

## **РАСЧЁТ ИСПРАВЛЕННОЙ АБСОЛЮТНОЙ ВЫСОТЫ**

### **ЧАСТЬ 1**

2-е издание, июнь 1995 г.

По ряду причин, вне зависимости от типа используемого прибора, все показания высоты должны быть скорректированы. Сначала здесь будет теоретическое резюме необходимых поправок. Затем – описание процедуры, которой необходимо следовать при расчёте истинной геометрической высоты из высоты, зафиксированной высотомером или в барограмме. В конце мы попытаемся оценить общую суммарную погрешность расчёта высоты.

## **А. ТЕОРИЯ**

### **1. Поправка по внутренней температуре**

Любой используемый прибор должен быть скорректирован с учётом его внутренней температуры. Температура в механических или электронных частях прибора влияет на показания высоты. Обычно это корректируется в приборе, а любая оставшаяся погрешность включается в таблицу поправок для каждого отдельного прибора.

### **2. Калибровка прибора**

У каждого прибора должна быть калибровочная таблица, показывающая применяемую поправку в зависимости от приборной высоты. Эта поправка может меняться, поэтому прибор должен калиброваться через регулярные промежутки времени, как правило, каждый год, а калибровочная таблица должна быть предоставлена сертифицированной мастерской.

### **3. Поправка по давлению**

Анероидный барограф обычно устанавливается на стандартное давление, поэтому показания должны быть скорректированы по фактическому барометрическому давлению в месте и во время попытки постановки рекорда.

### **4. Поправка по температуре окружающей среды**

Наконец, показания должны быть скорректированы по фактическому распределению температуры окружающей среды во время и в месте полёта. Эту поправку не следует путать с поправкой по температуре прибора, упомянутой выше.

## **СТАНДАРТНАЯ АТМОСФЕРА**

Все приборы для измерения высоты предназначены для указания высоты при стандартной атмосфере. Фактическая температура в атмосфере может значительно отличаться от температуры в идеальном состоянии. Стандартная атмосфера это давление на уровне моря 1013,25 гПа и температура +15 °С. Температура на высоте 11 000 м составляет -56,5°С. От 11 000 до 20 000 метров температура в стандартной атмосфере постоянна и составляет -56,5°С. Приведённые выше цифры означают, что температура на поверхности составляет +15°С и уменьшается на 6,5°С каждую 1 000 метров до 11 000 метров. Все отклонения от этих температур в реальных случаях делают необходимой внесение поправки в показания высоты.

### **5. Расчёт поправки по температуре**

Поправку по температуре можно рассчитать с помощью закона Гей-Люссака. Он успешно доказал, что объём газа пропорционален абсолютной температуре газа или,

$$V/T = k$$

V – объём газа

T – абсолютная температура

k – константа.

Если мы изучим столб воздуха с площадью основания  $A$  и высотой  $H$ , то мы можем записать формулу как

$$(A \times H) / T = k$$

Если мы посмотрим на стандартную атмосферу и сравним её с фактическими условиями,  $k$  будет постоянным. А если мы посмотрим на столб воздуха с той же площадью основания в обоих случаях, то  $A$  также будет тем же самым. Останутся переменные  $H$  и  $T$ .

Применив индекс  $s$  для стандартной атмосферы ICAO (ICAO STD) и индекс  $a$  для фактического окружающего воздуха, мы получим следующую формулу

$$H_s/T_s = H_a/T_a$$

Или более удобную

$$H_a = H_s \times T_a/T_s$$

Температура в атмосфере меняется. Если мы будем изучать воздушную массу небольшими вертикальными частями, то сможем записать формулу следующим образом

$$H = H_c \times T_{ma}/T_{ms} \quad \text{Формула 1}$$

Или, если мы предпочитаем вычислять разницу температур,

#### ФОРМУЛА ПОПРАВКИ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ

$$H = H_c \times [1 + \text{Среднее}(T_a - T_s)/T_{ms}] \quad \text{Формула 2}$$

$H$  = истинная геометрическая высота от среднего уровня моря

$H_c$  = приборная высота, откалиброванная по погрешностям прибора и фактическому барометрическому давлению (QNH)

$T_a$  = фактическая абсолютная температура атмосферы

$T_s$  = стандартная абсолютная температура атмосферы

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ QNH

QNH определяется как «давление на среднем уровне моря (MSL), рассчитанное из барометрического давления на уровне земли с использованием ICAO STD для части между MSL и уровнем земли».

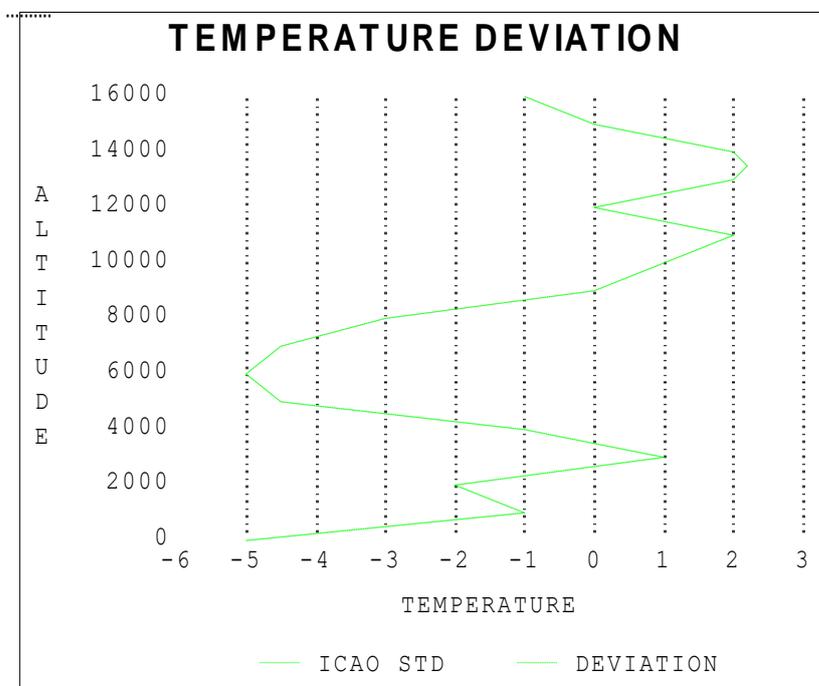
Таким образом, высотомер, установленный на QNH, будет показывать истинную геометрическую высоту на уровне земли (при условии отсутствия погрешности прибора). Это, конечно, представляет интерес для пилотов в повседневной жизни. Их интересует профиль местности. На самом деле они настолько заинтересованы, что добавляют поправку в размере 4% на каждые 10°C отклонения от ICAO STD. Мы скоро узнаем, зачем.

Однако определение QNH представляет интерес и для тех, кто претендует на рекорд. QNH необходимо использовать при расчёте поправки по давлению. Оно также играет роль при расчёте поправки по температуре. Если QNH получено со станции на большой высоте, часть высоты от MSL до высоты этой станции должна игнорироваться при расчёте поправки по температуре, поскольку она уже входит в атмосферу ICAO STD до высоты станции. Это становится важным, если мы получаем QNH со станции, скажем, выше 1000 метров. Подробнее об этом позже.

## ПОЛУЧЕНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ ПОПРАВКИ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ

Поправка по температуре должна основываться на надёжных данных о фактических атмосферных условиях в момент, когда аэростат достигает пиковой высоты. Метеорологические службы по всему миру запускают зонды из разных мест в фиксированное время, обычно в полдень и полночь по всемирному координированному времени (UTC). Поэтому можно получить температурную диаграмму со станции, расположенной не слишком далеко от места рекорда. По крайней мере, в Европе станции, запускающие зонды, иногда находятся на расстоянии до 500 км друг от друга. Тем не менее, можно получить диаграмму, которая является репрезентативной для воздушной массы в месте рекордной высоты. Если мы можем оценить отклонение температуры от ICAO STD с погрешностью в  $1^\circ$ , формула 2 покажет нам, что мы находимся в пределах 0,4%. Требуемая общая погрешность составляет 1%.

Фактическое распределение температуры обычно получают с метеорологических станций в виде таблицы или графика. График обычно показывает температуру ICAO STD в виде более или менее вертикальной линии, а фактическая температура изгибается влево (-) или вправо (+), или иногда пересекает ICAO STD. Независимо от представления полезно сделать простую диаграмму.



Рассчитайте заштрихованную область от уровня земли до высоты пика. Площадь слева от линии STD отрицательная. Площадь справа положительная. Используйте бумагу с миллиметровыми или 5-миллиметровыми квадратами. Возьмите общую площадь справа и вычтите общую площадь слева. Разделите результат на расстояние на бумаге от уровня земли до высоты пика. Посмотрите, скольким градусам соответствует результат этого расчёта. Это число градусов является средним отклонением температуры Среднее ( $T_a - T_s$ ) и может быть положительным или отрицательным. Затем используйте [Формулу 2](#).

## В. ПРОЦЕДУРА

### 1. Необходимые данные

- a. Показания высоты с барограммы или распечатки с электронного барографа или с фотографии высотомера на заявленной высоте.
- b. Время заявленной пиковой высоты и местоположение под ней.
- c. Калибровочная таблица для барографа или высотомера.
- d. QNH (барометрическое давление) с одной или двух станций, расположенных близко к местоположению заявленной пиковой высоты во время её достижения.
- e. Диаграмма радиозонда или эквивалент.

Все документы должны быть подписаны официальным наблюдателем или другим уполномоченным лицом.

### 2. Коррекция погрешностей прибора

- a. Найдите указанную пиковую высоту, зарегистрированную в 1a. Убедитесь, что значение находится в пределах утверждённого для прибора диапазона.
- b. Калибровочная таблица или диаграмма (1c) покажет коррекцию для указанной высоты. Убедитесь, что калибровка была проведена в соответствии со сроками из Спортивного кодекса (правил пока нет, но она должна быть сделана в течение одного года до попытки или одного месяца после. В редакции 1995 года). Убедитесь, что калибровка действительна для фактически используемого прибора.
- c. Найдите в калибровочной таблице коррекцию для пиковой зарегистрированной высоты.
- d. Примените коррекцию из калибровочной таблицы.

$$H_{cal} = H_i + h \quad \text{Формула 3}$$

$H_{cal}$  – откалиброванная высота

$H_i$  – приборная высота

$h$  – коррекция погрешностей прибора

### 3. Поправка на QNH, отличающееся от ICAO STD

- a. Из (1b и 1d) найдите QNH для места и времени пиковой зарегистрированной высоты. Иногда требуется интерполяция между двумя или более значениями, поскольку может быть сложно найти официальное QNH для времени и места. Для высот ниже 5000 метров рекомендуется найти правильное QNH с допуском  $\pm 0,5$  гПа. Это соответствует погрешности высоты 4 метра. Для больших высот достаточен допуск  $\pm 1,0$  гПа.
- b. Для QNH выше 1013,25 поправка положительная.  
Для QNH ниже 1013,25 поправка отрицательная.

Средний градиент давления меняется с высотой. Нас интересует градиент давления вблизи поверхности 1013,25 гПа. Для QNH между 1035 и 1013,25 градиент давления составляет 0,121 гПа/метр. Для QNH между 1013,25 и 990 градиент давления составляет 0,118 гПа/метр.

- c. Для QNH выше 1013,25 скорректированная высота составляет

$$H_c = H_{cal} + (QNH - 1013,25) / 0,121 \quad \text{Формула 4a}$$

Для QNH ниже 1013,25 скорректированная высота составляет

$$H_c = H_{cal} + (QNH - 1013,25) / 0,119 \quad \text{Формула 4b}$$

$H_c$  – приборная высота, скорректированная с учётом погрешностей прибора и давления

$H_{cal}$  – откалиброванная высота из пункта 2

QNH – фактическое давление у поверхности в гПа

#### 4. Поправка по температуре

- a. Рассчитайте  $T_{ms}$  – среднюю абсолютную температуру в атмосфере ICAO STD. Для высот ниже 11000 метров это просто температура ICAO STD на половине высоты плюс 273,15, что составляет 0°C, преобразованных в °K. Используйте следующие простые формулы:

$$T_{ms} = 288,15 - H_c/2000 \times 6,5 \quad \text{Формула 5a}$$

(Для пиковой высоты ниже 11000 м)

$$T_{ms} = (11000 \times 252,4 + (H_c - 11000) \times 216,65) / H_c \quad \text{Формула 5b}$$

(Для пиковой высоты выше 11000 м)

$T_{ms}$  – близкая средняя абсолютная температура в ICAO STD

$H_c$  – скорректированная пиковая высота

216,65 – абсолютная температура на высоте 11 000 метров в ICAO STD

252,4 – средняя абсолютная температура ниже 11000 метров в ICAO STD

288,15 – абсолютная температура на уровне моря в ICAO STD

6,5 – вертикальный градиент температуры на 1000 метров в ICAO STD до 11 000 метров

- b. Теперь вычислите разницу температур между ICAO STD и в фактической атмосфере и вставьте значение в Формулу 2.

**Пример:** средняя разница температур составляет -10°. Пиковая высота, скорректированная с учётом погрешностей прибора и разницы давления, составила 8000 м.

Формулу 2 можно записать так:  $H = H_c \times f_T$

Поправочный коэффициент  $f_T = 1 + \text{Среднее } (T_a - T_s) / T_{ms}$

Абсолютная температура на половине верхней высоты в стандартной атмосфере составляет 262,15°K.

(Формула 5a).

Поэтому в этом случае  $f_T = 1 - 10/262,15 = 0,9619$

и  $H = 8000 \times 0,9619 = 7\,695$

Это почти 4%-ное уменьшение при атмосфере, на 10° холоднее, чем ICAO STD, является близким правилом для профессионального пилота. Его высотомер показывает в таких обстоятельствах на 4% больше, и он вносит соответствующую поправку в свои высоты захода на посадку.

Если мы хотим, чтобы расчёт был мучительно правильным, теперь мы вставляем полученную высоту – 7 695 метров – в Формулу 5a и делаем всё заново. Причина в том, что для получения средней температуры в ICAO STD мы использовали нескорректированную высоту. Это, конечно, не совсем правильно. Если мы сделаем расчёт снова, мы получим немного другой  $f_T$ . Полученная скорректированная высота в этом случае будет 7 696 метров. Разница в один метр и небольшая ошибка по сравнению с общим допуском. Вряд ли стоит усилий. Фактически, мы опять должны для нахождения

средней температуры в фактической атмосфере использовать новую высоту, и мы можем вернуться к 7 695 метрам.

Для больших высот достаточно оценить разницу в средней температуре в пределах 1°К. Результирующая погрешность будет менее 0,4%. Влияние на общую ошибку будет показано позже.

Однако можно рассмотреть две другие поправки.

Если температурная диаграмма для фактической атмосферы показывает сильную инверсию на низком уровне, а пиковая высота была достигнута в то время, когда слой инверсии исчез, то этот слой инверсии следует игнорировать при расчёте средней фактической температуры.

Если QNH был получен со станции на большой высоте, и пиковая высота также была достигнута над высокой местностью, разница температур должна быть рассчитана только от уровня земли до пиковой высоты, но затем разница должна быть усреднена по всему диапазону высот. Причина в том, что часть ниже уровня земли уже считается находящейся в стандартной атмосфере, как указано в определении QNH. См. главу А.5.

**Пример:** QNH получено со станции на высоте 3000 метров. Пиковая высота составляет 10000 метров. Средняя разница температур от 3000 до 10000 метров на 10° ниже ICAO STD.

Тогда средняя разница составляет:  $10 \times (10\,000 - 3000) / 10\,000 = 7$

Разница в коэффициенте уменьшения  $f_T$  составит:

0,9609 для 10°, что приводит к исправленной высоте 9609 метров?

но 0,9726 для 7°, что приводит к 9726 метрам.

Значительная разница.

## **С. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ**

Общая погрешность состоит из нескольких частей. Некоторые погрешности постоянны во всем диапазоне высот, а некоторые составляют процент от пиковой высоты. Вероятная общая погрешность это квадратный корень из суммы квадратов погрешностей частей. Давайте рассмотрим части по порядку.

### **1. Погрешность показаний и системная погрешность. (dR)**

Показания барограммы можно принять только с точностью до 10 метров и только с помощью увеличительного стекла. В противном случае погрешность составит около 25 метров. Показания высотомера обычно можно принимать с точностью до 10 метров.

Если пиковая высота регистрируется с радиолокационного транспондера, показания имеют допуск обычно в 100 футов, поскольку транспондер выдаёт только 100-футовые регистрации.

Если используется электронный барограф, точность обычно указана в руководстве производителя и обычно составляет 10–15 метров по всему диапазону барографа.

### **2. Погрешность калибровки. (dC)**

Если коррекция калибровки выводится из барограммы, то она подвержена той же погрешности, что и при считывании любой барограммы. Эта часть погрешности постоянна. Остальная часть погрешности зависит от формы кривой коррекции. Если применяемая коррекция выводится путём интерполяции между двумя показаниями, может возникнуть дополнительная погрешность. Мы предполагаем, что калибровочное оборудование правильное.

Если используется электронный барограф, коррекция может и не быть гладкой кривой. Возможно, будет необходимо применить максимальную погрешность как постоянную погрешность во всем диапазоне измерений.

### **3. Погрешность давления, используемого для расчёта. (dP)**

Должна быть возможность получить QNH в пределах 1 гПа. Для рекордов в меньших категориях, когда пиковая высота составляет всего несколько тысяч метров, должна быть возможность получить QNH в пределах ½ гПа. Это необходимо, так как полёты в этих категориях обычно короткие, а неопределённость во времени и/или положении незначительна. Ошибка в 1 гПа эквивалентна 8 метрам.

### **4. Погрешность в фактической средней температуре (dT)**

Это, вероятно, самый большой источник погрешности, но обычно можно оценить среднее отклонение от ICAO STD в пределах 1°K.

Погрешность в один градус приводит к ошибке в 0,4% высоты.

## **5. Резюме**

### **Пример:**

Погрешность показаний (dR) составляет 25 метров

Погрешность калибровки (dC) составляет 25 метров

Погрешность давления (dP) составляет 4 метра

Погрешность температуры (dT) составляет 0,4%, а окончательная расчётная высота составляет 10 515 метров.

Общая погрешность в этом случае:

$$\sqrt{(25^2 + 25^2 + 4^2 + 42^2)} = 55$$

Результирующая высота в этом случае составит  $10\,515 \pm 55$

Эта ошибка составляет около 0,5% и вполне в пределах 1%, указанного в Спортивном кодексе, Раздел 1, пункт 4.5.5 (в редакции 1995 года).

Если результирующая погрешность превышает 1%, мы должны попытаться лучше оценить отдельные погрешности, а затем устранить некоторые погрешности, используя более качественные данные. Если это не сделает общую погрешность ниже 1%, мы должны будем произвести наилучший возможный расчёт, а затем уменьшить заявленную высоту на предел погрешности в соответствии со Спортивным кодексом, Раздел 1, пункт 4.5.5 (в редакции 1995 года).

## **D. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЕРЕВОДА**

В этом докладе использовались метрические единицы. Если будут использоваться другие единицы, перед применением формул в этом докладе следует учесть следующие коэффициенты пересчёта.

Футы в метры: умножить на 0,3048

Один фут равен 0,3048 метра

Дюймы ртутного столба в hPa: умножить на 33,86388 (33,8653)

29,92 соответствует 1013,25

°Фаренгейта в °Цельсия: уменьшить на 32, умножить на 5, разделить на 9  
 $32^{\circ}\text{F} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{F} = -40^{\circ}\text{C}$ .

°Фаренгейта в Кельвины: преобразовать в °Цельсия и добавить 273,15

Hans Åkerstedt

Июнь 1995 г.

Изменения по сравнению с 1-м изданием от февраля 1993 г.

Среднее заменено на среднее

ISA определено до 20 000 метров

$(T_{ma} - T_{ms})$  заменено на Среднее  $(T_a - T_s)$

Коэффициент преобразования дюймов ртутного столба в hPa изменен

Темы для будущих дополнений к докладу

Влияние влажности

Геопотенциальная высота против геометрической

Расчёт напрямую из таблицы зонда