

**Л.Ф. Николаев**

**Аэродинамика и динамика полёта  
транспортных самолётов**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 030  
ББК 92  
Л11

Л11 **Л.Ф. Николаев**  
Аэродинамика и динамика полёта транспортных самолётов / Л.Ф. Николаев – М.: Книга по Требованию, 2024. – 392 с.

**ISBN 978-5-458-32391-8**

Для курсантов высших летных училищ гражданской авиации.

**ISBN 978-5-458-32391-8**

© Издание на русском языке, оформление  
«УОУO 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 первоизданном 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.



## ВВЕДЕНИЕ

Аэродинамика и динамика полета являются разделами механики — науки, изучающей общие закономерности, связывающие движение и взаимодействие тел, находящихся в различных состояниях — твердом, жидком и газообразном.

*Аэродинамика* — раздел механики сплошных сред, в котором изучаются закономерности движения газа, преимущественно воздуха, а также механическое и тепловое взаимодействие между газом и движущимися в нем телами.

Аэродинамика является областью аэрогидромеханики (механики жидкостей и газа) науки, изучающей закономерности движения и равновесия жидкостей и газов и их силового взаимодействия с обтекаемыми телами или граничными поверхностями (внутренними и внешними поверхностями тел, обтекаемым потоком). Механика жидкого тела называется гидромеханикой, механика газообразного тела — аэромеханикой. Аэромеханика изучает равновесие и движение газообразных сред, преимущественно воздуха, механического воздействия сред на находящиеся в них тела. Она подразделяется на аэростатику и аэродинамику. Аэростатика изучает условия равновесия неподвижных газов и погруженное в них твердое тело. Законы аэростатики применяются к летательным аппаратам легче воздуха.

Аэродинамика сформировалась в самостоятельную науку в XX в. в связи с развитием авиации, турбостроения и метеорологии в качестве их теоретической основы. Основная задача аэродинамики состоит в определении сил, действующих на движущееся в газе тело, исследовании распределения давления на его поверхности, изучении направления струй воздуха вокруг него. Ее принято делить на теоретическую и экспериментальную. Это деление было всегда условным, так как познание является комплексным процессом и предполагает получение данных, необходимых в практике.

Наука о механике жидкостей, основоположниками которой являются члены Российской Академии наук Л. Эйлер и Д. Бернулли, заложила фундамент для развития аэродинамики.

Основы современной аэродинамики созданы трудами Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина, Л. Прандтля, Т. Кармана и др.

Накопление фундаментальных теоретических и экспериментальных результатов, а также знания, полученные из практики проектирования испытаний и эксплуатации летательных аппаратов, раздвинули рамки аэродинамики и привели к формированию направления, кото-

рое принято называть аэродинамикой летательных аппаратов и, в частности, аэродинамикой самолета.

Большой вклад в развитие аэродинамики внесли советские ученые: В. С. Аадуевский, О. М. Белоцерковский, Г. С. Бюшгенс, В. В. Голубев, А. А. Дородницын, М. В. Келдыш, Н. Е. Кочин, М. А. Лаврентьев, А. И. Некрасов, Н. Н. Павловский, Г. И. Петров, Г. П. Свищев, Л. И. Седов, В. В. Струминский, А. А. Фридман, С. А. Христианович, Г. Г. Черный и др.

*Динамика летательных аппаратов в атмосфере* — раздел механики, в котором изучается движение летательных аппаратов в атмосфере.

*Динамика полета самолета* рассматривает вопросы, связанные с исследованием траекторий движения самолета, его устойчивости и управляемости. В своих методах исследования она опирается на основные положения теоретической механики, аэродинамики, теории двигателей, теории автоматического управления и других дисциплин. В свою очередь, динамика полета самолета используется при изучении таких дисциплин, как конструирование и проектирование самолетов, конструирование систем управления полетом самолета, прочность самолета, техническая эксплуатация самолета, летная эксплуатация, безопасность полетов и др.

Огромный вклад в развитие динамики полета внесли Н. Е. Жуковский, С. А. Чаплыгин и их ученики и последователи: В. С. Ведров, В. П. Ветчинкин, Г. С. Калачев, И. В. Остославский, В. С. Пышнов.

Динамика полета современных самолетов — это стройная, постоянно совершенствующаяся научная дисциплина, позволяющая решать задачи анализа и исследования характеристик движения самолета на всех этапах их создания, испытаний и летной эксплуатации.

Новым вкладом в исследование динамики самолета стали работы Л. М. Шкадова, Г. С. Бюшгенса, Р. В. Студнева, Н. М. Лысенко, И. М. Машковского и других ученых.

Полет самолета с точки зрения механики является управляемым движением. В зависимости от управляющих воздействий пилота и работы бортовых автоматических средств управления может быть реализовано бесконечное множество траекторий. Управляющие воздействия формируются в полете из условия получения требуемых параметров движения: скорости, высоты полета (эшелоны), направления (курса). Пилот контролирует значения этих параметров по приборам и парирует отклонения от заданных значений соответствующим отклонением органов управления, перемещая рычаги управления. Бортовые автоматические устройства в соответствии с заданной программой вместе с пилотом воздействуют на органы управления.

Значительное влияние на параметры полета оказывает состояние атмосферы. До полета оно известно лишь приближенно. При эксплуатации самолета в различных климатических зонах изменяются условия полета (температура, высота, плотность, число  $M$  и др.). В ходе полета самолет испытывает внешние возмущения вследствие атмосферной турбулентности, колебаний температуры воздуха и т. п.

Реальное движение самолета условно разделяют на две составляющие: *опорное* — движение по желаемой траектории в отсутствие возмущений и *возмущенное* движение при воздействии возмущений. В условиях возмущенного движения приближение к желаемой траектории достигается за счет естественной способности самолета сохранять устойчивость движения и парированием отклонений пилотом и автоматическими устройствами.

В общем случае движение самолета имеет пространственный характер. Оно может быть прямолинейным и криволинейным, с постоянной или изменяющейся скоростью, на постоянной или изменяющейся высоте, с креном, скольжением или без них.

Из всего многообразия возможных *траекторий полета* транспортного самолета можно выделить основные *этапы*, являющиеся частями траекторий полета: взлет, набор высоты, горизонтальный полет, криволинейные в горизонтальной и вертикальной плоскости участки траектории, снижение и посадка. Каждый этап полета выполняется в заданном режиме, характеризуемом программой изменения высоты, скорости, угла наклона траектории, крена и т. д.

*Режимы полета*, в которых основные параметры движения и прежде всего скорость постоянны или изменяются достаточно медленно, называются *установившимися*. В установившемся полете углы отклонения органов управления, углы атаки, крена, скольжения, перегрузка, режим работы двигателей считаются неизменными. На установившихся режимах (практически близких к установившимся) выполняются многие этапы полета. Для них рассчитывают большинство характеристик полета.

Сравнительно короткий этап полета, цель которого — изменение параметров движения самолета (высоты, скорости, курса, наклона траектории), называется *маневром*. При выполнении маневров движение, как правило, неустойчивое.

Совершенство самолета определяется его *летно-техническими характеристиками* (ЛТХ), к которым относят:

скорость и высоту полета, скороподъемность и их зависимость от условий эксплуатации;

дальность, продолжительность полета, коммерческую нагрузку и расход топлива;

взлетно-посадочные характеристики (длина разбега, скорость отрыва, посадочная скорость, длина пробега и др.);

маневренные характеристики самолета, определяющие способность самолета изменять скорость и направление полета и др.

При расчете ЛТХ и траекторий рассматривается *опорное движение* самолета, так как влияние возмущений на движение центра масс самолета обычно невелико. В опорном движении исследуются балансирующие и статические характеристики самолета. Такой подход позволяет наиболее просто учесть влияние условий эксплуатации на летно-технические балансирующие и статические характеристики само-

лета. Возмущенное движение самолета изучается при оценке характеристик устойчивости и управляемости самолета.

Условия эксплуатации характеризуются параметрами состояния воздушной среды (температура, давление, плотность), наличием возмущающих факторов (порывы ветра, осадки, изменение направления и скорости ветра), условиями загрузки самолета (значения полетной массы, центровки), состоянием ВПП, параметрами, определяющими режим полета (высота, горизонтальные и вертикальные скорости полета, числа  $M$  полета, углы атаки, крена, скольжения и т.д.), режимом работы двигателей, конфигурацией самолета и др.

Спроектированный с учетом требований безопасности транспортный самолет проходит цикл летных испытаний, в процессе которых осуществляется доводка его характеристик в соответствии с техническими требованиями и нормами, уточняются допустимые при эксплуатации режимы и условия полета.

На основе расчетов и испытаний конкретного типа самолета составляется Руководство по летной эксплуатации (РЛЭ), регламентирующее способы и условия его эксплуатации.

Явления и процессы, протекающие на всех этапах полета, а также особенности движения конкретного типа самолета рассматриваются в практической аэродинамике самолета (точнее аэродинамике и динамике полета конкретного типа самолета).

Глубокие знания аэродинамики и динамики полета, особенностей поведения самолета позволяют пилоту:

- правильно проводить подготовку к полету;

- грамотно выбирать режим полета, анализировать поведение самолета, принимать и реализовывать решение, обеспечивая безопасность и экономичность полета;

- анализировать авиационные происшествия и предпосылки к ним, вырабатывать и реализовать рекомендации по их предотвращению

- самостоятельно изучать новые типы самолетов, анализировать их характеристики;

- участвовать в совершенствовании летной эксплуатации самолетов.

Обобщая высказывания пилотов о значении глубоких знаний аэродинамики и динамики полета для летного состава, можно сказать, что аэродинамика и динамика полета как никакая другая дисциплина формирует профессиональную культуру пилота.

## РАЗДЕЛ I

# АЭРОДИНАМИКА

## Глава I

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ АЭРОДИНАМИКИ

#### 1.1. Физико-механические характеристики воздуха

**Физическая структура жидкости и газа.** Жидкость представляет собой совокупность хаотически движущихся молекул, расстояние между которыми значительно превышает их линейные размеры. Этому определению во многих случаях соответствуют и газы, что привело к объединению их общим термином «жидкости».

В аэрогидромеханике жидкость рассматривается как сплошная среда, в которой не учитывается ее молекулярная структура. Согласно гипотезе сплошности среды, считается, что даже в объемах, малых по сравнению с обтекаемым телом, находится достаточно большое количество молекул, размеры и длина свободного пробега которых малы по сравнению с размерами тела. Гипотеза непрерывности среды позволяет рассматривать кинематические и динамические характеристики движущейся жидкости (скорость, давление и др.) как непрерывные функции координат и времени, поэтому можно применить аппарат математического анализа, разработанный для непрерывных функций. Гипотеза сплошности не применима для сильно разреженных газов.

Основными общими свойствами жидкостей и газов являются легкая подвижность, вязкость и сжимаемость, хотя степень выраженности этих свойств различна. Поскольку предметом изучения является движение самолета, будем пользоваться термином «газ», «воздух», подразумевая, что они являются сплошными средами, обладающими или не обладающими сжимаемостью и вязкостью в зависимости от решаемой задачи.

Воздух представляет собою смесь газов, из которых состоит атмосфера Земли (азот, кислород, инертные газы, углекислый газ и др.), водяного пара, взвешенных частиц различных веществ и т. п. К воздуху применимы гипотезы сплошности и непрерывности среды. На очень больших высотах (более 100 км) гипотеза сплошности среды не

применима. Здесь необходимо учитывать молекулярное строение атмосферы.

**Основные физико-механические характеристики воздуха.** Физико-механическое состояние воздуха характеризуется температурой, давлением, массовой плотностью, относительной плотностью, сжимаемостью, вязкостью.

*Температура атмосферного воздуха  $T$*  определяет его термодинамическое состояние равновесия. Она пропорциональна средней скорости движения молекул, т. е. является характеристикой интенсивности молекулярного движения. Если температура различных объемов воздуха не одинакова, то происходит теплообмен. Температура может быть выражена в кельвинах (К). Значения температуры по шкале Цельсия связаны с абсолютной температурой соотношением  $t = T - 273 \text{ К}$ .

*Давление* — физическая величина, характеризующая интенсивность нормальных (перпендикулярных к поверхности) сил  $F$ , с которыми одно тело действует на поверхность  $S$  другого. Если силы распределены вдоль поверхности равномерно, то давление

$$p = F/S. \quad (1.1)$$

*Массовая плотность* — величина, определяемая отношением массы воздуха, заключенного в единице объема,

$$\rho = m/V. \quad (1.2)$$

*Относительная плотность воздуха  $\Delta$*  — отношение плотности воздуха  $\rho$  на некоторой высоте  $H$  к плотности воздуха  $\rho_0$  на высоте  $H = 0$

$$\Delta = \rho/\rho_0. \quad (1.3)$$

*Вязкость (внутреннее трение)* — свойство газов и жидкостей, характеризующее сопротивление действию внешних сил, вызывающих их течение. Вязкость воздуха определяется межмолекулярным взаимодействием, обусловленным взаимным притяжением и отталкиванием электрически нейтральных молекул, хаотичным движением молекул, обусловливающим перенос энергии из одного слоя в другой и перемешивание в движущемся потоке. Поэтому с увеличением температуры вязкость воздуха повышается за счет скорости движения молекул. Вязкость воздуха характеризуется динамической вязкостью  $\mu$  и кинематической вязкостью  $\nu$

*Динамическая вязкость* характеризует молекулярный перенос импульса в потоке газа, приводящий при наличии градиента скорости к появлению касательных напряжений. Динамическая вязкость при различных температурах

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0.76} \quad (1.4)$$

*Кинематическая вязкость воздуха* — отношение динамической вязкости к плотности:

$$\nu = \mu/\rho. \quad (1.5)$$

Для воздуха при  $T = 288 \text{ К}$   $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$  и  $\nu = 1,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

*Сжимаемость* — способность воздуха изменять свой объем, а следовательно, и плотность при изменении давления и температуры. Сжимаемость характеризуется коэффициентом объемного сжатия  $\beta$ , который при изотермическом процессе ( $T = \text{const}$ ) обратно пропорционален давлению,

$$\beta = 1/p \quad (1.6)$$

Сжимаемость воздуха тесно связана со скоростью распространения звука. Изменения местных давлений в воздушной среде называются возмущениями давления. Они распространяются в виде упругих волн, одной из разновидностей которых

является звуковая волна. Если источник возмущений неподвижен относительно воздушной среды, то возмущение (звуковая волна) распространяется равномерно во все стороны с постоянной скоростью (скорость звука) в виде сферических звуковых колебаний (рис. 1.1). При этом переноса массы воздуха не происходит, так как частицы воздуха колеблются по замкнутым траекториям, но осуществляется перенос энергии волной. В момент времени  $t_1 = 1$  с радиус сферы с повышенным давлением (волны)  $r_1 = a$ . Через 2 с радиус сферы  $r = 2a$ , через  $n$  секунд  $r_n = na$ . Таким образом, границей возмущенной зоны является расширяющаяся сферическая поверхность с центром в источнике возмущений. Производная  $dp/d\rho$  характеризует способность воздуха сопротивляться изменению плотности и определяет его упругие свойства. Эта производная равна квадрату скорости звука

$$a^2 = dp/d\rho. \quad (1.7)$$

Если считать, что процесс распространения звуковых волн является адиабатическим (происходящим без отдачи и притока тепла извне), то скорость звука

$$a = \sqrt{dp/d\rho} = \sqrt{k(p/\rho)}, \quad (1.8)$$

где  $k$  — показатель адиабаты. Для воздуха  $k = 1,4$ .

На основании известного из физики уравнения состояния идеального газа

$$p = \rho RT \quad (1.9)$$

формулу (1.8) можно привести к виду

$$a = \sqrt{kRT}, \quad (1.10)$$

где  $R$  — газовая постоянная. Для сухого воздуха при  $T = 288$  К и  $p = 1,013 \cdot 10^5$  Па  $R = 287,14$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> · К).

Подставляя в (1.10) вместо  $k$  и  $R$  их значения, получим формулу для расчета скорости звука (м/с) в воздухе:

$$a = 20,1 \sqrt{\tilde{T}}. \quad (1.11)$$

Таким образом, характеристикой сжимаемости воздушной среды является скорость звука. Из формулы (1.7) следует, что чем большей сжимаемостью обладает воздушная среда, тем она менее упруга, тем меньше скорость распространения звука в ней. Чем меньше сжимаемость воздушной среды, тем больше скорость распространения звука в ней. Для несжимаемой среды скорость распространения звука стремится к бесконечности.

С увеличением высоты полета температура воздуха уменьшается, следовательно, уменьшается и скорость звука:

$$a = a_{H_0} \sqrt{T/T_{H_0}}, \quad (1.12)$$

где  $H$  — высота полета, м.

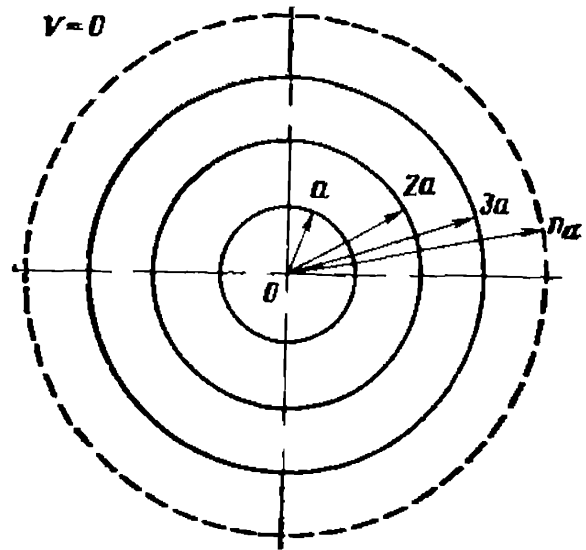


Рис. 1.1. Распространение малых возмущений от точечного источника, неподвижного относительно воздушной среды

Одним из практически важных параметров, характеризующих сжимаемость движущегося газа (сжимаемость воздушного потока), является число Маха  $M$  — безразмерная величина, равная отношению скорости течения газа  $V$  к местной скорости звука  $a$ :

$$M = V/a. \quad (1.13)$$

При числах  $M < 0,4$  влияние сжимаемости на характеристики течения воздуха не сказывается, но по мере увеличения числа  $M$  влияние сжимаемости возрастает.

## 1.2. Строение атмосферы Земли

*Атмосфера Земли* — это воздушная оболочка, окружающая Землю. Нижней границей атмосферы является поверхность Земли. Высота верхней границы атмосферы условно принята равной 2—3 тыс. км. До высоты 100 км состав атмосферы не изменяется, так как тепловое движение частиц приводит к непрерывному их перемешиванию. Поскольку высота полета современных транспортных самолетов не превосходит 20 км, то целесообразно рассмотреть строение атмосферы в пределах этой высоты.

Слой атмосферы, непосредственно прилегающий к поверхности Земли, называется тропосферой. Высота тропосферы различна в средних широтах она равна примерно 11 км, над экватором — 16—18 км и над полюсами 7—8 км. В тропосфере сосредоточено 79 % массы атмосферы Земли. Для солнечной радиации тропосфера прозрачна, поэтому прогревание воздушных масс тропосферы происходит от поверхности Земли, поглощающей тепловую энергию Солнца. По мере увеличения высоты температура воздуха понижается примерно на  $6,5^\circ\text{C}$  на каждый километр (до  $H = 11$  км), а скорость звука уменьшается на 1 м/с через каждые 250 м. В тропосфере образуется основная часть облаков.

Выше тропосферы расположен слой воздуха, называемый тропопаузой, который является как бы переходным между тропосферой и стратосферой. Толщина тропопаузы примерно 1—2 км. Стратосфера расположена выше тропопаузы и распространяется до высоты 50—55 км. Температура воздуха в стратосфере сохраняется практически постоянной до высоты 25—30 км и равна  $-56,5^\circ\text{C}$ , затем начинает повышаться. В верхней части тропосферы, в тропопаузе и в стратосфере происходит интенсивное движение воздушных масс с резкими перепадами температур и скоростей течения. Скорость струйных течений достигает значений 150—500 км/ч, ширина течений — сотни километров. Состояние атмосферы меняется в зависимости от времени года, суток, координат местности. Например, температура воздуха в средних широтах нашей страны колеблется в течение года в пределах  $70^\circ$ , а в Сибири — в пределах  $90^\circ$ . В пределах 10 % изменяется плотность воздуха, в пределах 8 % — атмосферное давление у поверхности Земли.

Таблица 1

Характеристики стандартной атмосферы (значения параметров округлены)

Высота $H$ , м	Температура $T$ , К	Давление $p$ , Па	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Относительная плотность $\Delta = \rho/\rho_0$	Скорость звука $a$ м/с
0	288,2	101 330	1,23	1,000	340,4
1 000	281,7	89 880	1,11	0,903	336,6
2 000	275,1	79 490	1,01	0,821	332,7
3 000	268,6	70 130	$9,09 \cdot 10^{-1}$	0,739	328,7
4 000	262,1	61 660	$8,19 \cdot 10^{-1}$	0,666	324,7
5 000	255,6	54 050	$7,37 \cdot 10^{-1}$	0,599	320,7
6 000	249,1	47 210	$6,60 \cdot 10^{-1}$	0,537	316,6
7 000	242,6	41 090	$5,90 \cdot 10^{-1}$	0,480	312,4
8 000	236,1	35 650	$5,26 \cdot 10^{-1}$	0,428	308,2
9 000	229,6	30 790	$4,67 \cdot 10^{-1}$	0,380	303,9
10 000	223,2	26 290	$4,14 \cdot 10^{-1}$	0,337	299,6
11 000	216,7	22 690	$3,65 \cdot 10^{-1}$	0,297	295,2
12 000	216,7	19 390	$3,12 \cdot 10^{-1}$	0,254	295,2
13 000	216,7	16 570	$2,67 \cdot 10^{-1}$	0,217	295,2
14 000	216,7	14 160	$2,28 \cdot 10^{-1}$	0,185	295,2
15 000	216,7	12 110	$1,95 \cdot 10^{-1}$	0,159	295,2

Летные характеристики самолета в значительной мере зависят от температуры и плотности воздуха, атмосферного давления, наличия ветра, осадков. Они определяются состоянием атмосферы и высотой полета. Для проведения аэродинамических расчетов, расчетов характеристик движения самолетов, сравнения характеристик различных самолетов, расчета поправок на влияние внешних условий принята стандартная атмосфера (табл. 1).

*Стандартная атмосфера (СА)* — условная атмосфера, в которой распределение давления рассчитывается при определенных предположениях о распределении температуры по вертикали. Она является единым условным законом изменения давления, температуры и плотности воздуха по высоте, отсчитываемой от среднего уровня моря ( $H = 0$ ). При расчете стандартной атмосферы принимается условие статического равновесия воздуха, которое описывается уравнением статики атмосферы, связывающим давление воздуха  $p$ , плотность  $\rho$ , ускорение свободного падения  $g$  и геометрическую высоту над уровнем моря  $H$ :

$$-dp = \rho g dH. \quad (1.14)$$

Связь давления воздуха с температурой и плотностью устанавливается уравнением состояния идеального газа (1.9).

Для приближенных расчетов может быть использована формула

$$p = 0,463p/T. \quad (1.15)$$

где  $p$  — атмосферное давление, мм рт. ст.,  $T$  — температура, К.

Высота полета, соответствующая плотности воздуха, определенной по СА, называется *приведенной высотой*, которая может быть больше, меньше или равна фактической.

Любое тело, находящееся в атмосфере, испытывает статическое давление (1.15). При этом на каждый элемент поверхности тела действует сила, направленная по нормали к элементу поверхности. Чем на большей высоте над уровнем моря находится тело, тем меньший «столб» воздуха находится над ним, тем меньше атмосферное давление оно испытывает. Современный самолет имеет значительные размеры. Поэтому атмосферное давление в точках на нижней поверхности фюзеляжа, расположенной на меньшей высоте относительно земной поверхности будет больше, чем в точках на верхней поверхности кнля, расположенного на большой высоте. Этой разницей давлений из-за малой массовой плотности воздуха пренебрегают (так как высота самолета не превышает 30 м), а атмосферное давление изменяется на 1 % при изменении высоты в пределах 64—85 м.

### 1.3. Основные сведения о воздушном потоке

**Кинематические характеристики.** *Воздушный поток* - масса воздуха, движущегося относительно рассматриваемого тела. Такое определение воздушного потока предполагает, что относительное движение воздуха и тела рассматривается независимо от того, движется ли поток относительно неподвижного тела или тело движется относительно подвижного воздуха. Летящий с некоторой скоростью самолет испытывает со стороны воздуха силовое воздействие. Если бы самолет остановить и заставить воздушный поток двигаться относительно него с той же скоростью, то картина обтекания воздушным потоком и силовое взаимодействие воздуха с самолетом остались бы практически неизменными. Это следует из общего принципа относительности механики и в аэродинамике называется принципом обратимости.

В аэродинамике для экспериментального изучения силового взаимодействия между воздухом и телом (модели крыла, фюзеляжа, самолета) применяются два способа: телу сообщается скорость относительно неподвижного воздуха или неподвижное тело обдувается потоком. Первый способ лежит в основе летных экспериментов летательных аппаратов, является дорогостоящим и имеет ограниченное применение (в основном на завершающих этапах создания летательных аппаратов). Второй способ реализуется в аэродинамических трубах и получил широкое применение в аэродинамических исследованиях.

Пусть поток воздуха обтекает твердое тело (рис. 1.2, а). Если в точке 1 потока все проходящие через эту точку частицы будут иметь неизменную скорость  $\vec{V}_1$ , то течение воздуха будет установившимся (или стационарным). Возьмем точку 2, бесконечно близкую к точке 1 и находящуюся на векторе  $\vec{V}_1$ . В этот же момент времени  $t$  в точке 2 вектор