\Delta p}{\Delta p} = \frac{1}{400T}. \quad (1.04)$$

Из формулы (1.04) видно, что сжимаемость воздуха зависит только от его температуры: она тем больше, чем температура ниже.

Пример. Определить сжимаемость воздуха для адиабатического процесса при стандартных условиях у земли и в стратосфере.

У земли, где $T = 288^\circ$ абс.,

$$\frac{\Delta p}{\Delta p} = \frac{1}{400 \cdot 288} = 8,65 \cdot 10^{-6} \text{ сек}^2/\text{м}^2,$$

т. е. прирост плотности при адиабатическом сжатии составляет $8,65 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$ на $1 \text{ кг}/\text{м}^2$ повышения давления.

В стратосфере, где $T = 216,5^\circ$ абс.,

$$\frac{\Delta p}{\Delta p} = \frac{1}{400 \cdot 216,5} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}^2/\text{м}^2,$$

т. е. больше, чем у земли, на 33%.