

Инженер **ХАЛЕПСКИЙ В. И.**
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

МЕХАНИКА
ПРИВЯЗНОГО
ВОЗДУХОПЛАВАНИЯ

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ОБОРОНЫ
МОСКВА — 194

В книге сжато изложены **основные положения** и законы **аэростатики** и аэродинамики применительно к вопросам теории **привязного** воздухоплавания, **возникающим** в практической работе. Впервые достаточно широко разбираются вопросы динамики привязного аэростата.

Книга одобрена Управлением боевой подготовки войск противовоздушной обороны Красной Армии как учебное пособие для подготовки офицерского **состава** частей аэростатов заграждения Красной Армии. Изложение материала рассчитано на среднеподготовленного **офицера-аэростатчика**.

ВВЕДЕНИЕ

Подъем в воздух, полет и плавание в нем возможны благодаря статическим и динамическим силам. **Птицы**, насекомые, самолеты, планеры, поднимающиеся и летающие при помощи крыльев, винтов или иных приспособлений, поддерживаются в воздухе динамическими силами, которые возникают в результате движения.

Облака, плавающие высоко над землей, поддерживаются в воздухе статическими силами. Будучи легче воздуха, облака плавают в нем подобно пробке в воде.

Воздухоплавание основано на статическом принципе; воздухоплавательные аппараты поднимаются и летают потому, что они легче окружающего их воздуха. Малый вес воздухоплавательных аппаратов достигается наполнением их оболочек газами, значительно более легкими, чем воздух. Чем легче газ по сравнению с воздухом, тем сильнее будет стремиться аппарат вверх.

Воздухоплавательные аппараты называют аэростатами. Неуправляемые воздухоплавательные аппараты, **связанные** с землей привязным тросом, называют привязными аэростатами.

Основные законы воздухоплавания определяются физическим состоянием воздуха в атмосфере и газа в аэростате. Изучение связи этих состояний относится к области **аэростатики**, основные вопросы которой применительно к теории привязного воздухоплавания излагаются в главе I настоящего пособия.

Аэростат и привязной трос в редких случаях неподвижны относительно окружающего их воздуха. Они могут перемещаться в вертикальном или горизонтальном направлении, или же перемещаться может воздух, обтекая неподвижные относительно земли аэростат и трос; иногда и воздух и аэростат перемещаются относительно земли и один относительно другого. В результате этого движения происходит взаимодействие движущегося потока воздуха с аэростатом или тросом, вследствие чего возникают аэродинамические силы. Характер и величины этих сил описаны в главе II.

В реальных условиях к аэростату и тросу приложены статические и аэродинамические силы, взаимодействие которых определяет условия стоянки аэростата, характер свободного или вынужденного движения его по вертикали и горизонтали, натяжение в тросе и другие эксплуатационные характеристики аэростата.

Рассмотрению этих реальных условий эксплуатации посвящены главы III и IV, основные в данном труде.

ГЛАВА I

АЭРОСТАТИКА

1. Подъемная сила

Сила, поднимающая аэростат кверху, называется подъемной силой. Чтобы понять ее происхождение и найти способ определения численной ее величины, обратимся к плаванию тел в воде, имеющему много общего с плаванием тел в воздухе.

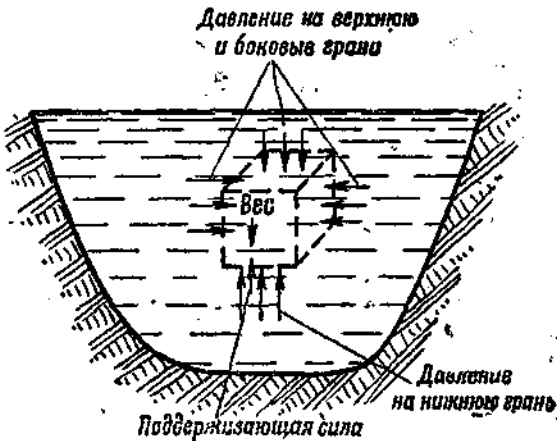


Рис. 1. Равновесие куба воды: вес куба воды равен поддерживающей силе

Из большой массы спокойной воды выделим куб воды, находящийся в равновесии, т. е. не опускающийся, не поднимающийся и недвигающийся в стороны (рис. 1).

Вода, окружающая куб, оказывает на него давление, направленное со всех сторон. Известно, что давление воды прямо пропорционально глубине, т. е. на большей глубине давление всегда больше. Давление на противоположные боковые грани уравнивается, так как

грани занимают по глубине одно и то же положение. Давление на верхнюю и нижнюю грани неодинаково, так как грани находятся на разной глубине. Давление на нижнюю грань, умноженное на площадь нижней грани, дает силу, направленную снизу вверх; давление на верхнюю грань, умноженное на ее площадь, дает силу, направленную сверху вниз. Но давление на нижнюю грань больше, чем на верхнюю, а площади их одинаковы. Поэтому равнодействующая этих двух сил направлена снизу вверх. Она является поддерживающей силой.

Куб, как уже сказано, находится в равновесии, что возможно только тогда, когда все силы и моменты, приложенные к телу, уравниваются. Кроме поддерживающей силы, на куб действует только сила веса, направленная сверху вниз. Так как других сил нет, то поддерживающая сила равна весу куба воды и направлена в противоположную сторону.

Если вместо куба воды взять деревянный или какой-либо другой куб, то давление окружающей воды на его грани будет таким же, как на водяной куб, и поддерживающая сила не изменится; она равна весу куба воды.

Вывод из этих рассуждений сформулирован в законе Архимеда: „На всякое тело, погруженное в жидкость, действует поддерживающая сила, направленная снизу вверх и равная по величине весу объема жидкости, равного объему погруженного тела”.

Этот закон полностью относится к телам, плавающим в воздухе. Поддерживающая сила, приложенная к аэростату в воздухе, возникает вследствие разного давления воздуха на нижнюю и верхнюю части аэростата (рис. 2).

Определим величину поддерживающей силы, приложенной к аэростату объемом в 500 м^3 .

Поддерживающая сила равна весу объема воздуха, равного 500 м^3 . Вес одного кубического метра воздуха, называемый также плотностью воздуха, равен $1,25 \text{ кг}$.

Обозначая поддерживающую силу символом A , получаем:

$$A = 1,25 * 500 = 625 \text{ кг.}$$

Поддерживающая сила в данном примере равна 625 кг и, следовательно, больше веса аэростата указанного объема.

Вычита из поддерживающей силы вес аэростата и вес газа в аэростате, получим избыток поддерживающей силы над весом аэростата и газа в нем:

$$F = A - G_{\text{аэр}} - G_{\text{газ}}$$

где $G_{\text{аэр}}$ — вес аэростата;
 $G_{\text{газ}}$ — вес газа в аэростате,

*Равнодействующая сил давления
 воздуха по всей поверхности тела*

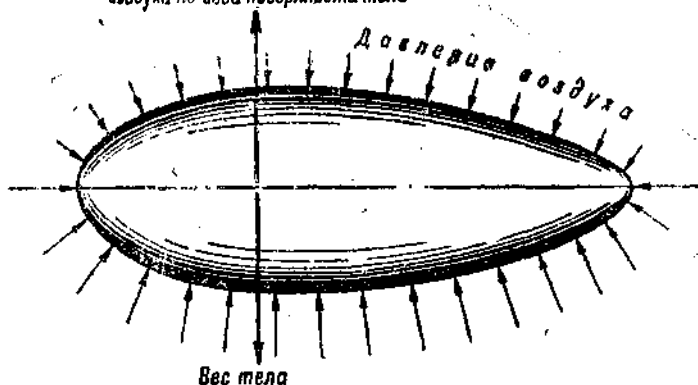


Рис. 2. Равновесие тела в воздухе: поддерживающая сила равна весу тела

Эта избыточная сила F называется **свободной подъемной силой**. Иногда ее называют сплавной или **всплывной силой**.

Для аэростата объемом в 500 м^3 , весящего 200 кг и наполненного водородом, плотность которого

$$\gamma = 0,125 \text{ кг/м}^3,$$

свободная подъемная сила будет

$$F = 625 - 200 - 0,125 \cdot 500 = 362,5 \text{ кг}.$$

Вследствие практических неудобств определения веса газа вместо поддерживающей силы рассматривают другую силу, называемую **статической подъемной** или просто **подъемной силой**. Эта сила меньше поддерживающей силы на вес газа и представляет собой ту часть поддерживающей силы, которая идет на подъем аэростата и его деталей.

Не следует думать, что вес газа в аэростате незначителен. Если считать, что газ легче воздуха приблизительно в 10 раз, то вес газа в аэростате объемом в 500 м^3 будет равен $62,5 \text{ кг}$.

Подъемная сила обозначается буквой Φ .

$$\Phi = A - G_{\text{газа}}$$

Так как поддерживающая сила равняется плотности воздуха, умноженной на объем аэростата, а вес газа равен плотности газа, умноженной на тот же объем, то:

$$\Phi = (\gamma_a - \gamma_r) \cdot U,$$

где Φ — подъемная сила в кг ;

γ_a — плотность воздуха в $\text{кг}/\text{м}^3$;

γ_r — плотность газа в $\text{кг}/\text{м}^3$;

U — объем аэростата в м^3 .

В том случае, когда газ не заполняет всего объема аэростата, нужно в написанную формулу вместо объема аэростата подставить объем газа в аэростате.

Свободная подъемная сила может быть представлена как разность между подъемной силой и весом аэростата:

$$F = \Phi - G_{\text{аэр}}$$

Эту силу определяют взвешиванием аэростата.

Разность, получаемая при вычитании плотности газа из плотности воздуха, называется удельной подъемной силой. Удельная подъемная сила показывает, сколько килограммов груза может поднять один кубический метр газа, и выражается в килограммах на кубический метр. Произведение удельной подъемной силы на объем аэростата есть подъемная сила.

В нормальных условиях, т. е. при температуре 15°Ц и давлении 760 мм ртутного столба, водород имеет удельную подъемную силу, $1,1 \text{ кг}/\text{м}^3$, гелий — $1,0 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Подъемная сила может быть больше, меньше или равна весу аэростата или весу аэростата и троса, если аэростат привязной. В первом случае аэростат будет подниматься, во втором опускаться, а в третьем уравновесится.

2. Статика атмосферы

Атмосфера, окружающая землю, простирается на большую высоту, но для целей привязного воздухоплавания требуется изучение лишь небольшой части ее, ибо по-

толки привязных аэростатов ограничены сравнительно небольшими высотами.

Состояние атмосферы в каком-либо месте определяется давлением, температурой и влажностью воздуха. Известно, что давление в воде увеличивается соответственно глубине. Это же самое наблюдается и для воздуха: давление увеличивается по мере роста „глубины“ атмосферы, если за начало считать верхнюю границу атмосферы. Считая снизу вверх, что практически удобнее, получим обратную картину: давление с увеличением высоты будет уменьшаться. Законы изменения давления и плотности в атмосфере сложнее по сравнению с законами изменения давления и плотности в воде.

В отличие от воды, плотность которой практически не меняется по глубине вследствие ее несжимаемости, воздух способен расширяться, сжиматься и в результате менять свою плотность.

Воздух в атмосфере имеет способность неограниченно распространяться во все стороны, но сила притяжения земли ограничивает такую возможность. Эти два противоположных взаимодействующих явления следует считать основными физическими причинами непрерывного изменения плотности и давления в атмосфере.

Особенностью изменения физического состояния атмосферы является уменьшение температуры по высоте до некоторого предела. Существование в атмосфере одинаковой температуры привело бы к одинаковым закономерностям изменения давления и плотности воздуха с высотой. Вследствие понижения температуры с увеличением высоты плотность воздуха уменьшается медленнее, чем давление.

Температурные условия в атмосфере меняются не только по широтам и временам года, но и по дням, а иногда и по часам. Найти общий закон изменения плотности и давления с высотой, применимый для всех возможных состояний атмосферы, невозможно.

Для установления однообразия в расчетах и для возможности сравнения летательных аппаратов одного с другим вместо действительной атмосферы рассматривается так называемая стандартная атмосфера. Эта условная атмосфера характеризуется определенным законом изменения температуры с высотой (уменьшением ее на $6,5^\circ$ на каждые 1000 м до высоты 11 000 м и сохранением постоянной температуры выше 11 000 м) и нормальными

условиями у земли (давление 760 мм ртутного столба и температура 15°С).

В таблице стандартной атмосферы, приведенной в сокращенном виде в конце книги, указана принятая закономерность изменения давления и плотности воздуха

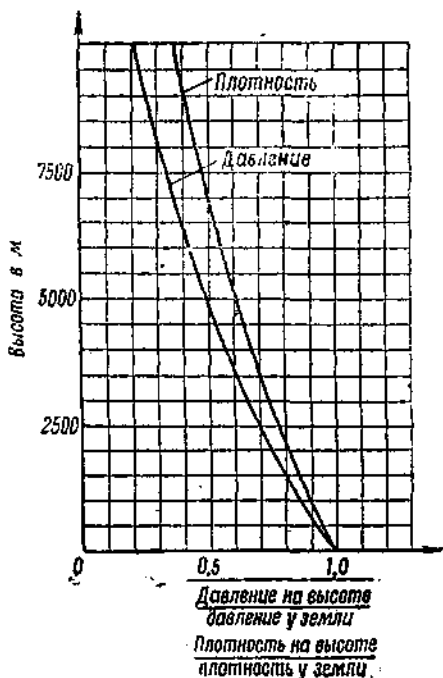


Рис. 3. Характер изменения относительной плотности и относительного давления воздуха по высоте

можно было сравнивать между собой высоты, достигаемые летательными аппаратами, практические высоты приводят к стандартным, для чего по плотности, полученной на практической высоте, находят по таблице стандартной атмосферы ту высоту, на которой плотность воздуха была бы такая же.

Увеличение объема воздуха с высотой связано с изменением его плотности. Кубический метр воздуха у земли, перенесенный на большие высоты, занял бы объем гораздо больший. Так как плотность равняется весу тела, деленному на его объем, то при постоянном весе объем

с высотой, причем величины плотностей и давлений даны в этой сокращенной таблице до высоты 10000 м с интервалом между соседними значениями 500 м. Для более точных расчетов пользуются таблицами, в которых эти величины даны через каждые 50 м. Кроме абсолютных значений плотности и давления, в таблице приведены их относительные значения, которые в практике расчетов имеют широкое применение.

На рис. 3 графически изображены принятые в стандартной атмосфере изменения плотности и давления воздуха с высотой.

Разница между практической и стандартной высотами может достигать сотен метров. Чтобы

воздуха должен увеличиться во столько же раз, во сколько уменьшилась плотность. Отсюда следует правило: объем воздуха с высотой изменяется обратно пропорционально его плотности.

Кроме стандартной атмосферы, существует понятие „однородная атмосфера“. Всю действительную атмосферу заменяют нереальной атмосферой, в которой существуют постоянные давление и плотность. Высоту однородной атмосферы легко подсчитать.

Давление равняется весу столба воздуха, имеющего сечение 1 м^2 и простирающегося до верхней границы атмосферы. Если принять плотность и давление не изменяющимися с высотой, то давление получается как произведение плотности воздуха на высоту столба воздуха. Но высота однородной атмосферы и есть высота такого столба воздуха. Поэтому, разделив давление на плотность воздуха, получим высоту однородной атмосферы:

$$I = \frac{P}{\gamma},$$

где I — высота однородной атмосферы в м;

P — давление воздуха в кг/м^2 ;

γ — плотность воздуха в кг/м^3 .

Примем давление у земли равным $10,333 \text{ кг/м}^2$ и плотность воздуха при 0° равной $1,293 \text{ кг/м}^3$. Тогда высота однородной атмосферы будет

$$I = \frac{10,333}{1,293} \approx 8 \text{ км} = 8000 \text{ м},$$

т. е. если бы давление и плотность в атмосфере были одинаковы на всех высотах и равны тем значениям, которые мы приняли, то такая атмосфера имела бы высоту 8000 м .

Понятием однородной атмосферы пользуются для приближенных подсчетов, связанных с подъемами на малые высоты, при определении диаметра клапана и т. д. Однородная атмосфера оказывается очень удобной в приложении к „малым“ атмосферам, к которым относится, например, атмосфера газа в оболочке аэростата, строго подчиняющаяся тем же законам, что и „большая“ воздушная атмосфера. В таких „малых“ атмосферах изме-

нение относительной плотности с высотой принимается по простому закону:

$$\frac{\gamma_z}{\gamma_0} = 1 - \frac{z}{l},$$

где γ_z — плотность воздуха на высоте;

γ_0 — плотность воздуха у земли;

z — высота, на которой находится величина относительной плотности воздуха.

3. Изменение подъемной силы

Статическая, а также удельная подъемные силы подвержены изменениям, зависящим от внешних условий и состояния газа в оболочке. Наиболее важными следует считать внешние атмосферные условия, характеристики которых мы уже рассмотрели.

Удельная подъемная сила определяется как разница между плотностями воздуха и подъемного газа. С увеличением высоты плотность воздуха и плотность подъемного газа уменьшаются вследствие расширения. При одинаковой температуре воздуха и подъемного газа удельная подъемная сила должна уменьшиться во столько же раз, во сколько уменьшилась плотность воздуха или газа. Уменьшение плотности воздуха с высотой находится по таблице стандартной атмосферы. Уменьшив во столько же раз удельную подъемную силу у земли, во сколько уменьшилась относительная плотность воздуха на высоте, получим удельную подъемную силу на высоте z . Удельная подъемная сила находится из пропорции:

$$\frac{\phi_z}{\phi_0} = \frac{\gamma_z}{\gamma_0},$$

где ϕ_z — удельная подъемная сила на высоте z ;

ϕ_0 — удельная подъемная сила у земли;

γ_z — плотность воздуха на высоте z ;

γ_0 — плотность воздуха у земли.

Отношение $\frac{\gamma_z}{\gamma_0}$ обозначают греческой буквой Δ (дельта); как уже отмечалось, его величины даны в таблице стандартной атмосферы.

Из пропорции определяем удельную подъемную силу на высоте z :

$$\phi_z = \phi_0 \cdot \Delta.$$

Таким образом, удельная подъемная сила **изменяется** с высотой пропорционально изменению плотности воздуха (рис. 4). Изменение статической (полной) подъемной силы имеет некоторые особенности, зависящие от степени наполнения оболочки газом. Аэростат, весь объем которого заполнен газом, называется выполненным; частично выполненный называется невыполненным аэростатом. Невыполнение аэростата определяется величиной, называемой степенью выполнения.

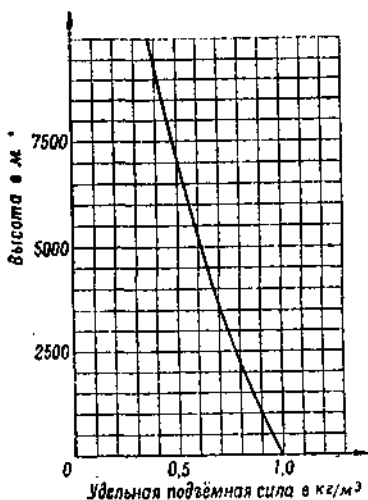


Рис. 4. Удельная подъемная сила уменьшается при увеличении высоты пропорционально уменьшению плотности воздуха

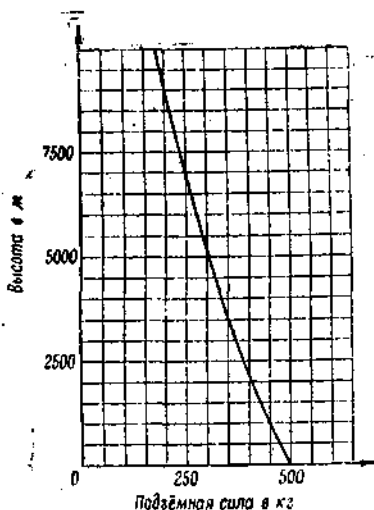


Рис. 5. Подъемная сила газа в выполненном аэростате уменьшается пропорционально уменьшению плотности воздуха по высоте

$$\text{Степень выполнения} = \frac{\text{объем влитого газа}}{\text{весь объем оболочки}}$$

Газ в выполненном аэростате не может менять своего объема при подъеме, но в результате расширения газа часть его выходит в атмосферу. Так как удельная подъемная сила уменьшается с высотой пропорционально **плотности**, а объем газа остается неизменным, то подъемная сила выполненного аэростата уменьшается с **высотой** пропорционально уменьшению плотности (рис. 5).

В невыполненном аэростате газ расширяется внутри оболочки; изменение объема газа обратно пропорционально изменению плотности воздуха с высотой, а **изме-**

нение удельной подъемной силы прямо пропорционально изменению той же плотности, поэтому подъемная сила не изменится (рис. 6).

Например, если **аэростат** поднялся на высоту **6 500 м**, то удельная подъемная сила уменьшилась в два раза, а объем газа увеличился в два раза. Но произведение

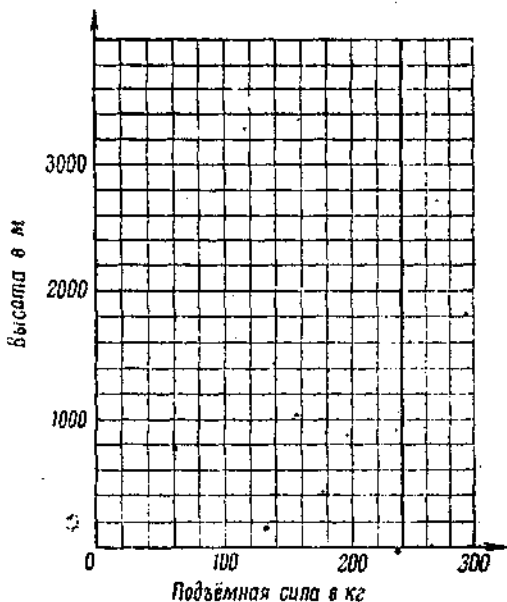


Рис. 6. Подъемная сила невыполненного аэростата постоянна по высоте

удельной подъемной силы на объем есть подъемная сила, которая не должна измениться от того, что один **множитель** уменьшился в два раза, а другой увеличился в два раза. Отсюда можно сделать заключение: подъемная сила невыполненного аэростата до выполнения аэростата по высоте постоянна.

Высота, на которой аэростат выполняется, называется высотой или уровнем выполнения. Ее легко определить из пропорции:

$$\frac{\text{объем влитого газа}}{\text{весь объем оболочки}} = \frac{\text{плотность воздуха на уровне выполнения}}{\text{плотность воздуха у земли}}$$

Степень выполнения обозначают греческой буквой ν (ни).

$$\nu = \Delta \text{ уровня выполнения.}$$

Зная степень выполнения, можно по таблице стандартной атмосферы найти высоту выполнения.

Перегрев газа в оболочке по сравнению с температурой воздуха, что часто получается в результате действия солнца или при спуске, увеличивает подъемную силу.

Перегрев газа в выполненном аэростате на 25° увеличивает подъемную и удельную подъемную силы примерно на 1%. Выполненный аэростат, имеющий подъемную силу 300 кг, при перегреве на 25° увеличивает ее до 303 кг.

Перегрев воздуха по отношению к газу, например при попадании аэростата в теплый слой воздуха, отрицательно сказывается на подъемной силе аэростата вследствие уменьшения плотности воздуха. На каждые 2,5° перегрева статическая подъемная сила уменьшается приблизительно на 1%.

Невыполненные аэростаты более чувствительны к изменению температуры, чем выполненные. Увеличение подъемной силы невыполненного аэростата получается вследствие уменьшения плотности газа, расширения его и увеличения занимаемого им объема.

Подъемная и удельная подъемная силы изменяют свои величины при изменении влажности воздуха и газа. Плотность водяных паров меньше плотности воздуха, но больше плотности газа. Следовательно, смесь воздуха с водяными парами имеет плотность, меньшую плотности воздуха, а смесь газа с водяными парами дает плотность, большую плотности газа. Таким образом, прибавление водяных паров к воздуху или к газу уменьшает подъемную силу последнего. Примерные величины уменьшения подъемной силы, вызванные наличием влажности в воздухе, при полной его насыщенности, даны в следующей таблице.

Температура воздуха	0	15	30	45
Уменьшение подъемной силы в %	0,26	0,63	1,80	3,90

Применяемые в воздухоплавании газы (водород, гелий) при практическом их использовании не бывают химически чистыми, а содержат в качестве примесей водяные пары, азот и другие газы, которые увеличивают их

плотность. Степень засоренности газа примесями характеризует „чистоту“ газа.

Если говорят, что чистота газа 90%, то это значит, что газ содержит 10% примесей. Чем больше чистота газа, тем меньше его плотность и тем больше удельная подъемная сила газа.

Существует несколько способов определения чистоты газа в баллоне. Опишем простейший из них, доступный каждому воздухоплавателю.

Шарик известного объема и веса наполняют газом до выполнения и уравнивают у земли. Удельная подъемная сила газа равняется весу шарика с грузиками, деленному на объем шарика:

$$\phi = \frac{G}{U}.$$

Значение удельной подъемной силы приводим к стандартным условиям у земли:

$$\phi_0 = \phi \cdot \frac{T}{P} \cdot \frac{760}{288},$$

где P — давление у земли в миллиметрах ртутного столба в момент испытаний;

$T = t + 273$, где t — температура у земли в градусах Цельсия.

Чистота газа определится по формуле:

$$\text{чистота газа} = 2,30 \cdot \phi \cdot \frac{T}{P},$$

где 2,30 получилось в результате деления величины $\frac{760}{288}$ на удельную подъемную силу чистого газа — 1,15,

$$\text{или чистота газа} = \frac{\phi_0}{1,15}.$$

В отличие от химически чистых газов, газы, применяемые в воздухоплавании, называются техническими.

Определение удельной подъемной силы газа при различных температурах и давлении окружающего воздуха и различной чистоте подъемного газа затруднительно вследствие громоздкости получающихся формул. Для облегчения операций построена номограмма (рис. 7), по которой при помощи простой линейки легко определить удельную подъемную силу водорода.

Последовательность **действий** указана на номограмме линиями со стрелками. На вертикальной прямой, где отмечены давления в миллиметрах ртутного **столба**, отмечают точку, соответствующую заданному **давлению**, и из нее проводят горизонтальную прямую до пересечения с наклонной прямой, соответствующей заданной температуре. Через вновь полученную точку проводят вертикаль до **пересечения** ее с одной из наклонных прямых, пересекающих наклонные прямые температур (у которой справа стоит цифра заданной чистоты газа). На пересечении горизонтальной прямой, проведенной из последней точки, с правой вертикальной осью получается искомое значение удельной подъемной силы.

Пример. Определить удельную подъемную силу водорода при давлении в 760 мм ртутного столба, температуре 15° Ц и чистоте газа 0,96.

На левой вертикальной оси находим точку 760 и проводим через нее горизонталь до пересечения с наклонной прямой, на которой сверху написана цифра 15. Через новую точку проводим вертикаль до пересечения с наклонной **прямой**, на которой справа написана цифра 0,96. Отсюда проводим горизонталь до пересечения с правой вертикальной **осью**, на которой и читаем ответ:

$$\phi = 1,1 \text{ кг/м}^3.$$

4. Перегрев и переохлаждение ¹

Перегрев и переохлаждение, являющиеся более **нормальными** состояниями газа в оболочке аэростата, чем принимаемое при выводах некоторых аэростатических законов равенство температур окружающего оболочку воздуха и газа в аэростате, возникают от двух видов причин. К первым относятся такие регулярно действующие причины, как время года, дня и климатические условия; ко вторым — скорость и направление ветра, влажность, облачность, состояние земного покрова и некоторые другие.

Днем аэростат и находящийся в нем газ нагреваются солнечной, земной и атмосферной радиацией. Ночью аэростат нагревается земной и атмосферной радиацией и охлаждается в результате излучения тепла в атмосферу.

Облачность оказывает значительное влияние на перегрев или переохлаждение аэростата. Перегрев газа возрастает, если аэростат днем находится над облаками,

¹ Данные по перегреву и переохлаждению заимствованы из рукописи Д. О. Боярищева — Тепловой режим привязного аэростата.

и, наоборот, уменьшается, если **аэростат** находится днем под облаками. Ночью переохладение газа уменьшается в том случае, когда **аэростат** находится в облаках или под ними.

Наличие снегового покрова увеличивает перегрев аэростата. Поэтому наибольший перегрев газа в аэростате наблюдается обычно **весной**, когда снег еще не сошел, но солнечная радиация достаточно **интенсивна**.

Перегрев газа в баллонетном аэростате в условиях летнего времени больше перегрева **газа** в аэростате со стягивающей системой при всех прочих равных условиях. Зимой и весной, когда имеется снеговой **покров**, перегрев газа в аэростате со стягивающей системой больше перегрева газа в баллонетном аэростате.

Переохладение газа в баллонетном аэростате больше переохладения газа в аэростате со стягивающей системой. Это объясняется тем, что излучение тепла у них одинаковое, а нагревание газа земной радиацией в аэростате со стягивающей системой происходит более интенсивно, чем в баллонетном аэростате, у которого баллонет с воздухом представляет собой изолирующий слой.

Кратковременный перегрев или переохладение могут возникнуть при подъеме и спуске аэростата. Величина перегрева или переохладения зависит от соотношения между скоростями подъема или спуска и быстротой изменения температуры с высотой. Если температура воздуха медленно падает с высотой, а аэростат поднимается с большой скоростью, то газ в аэростате может переохладиться.

Скорость и направление ветра существенно влияют на величину перегрева газа: чем больше скорость ветра, тем, естественно, **перегрев** газа меньше. Что касается влияния направления ветра, то наибольшая поверхность нагрева получается при западном и восточном направлениях ветра, **наименьшая** — при северном и южном; **поэтому в первом** случае перегрев будет наибольший, во **втором** — наименьший.

Опыты показали, что летом при слабом ветре перегрев может доходить до **25 °Ц** и при ветре **10 м/сек** — до **18 °Ц**. Некоторые участки алюминированной оболочки, на которые в полдень лучи падают под прямым углом, перегреваются в ясный тихий день до **70 °Ц**.

В практике эксплуатации перегрев и переохладение могут стать источниками временного, но иногда **значи-**

тельного ухудшения **подъемно-эксплуатационных** характеристик аэростата.

При проектировании аэростата перегрев обычно учитывают, принимая его равным $15-20^{\circ}\text{C}$. Перегрев газа сверх расчетной величины приводит к потере газа и к первому сверхдавлению (см. стр. 21).

Переохлаждение газа влечет за собой уменьшение статической подъемной силы и уменьшение высоты подъема аэростата.

Наибольший интерес с эксплуатационной точки зрения представляет подъем аэростата с перегретым газом ночью. Если перед ночным подъемом аэростат был подполнен до отметки на репере, соответствующей минимальному объему при перегреве $15-20^{\circ}\text{C}$, то при стоянке аэростата газ будет непрерывно охлаждаться и высота аэростата непрерывно снижаться. Особенно интенсивное переохлаждение происходит в ясную погоду при безветрии. Отмечен случай, когда вследствие переохлаждения аэростат снизился за ночь на 1 000 м.

При подъеме на рассвете и подполнении до отметки, соответствующей минимальному объему, аэростат в течение первой половины дня может вытянуть количество троса, по длине превосходящее расчетную величину. Со второй половины дня, если аэростат будет в воздухе, начнется охлаждение газа и падение высоты. Чем больше перегревался газ в первой половине дня, тем значительнее будет уменьшение высоты во второй половине дня.

Возможные последствия перегрева и переохлаждения не только следует учитывать при эксплуатации, но и энергично с ними бороться.

Разберем несколько типичных случаев.

1. Аэростат наполнен газом в соответствии с расчетным перегревом $15-20^{\circ}\text{C}$ и поднимается при таких условиях, что перегрев неизбежен. В этом случае степень выполнения аэростата должна быть равна расчетной, т. е. аэростат целесообразно наполнить газом до отметки на репере, соответствующей минимальному объему. Если же при подъеме перегрева не ожидается, то аэростат следует наполнить большим количеством газа, чем в том случае, когда ожидается перегрев. Наполнение аэростата таким же количеством газа, какой предусмотрен расчетом, приведет к уменьшению подъемной силы газа по отношению к расчетной величине, и аэростат не достигнет

статического потолка. Количество газа, которое нужно влить дополнительно, пропорционально отношению расчетного перегрева к абсолютной температуре при нормальных условиях и составит от 1/15 до 1/25 газового объема.

При ночных подъемах объем газа должен превосходить расчетную величину, отмеченную на репере, причем превышение должно быть тем больше, чем большее переохлаждение можно ожидать.

2. Аэростат до подъема находился на биваке, и газ в аэростате сильно перегрет; подполнение газом производится из газгольдера, где газ также сильно перегрет. В условиях ночного подъема газ охладится, и аэростат будет терять высоту. Если начальный газовый объем задан в соответствии с расчетным значением его, соответствующим перегреву 15°C , и перегрев газа до подъема имел такую же величину, то потеря подъемной силы составит до 1/10 расчетной величины, и высота подъема аэростата уменьшится по сравнению с расчетной. Отсюда следует, что в условиях, аналогичных описанному, начальный газовый объем аэростата должен быть увеличен по сравнению с расчетным.

3. Степень выполнения аэростата, поднимающегося с перегретым газом в зону ветров большой скорости, целесообразно увеличить по отношению к расчетной; в этом случае сохранится величина расчетной подъемной силы.

5. Сверхдавление. Клапаны

Давление в „малой“ атмосфере, к которой мы относим газовое пространство аэростата, изменяется так же, как и в большой атмосфере. Но вследствие незначительности высоты „малой“ атмосферы давление можно считать уменьшающимся пропорционально высоте. Кроме того, изменение давления будет пропорционально плотности газа, т. е. у легких газов оно по высоте будет изменяться медленнее, чем у тяжелых. Поэтому давление газа в оболочке будет изменяться медленнее, чем давление окружающего воздуха. Если давление воздуха и давление газа в нижней части оболочки одинаково, то в верхней части давление газа превышает давление воздуха, так как в газовом пространстве оно падает медленнее. Во всех точках оболочки, расположенных выше уровня одинаковых давлений, получатся избыточ-

ные давления. Избыточное давление называется сверхдавлением.

Запишем математически наши рассуждения.

При увеличении высоты на величину h давление воздуха уменьшится на величину, равную плотности воздуха, умноженную на высоту h :

$$P' = P_0 - \gamma_n \cdot h.$$

Давление газа изменится меньше, но формула будет такая же, как для воздуха, только вместо плотности воздуха нужно подставить плотность газа:

$$P'' = P_0 - \gamma_r \cdot h.$$

Разность давлений газа и воздуха на высоте h получится:

$$P'' - P' = (\gamma_n - \gamma_r) \cdot h.$$

Как уже известно, разность плотностей воздуха и газа есть удельная подъемная сила. Поэтому сверхдавление в любой точке аэростата будет произведением удельной подъемной силы на превышение этой точки над уровнем одинаковых давлений воздуха и газа. Обозначив сверхдавление буквами ΔP , получим:

$$\Delta P = \phi \cdot h.$$

Если по каким-либо соображениям давление газа в нижней части аэростата должно быть больше давления воздуха, т. е. должно быть начальное сверхдавление, то в этом случае для любой точки на аэростате сверхдавление будет суммой начального сверхдавления и ΔP (рис. 8). Следовательно, для данного случая можно написать:

$$\Delta P = P_0 + \phi \cdot h,$$

где P_0 — начальное сверхдавление.

Благодаря сверхдавлению корпус аэростата сохраняет свою форму и не деформируется от внешнего давления. Газ в аэростате не только создает подъемную силу, но и служит своего рода силовым элементом, поддерживающим форму аэростата. Потеря сверхдавления в аэростате всегда грозит аварией в тех случаях, когда на аэростат набегает средние и сильные ветры.

Не менее опасно, чем потеря сверхдавления, возникновение чрезмерного сверхдавления. В наглухо закрытом аэро-

стате при подъеме неизбежен рост сверхдавления вследствие уменьшения внешнего давления воздуха при постоянном давлении газа. Это будет и в том случае, когда расход воздуха из невыполненного баллонетного аэростата и газа из выполненного аэростата со стягивающей системой при подъеме не будет компенсировать расширения.

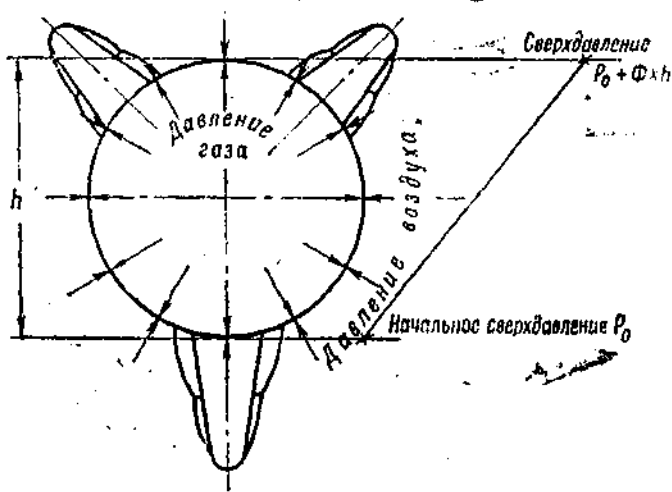


Рис. 8. Сверхдавление в любой точке аэростата увеличивается пропорционально превышению этой точки над нижней точкой аэростата

Для регулирования сверхдавления существуют воздушные и газовые клапаны. Каждый клапан рассчитан на определенную скорость подъема аэростата. Вследствие недостаточной пропускной способности клапанов увеличение скорости подъема сверх расчетной будет сопровождаться ростом сверхдавления.

Наибольшая вертикальная скорость, допускаемая без потери газа для баллонетного аэростата, имеющего несколько клапанов, определяется по формуле

$$v = 0,075 \cdot \frac{n \cdot d \cdot h}{U} \cdot \sqrt{\Delta P},$$

где n — количество клапанов;
 d — диаметр тарелки клапана в мм;
 h — максимальная высота открытия клапана в мм;
 U — объем аэростата в м³;
 ΔP — допускаемое сверхдавление в кг/м².

Эта формула является результатом следующих рассуждений.

Расход воздуха через клапаны, выраженный в кубических метрах в секунду и зависящий от числа клапанов, площади открытия клапана и скорости истечения воздуха через клапан, должен равняться такому увеличению объема газа внутри аэростата, которое происходит при подъеме. Увеличение объема газа зависит от объема аэростата, скороподъемности и быстроты изменения плотности с высотой.

Математически исходные формулы выглядят так:

$$Q_1 = n \cdot \mu \cdot \pi \cdot d \cdot h \cdot w;$$

$$Q_2 = \frac{v \cdot U}{T},$$

где Q_1 — расход газа или воздуха через клапан в $\text{м}^3/\text{сек}$;

Q_2 — расширение газа или воздуха при подъеме в $\text{м}^3/\text{сек}$;

μ — коэффициент расхода, равный 0,6;

w — скорость истечения воздуха

(остальные обозначения — по предыдущим формулам).

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}},$$

где ρ — массовая плотность воздуха или газа.

Массовая плотность примерно в 10 раз меньше весовой плотности; по высоте массовая плотность изменяется так же, как весовая; ρ у земли можно принять:

$$\rho_0 = \frac{1}{8},$$

а на высотах

$$\rho_z = \rho_0 \cdot \Delta,$$

где Δ берется из таблицы стандартной атмосферы.

Для современных аэростатов величину $\sqrt{\Delta P}$ следует принимать не более 8:

$$\sqrt{\Delta P} = 8.$$

В аэростате со стягивающей системой, имеющем возможность свободно и автоматически изменять до некоторой высоты объем, чрезмерного повышения сверхдавления не наблюдается. Скорость подъема здесь ограничивается другими факторами, которые описаны в разделе 3 главы IV (Подъем аэростата).