

AIR SPORT RUSSIA

ПЛОТНОСТЬ ВЫСОТЫ



Дмитрий Куликов

airsport.ru

2010

ПЛОТНОСТЬ ВЫСОТЫ

ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫСОТЫ

Давайте поговорим о «Плотности высоты».

Большинство пилотов аэростатов не имеют абсолютно никакого представления об изменении плотности воздуха с изменением высоты или что-то слышали и имеют самое отдалённое представление о том, что это такое и как плотность воздуха влияет на любой летательный аппарат, который покидает землю.

Абсолютно на все воздушные суда, начиная с маленьких парамоторов и заканчивая огромными трансконтинентальными лайнерами, распространяется воздействие изменения плотности воздуха в зависимости от высоты.

Само понятие «плотности высоты» представляет собой график изменения температуры, давления и плотности воздуха в зависимости от высоты. Все эти значения сильно зависят от конкретных условий погоды. Однако, для расчётов можно использовать значения для стандартной атмосферы (атмосферы приведённой к стандартным условиям). Рассчитать можно какая подъёмная сила будет действовать на крыло, сколько понадобится лошадиных сил для полёта на разных высотах, какая тяга двигателей понадобится, чтобы летательный аппарат летел и мог преодолевать сопротивление воздуха.

Стандартная атмосфера

Международная стандартная атмосфера (МСА) — гипотетическое вертикальное распределение температуры, давления и плотности воздуха в атмосфере Земли, которое по международному соглашению представляет среднегодовое и среднеширотное состояние. Составление первых МСА относятся к 20-м гг. XX в. В последующие годы в связи с ростом диапазонов скоростей и высот полётов наряду с основными термодинамическими параметрами в МСА стали указывать значения скорости звука, ускорения свободного падения, молярной массы воздуха, вязкости, длины пробега молекул и других параметров. Цель создания МСА — унификация исходных значений параметров атмосферы, используемых при расчётах и проектировании авиационной техники, обработке результатов геофизических и метеорологических наблюдений и для приведения результатов испытаний летательных аппаратов и их элементов к одинаковым условиям. Основой для расчёта параметров

МСА служат уравнения статики атмосферы и состояния идеального газа (см. [Аэростатика](#), [Барометрическая формула](#)).

В 1961—1972 Комитет по исследованиям космического пространства (КОС-ПАР) издал три справочные атмосферы (С РА 1961, 1965, 1972), в которых ее параметры указаны в зависимости от широты, времени суток, солнечного цикла и др. В 1975 Международной организацией по стандартизации (ИСО) при участии КОС-ПАР и других организаций была издана МСА, построенная на основе результатов измерений с помощью метеорологических ракет (проект МСА был разработан совместно специалистами СССР и США). В 1982 ИСО опубликовала справочную атмосферу для использования в авиации, в которой представлены термодинамические параметры трёх широтных зон (полярный район, средние и тропические широты) до высоты 80 км.

В ряде стран на базе МСА создаются национальные стандартные атмосферы. Так, ГОСТ «Атмосфера стандартная», соответствующий международному стандарту, устанавливает средние числовые значения оси, параметров атмосферы для высот до 1200 км, для широты $45^{\circ}32'33''$, соответствующие среднему уровню солнечной активности.

Итак, пилотам необходимо применять свои теоретические знания о значениях подъёмной силы, мощности и силе тяги двигателя, чтобы делать расчёт разницы между значениями стандартной атмосферы и реальными значениями в конкретный момент времени и для конкретного места.

Пилоты должны уметь корректировать теоретические значения подъёмной силы, мощности и тяги двигателей с учетом разницы значений между стандартной атмосферой и реальной атмосферой в каждое конкретное время и в каждом конкретном месте. Пилоты используют диаграммы или авиационные компьютеры чтобы с уверенностью сказать, что реальная атмосфера, на определенное время, имеет плотность стандартной атмосферы на некоей высоте, которая может отличаться от истинной высоты. Или это означает, что летательный аппарат может находиться вовсе не на той высоте, на которой должен. Особенно это актуально для полётов в горах.

Таблица.

Числовые значения ряда параметров Международной стандартной атмосферы (Источник: «Авиация: Энциклопедия». М.: Большая Российская энциклопедия, 1994)

ТАБЛИЦА СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЫ								
Н, м	t, С	P, кг/м ²	P, мм.рт.ст	P, кг*сек ² м ²	P/P ₀	ρ/ρ ₀	d (скор. Звукa)	
							м/сек	км/ч
0	15	10332	760	0,1249	1	1	340,4	1225
500	11,75	9734	716	0,119	0,942	0,953	338,5	1219
1000	8,5	9165	674,1	0,1134	0,887	0,907	336	1211
1500	5,25	8622	634,2	0,1079	0,835	0,864	334,8	1204
2000	2	8106	596,2	0,1026	0,785	0,822	332,7	1197
2500	-1,25	7615	560,1	0,0976	0,737	0,781	330,7	1190
3000	-4,5	7149	525,8	0,0927	0,692	0,742	328,7	1183
3500	-7,75	6706	493,2	0,088	0,649	0,705	326,7	1175
4000	-11	6286	462,2	0,0835	0,608	0,669	324,7	1168
4500	-14,25	5887	432,9	0,0792	0,57	0,634	322,7	1161
5000	-17,5	5508	405,1	0,0751	0,533	0,601	320,7	1154
5500	-20,75	5150	378,7	0,0711	0,498	0,569	318,6	1146
6000	-24	4811	353,8	0,0673	0,466	0,539	316,6	1139
6500	-27,25	4490	330,2	0,0636	0,435	0,509	314,5	1132
7000	-30,5	4187	307,8	0,0601	0,405	0,481	312,4	1125
7500	-33,75	3901	286,8	0,0568	0,378	0,454	310,3	1117
8000	-37	3630	266,9	0,0536	0,351	0,429	308,2	1110
8500	-40,25	3375	248,1	0,0505	0,327	0,404	306,1	1102
9000	-43,5	3135	230,5	0,0476	0,303	0,381	303,9	1094
9500	-46,75	2909	213,8	0,0448	0,282	0,358	301,8	1086
10000	-50	2696	198,2	0,0421	0,261	0,337	299,6	1078
10500	-53,25	2496	183,4	0,0395	0,242	0,317	299,4	1070
11000	-56,5	2303	169,6	0,0371	0,223	0,297	295,2	1063

Примечание.

Значения параметров взяты из ГОСТ 4401—81. Атмосфера стандартная, соответствующего международному стандарту ИСО 2533; геометрическая высота Н отсчитывается от среднего уровня моря; p_c, (ρ)_c — соответственно значения давления и плотности на среднем уровне моря (Н = 0);

Как это работает: посмотрите на нашу таблицу стандартной атмосферы выше. Представьте себе, что у вас есть некоторое устройство, которое непосредственно измеряет давление воздуха. Обычно, все приборы-высотомеры работают от давления. Представьте себе, что это устройство говорит вам, давление воздуха - 353.8 мм ртутного столба. Вы находите эту цифру в таблице и видите, что эта цифра соответствует давлению воздуха на высоте 6000 метров в стандартной атмосфере. Мы могли бы сказать, что наш летательный аппарат находится на высоте 6000 метров над уровнем моря. Однако, это значение высоты годится только для стандартной атмосферы, и реальная высота может сильно отличаться.

Большинство диаграмм плотности воздуха и специальные калькуляторы для вычисления атмосферного давления отталкиваются в своих вычислениях от температуры, но не от влажности. А между тем, влажный воздух менее плотный, чем сухой воздух, что означает, что будет погрешность в расчётах во влажный день. Но влияние влажности не так велико, как температуры и давления воздуха. Мы расскажем ниже о воздействии влажности, наряду с другими факторами, которые определяют плотность воздуха.

Понятие плотности воздуха

Простыми словами, плотность – масса чего-либо заключённого в некий объём, который он занимает. Ученые обычно измеряют плотность воздуха в килограммах на кубический метр. На уровне моря кубический метр абсолютно сухого воздуха при температуре 0 градусов по Цельсию будет весить 1.275 кг. Иными словами плотность составляет 1.275 килограмм на кубический метр.

Плотность воздуха зависит от температуры, давления и от количества водяного пара, находящегося в этом воздухе. Мы поговорим пока о сухом воздухе, это означает, что мы будем рассматривать только влияние температуры и давления.

Молекулы азота, кислорода и других газов, которые составляют воздух, движутся хаотично с невероятной скоростью, сталкиваются друг с другом и сталкиваются со всеми остальными объектами. Чем выше температура, тем быстрее молекулы движутся. Как только воздух нагревается, молекулы ускоряются, а это означает, что они сталкиваются быстрее и сильнее со своим окружением или, другими словами, они увеличивают воздействие на своё окружение. Если воздух заключён в воздушном шарике, нагревание расширит воздушный шарик, так как скорость молекул воздуха внутри шарика возрастёт, охлаждение воздушного шарика – уменьшит его, так как молекулы замедлятся. А если нагретый воздух ничего не ограничивает (как в случае с воздушным шариком воздух, находящийся внутри шарика, ограничивает оболочка шарика), кроме окружающего такого же воздуха, этот нагретый воздух будет толкать окружающий воздух в стороны. В результате, когда воздух нагревается, его количество в кубическом метре уменьшается. Таким образом, в свободной атмосфере плотность воздуха уменьшается, когда воздух нагревается.

Давление оказывает противоположное воздействие на воздух. Увеличение давления увеличивает плотность. Тоже происходит и при нажатии вниз ручки велосипедного насоса. Воздух сжимается. Плотность растёт по мере увеличения давления.

Высота над уровнем моря и погодные системы (циклоны или антициклоны) могут изменить давление воздуха. Если вы начинаете взлёт, давление воздуха снижается с набором высоты от, около 1000 мбар на уровне моря до 500 мбар на высоте около 5 500 метров. На высоте же в 30 500 метров над уровнем моря давление воздуха составит всего только около 10 мбар. Погодные системы, которые приносят повышение или понижение атмосферного давления также влияют на плотность воздуха, но они влияют не так заметно как изменение высоты, но тоже вносят свой вклад.

Мы видим, что плотность воздуха самая низкая на высоте в жаркий день, когда атмосферное давление низкое. Плотность воздуха высокая на низких высотах, когда высоко давление и низка температура, например в холодный зимний солнечный день.

Влажность и плотность воздуха

Большинству людей, которые не изучали школьный курс физики и химии или уже забыли об этом, трудно поверить, что влажный воздух легче или менее плотный, чем сухой воздух. Как воздух может быть легче, если мы добавим к нему паров воды?

Ученые знали об этом давно. Первым был Исаак Ньютон, который заявил, что влажный воздух менее плотный, чем сухой воздух. Было это в 1717 году в его книге «Оптика». Но другие ученые не принимали этот постулат вплоть до конца 18 века.

Чтобы увидеть, почему влажный воздух менее плотный, чем сухой воздух, нам нужно обратиться к одному из законов природы. Итальянский физик Амадео Авогадро в начале XIX века обнаружил, что фиксированный объем газа, скажем, один кубический метр, при одинаковой температуре и давлении, всегда имеет постоянное количество молекул, независимо от того, какой газ находится в контейнере. Большинство книг по основам химии объясняют, как это работает. Помните термин «число Авогадро»? Так вот это именно об этом.

Представьте себе кубический метр прекрасного сухого воздуха. Он содержит около 78% молекул азота, каждый из которых имеет атомный вес 28. Еще 21% воздуха занимают молекулы кислорода, каждая молекула которого имеет атомный вес 32. Оставшийся один процент представляет собой смесь других газов, которые мы не берём в расчёт. Молекулы могут свободно выйти из нашего кубического метра воздуха. То, что обнаружил Авогадро приводит нас к выводу о том, что, если мы добавили молекулы водяного пара в наш кубический метр воздуха, то некоторые из молекул азота и кислорода покинут его (помните о том, что общее число молекул в нашем кубическом метре воздуха остается постоянным?). Молекулы воды, замещающие молекулы азота и кислорода, имеют атомный вес 18. Это легче, чем молекулы азота и кислорода. Иными словами, заменив молекулы азота и кислорода на молекулы паров воды мы уменьшаем вес воздуха в кубическом метре; то есть плотность уменьшается.

Подождите минуту, но ведь можно сказать, "Я же знаю, что вода тяжелее, чем воздух". Действительно, жидкая вода тяжелее и плотнее, чем воздух. Но вода, во

влажном воздухе не жидкость. Это водяные пары, которые являются газом, а уж он то, как раз и легче, чем азот или кислород.

Влажность воздуха имеет меньшее влияние на плотность воздуха по сравнению с температурой и давлением. Однако, нужно помнить, что влажный воздух менее плотный нежели сухой воздух при тех же температуре и давлении.

Эффекты плотности воздуха

Более плотный, или "тяжелый" воздух будет сильнее замедлять объекты, перемещающиеся через него, потому что объекту необходимо, по сути, преодолеть сопротивление большего числа молекул. Такое сопротивление воздуха возрастает с ростом плотности воздуха. Очень многие используют этот эффект. Например, бейсболисты из США любят играть в Денвере (1500 метров над уровнем моря), потому что мяч летит на много дальше, чем на других равнинных площадках на уровне моря. Или, например, конькобежцы на высокогорном катке «Медео» показывают большую скорость на дистанции из-за меньшей плотности воздуха.

А вот пилотам летательных аппаратов наоборот, в отличии от бейсболистов и конькобежцев, снижение плотности воздуха не по нраву. Более низкая плотность воздуха грозит пилотам тремя проблемами: снижение подъемной силы на крыльях самолёта или роторе вертолета или куполе аэростата, снижение мощности двигателя и снижение тяги воздушного винта, ротора или реактивных двигателей. Эти потери лётных характеристик более чем компенсируются снижением сопротивления на летательном аппарате в менее плотном воздухе.

Пилоты используют диаграммы или специальные калькуляторы, чтобы узнать влияние температуры и воздушного давления в конкретное время и в конкретном месте на плотность воздуха и отсюда уже на лётные характеристики летательного аппарата. В целом, эти расчеты не принимают во внимание влажность, поскольку её влияние гораздо меньше. При низкой плотности воздуха нужно больше места на взлетно-посадочных полосах на взлет и посадку, и набор высоты происходит не так интенсивно, как при высокой плотности воздуха.

Уверен, прямо сейчас, вы задаёте себе вопрос: "что со всем этим делать и как это применимо для полётов на аэростатах?" Ответ заключается в том, что всё это в равной мере относится и к аэростатам тоже.

От плотности воздуха зависят сложности или невозможность прокатить вашего крупного друга в середине июля, в то время как у вас нет проблем с полётами с ним еще в марте или апреле.

Нужно ли вам вычислять плотность воздуха перед каждым полетом на аэростате? НЕТ. Но вы должны сознавать воздействия плотности воздуха на лётные характеристики вашего аэростата!