

Семинар «Повышение безопасности полетов ВС путем использования современных методов и средств навигации»
Санкт-Петербург, 25-26 апреля 2007 г.

Повышение точности измерения высоты при заходе на посадку с вертикальным наведением

Сарайский Ю.Н.

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации



PANS OPS

Схема захода на посадку с вертикальным наведением (APV). Схема захода на посадку по приборам с использованием бокового и вертикального наведения, но не отвечающая требованиям, установленным для точных заходов на посадку и посадок.



APV / Baro-VNAV

Заход на посадку методом зональной навигации с вертикальным наведением, обеспечиваемым расчетным путем на основе информации от барометрического высотомера



PANS OPS

Барометрическая вертикальная навигация (баро-VNAV) представляет собой навигационную систему, которая выдает пилоту **вычисленное** вертикальное наведение относительно определенного угла траектории в вертикальной плоскости (VPA), номинальное значение которого составляет 3° . Обеспечиваемое с помощью ЭВМ **вертикальное наведение основывается на барометрической высоте** и определяется в виде угла траектории в вертикальной плоскости от RDH.



IATA. Technical Operations Policy Manual. Part B.

IATA поддерживает применение процедур захода на посадку RNAV APV/ Baro-VNAV. Они должны выполняться в соответствии с PANS OPS.

APV повышает безопасность и эффективность в аэропортах с недостаточным обеспечением наземными средствами и на ВПП, обеспечивающие только неточный заход.

APV – экономичный и эффективный путь снижения риска CFIT. Он дает возможность стандартизовать и упростить построение и выполнение процедур захода.



IATA. Technical Operations Policy Manual. Part B.

Процедуры APV/ Baro-VNAV также могут использоваться в качестве резервных при отказе систем точного захода на посадку.

Большинство современных ВС имеет бортовое оборудование, способное поддерживать APV/ Baro-VNAV.

Желательно уйти от практики полагаться на наземные средства, если есть возможность использовать GNSS.

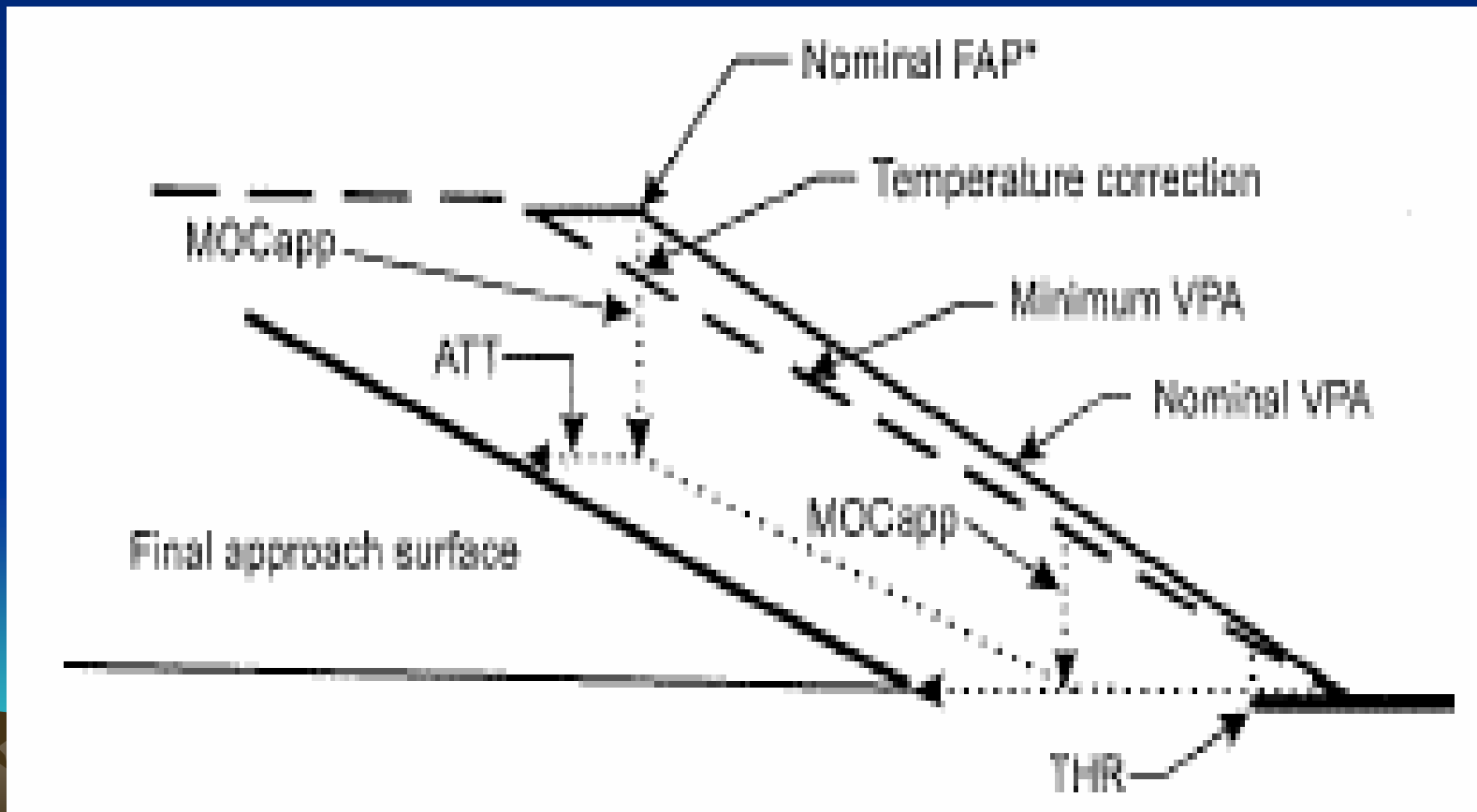


Основная проблема APV – температурная погрешность барометрического высотомера.

При температуре ниже стандартной ВС летит ниже, чем показывает высотомер.



На конечном этапе захода на посадку низкие температуры учитываются **при построении процедуры** путем корректировки установленного угла наклона траектории в расчете на среднюю (за последние 5 лет) из минимальных температур на аэродроме в самом холодном месяце года.



На остальных этапах захода (начальный, промежуточный, уход на второй круг) **ответственность за поправки** на низкую температуру ко всем опубликованным высотам **несет пилот**.



PANS OPS, том I, разд.4

Большинством существующих систем VNAV поправка на нестандартные температуры не вводится.

При температурах ниже стандартных погрешности могут оказаться значительными и возрастать по абсолютной величине по мере увеличения абсолютной высоты над станцией.



PANS OPS

Схемы RNAV/баро-VNAV не разрешается использовать в том случае, когда температура на аэродроме ниже опубликованной минимальной температуры для конкретной схемы, если система управления полетом (FMC) не имеет для конечного этапа захода на посадку утвержденной компенсации низких температур. При наличии такой функции минимальную температуру можно не учитывать при том условии, что она находится в пределах минимальной сертифицированной температуры для оборудования. Ниже этой температуры и применительно к воздушным судам, не имеющим систем управления полетом, с утвержденной для конечного этапа захода на посадку компенсацией низких температур, может по-прежнему использоваться схема LNAV при условии, что:

- a) для захода на посадку опубликованы обычная неточная схема с применением RNAV и OCA/H APV/LNAV; и
- b) пилотом применяется соответствующая поправка к высотомеру на низкую температуру ко всем опубликованным минимальным абсолютным/относительным высотам.



При разработке отечественного бортового оборудования для АРВ целесообразно предусмотреть компенсацию температурной погрешности.



Учет температурной поправки
необходим не только при APV, но и во
всех случаях, когда требуется
обеспечить установленный запас
высоты над препятствиями или
выдержать заданный профиль полета



PANS OPS, том I, ч.3, разд.1, гл.4

4.1.2 Ответственность эксплуатанта

Эксплуатант несет ответственность за установление минимальных абсолютных высот полета, которые не могут быть меньше тех, которые установлены государствами, над территорией которых выполняется полет (п. 4.2.6 Приложения 6). Эксплуатант несет ответственность за указание метода определения этих минимальных абсолютных высот (п. 4.2.6 Приложения 6). В соответствии с рекомендацией в Приложении 6 этот метод должен утверждаться государством эксплуатанта, при этом Приложением 6 также рекомендуются подлежащие учету факторы.

4.1.4 Управление воздушным движением (УВД)

Если при получении воздушным судном разрешения органа УВД занять абсолютную высоту полета, которая сочтена командиром воздушного судна неприемлемой вследствие низкой температуры, командир воздушного судна должен запросить большую абсолютную высоту. Если такой запрос не будет получен, орган УВД будет считать, что разрешение принято и будет соблюдаться. См. Приложение 2 и главу 6 PANS-ATM (Doc 4444).

4.1.5 Полеты вне контролируемого воздушного пространства

4.1.5.1 При полетах по ППП за пределами контролируемого воздушного пространства, включая полеты, выполняемые ниже нижней границы контролируемого воздушного пространства, определение наиболее низкого приемлемого эшелона полета является обязанностью командира воздушного судна. Учитываются текущие или прогнозируемые значения QNH и температуры.



Россия

«Руководство по построению аэродромных схем и определению безопасных высот пролета препятствий» (1994)

1.8. Правила учета температуры и давления

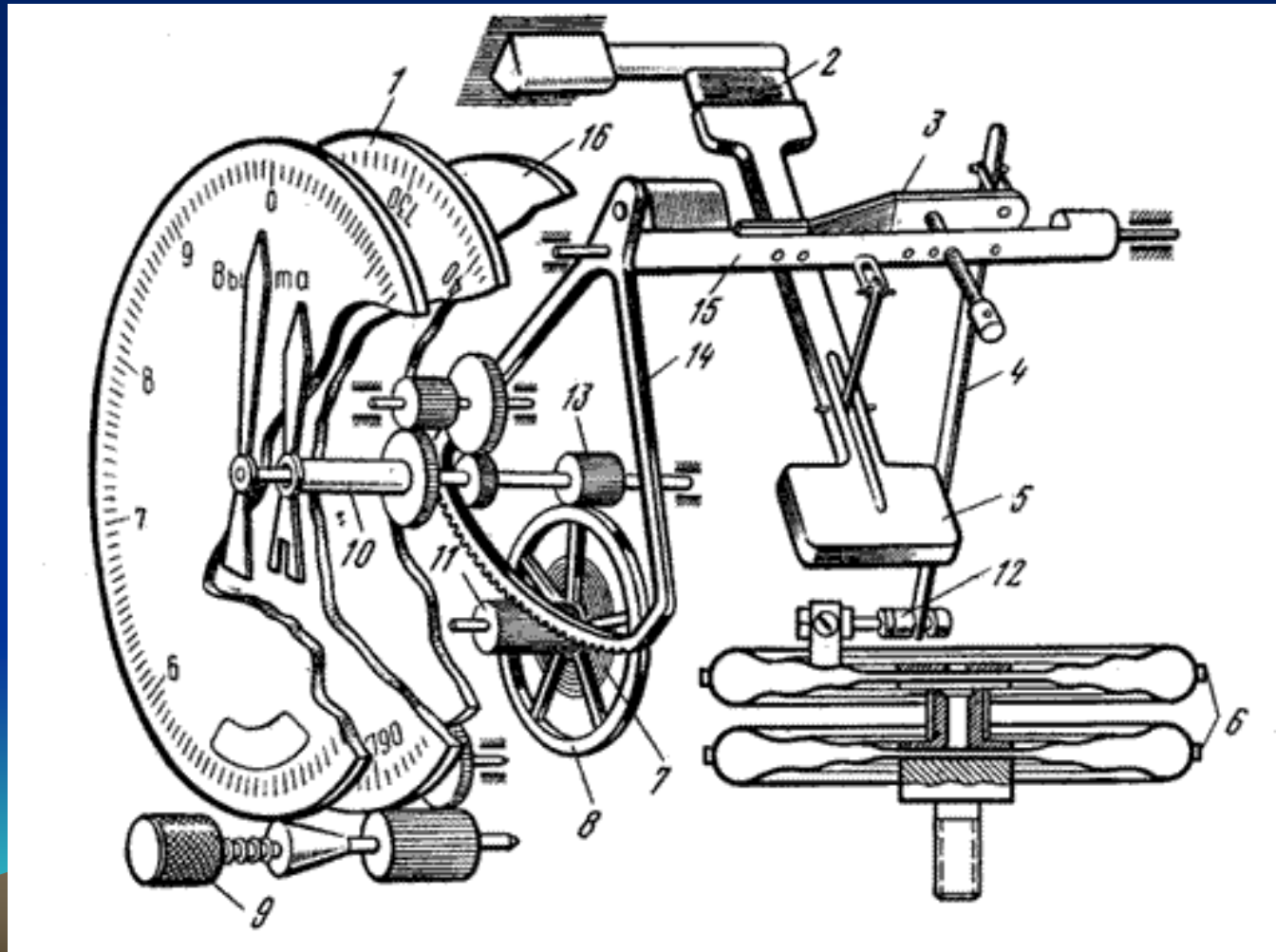
Расчет высот маневрирования и безопасных высот основывается на температуре и давлении, соответствующим ISA, кроме тех случаев, когда это особо оговорено. Предполагается, что экипаж вводит поправку в показания баровысотомеров на температуру воздуха на аэродроме.



Как рассчитать и учесть
температурную поправку?



Для правильного применения барометрического
высотомера не обязательно знать устройство его
механизма



Барометрический высотомер –
механизированная таблица стандартной
атмосферы.

Однозначная связь входа и выхода.

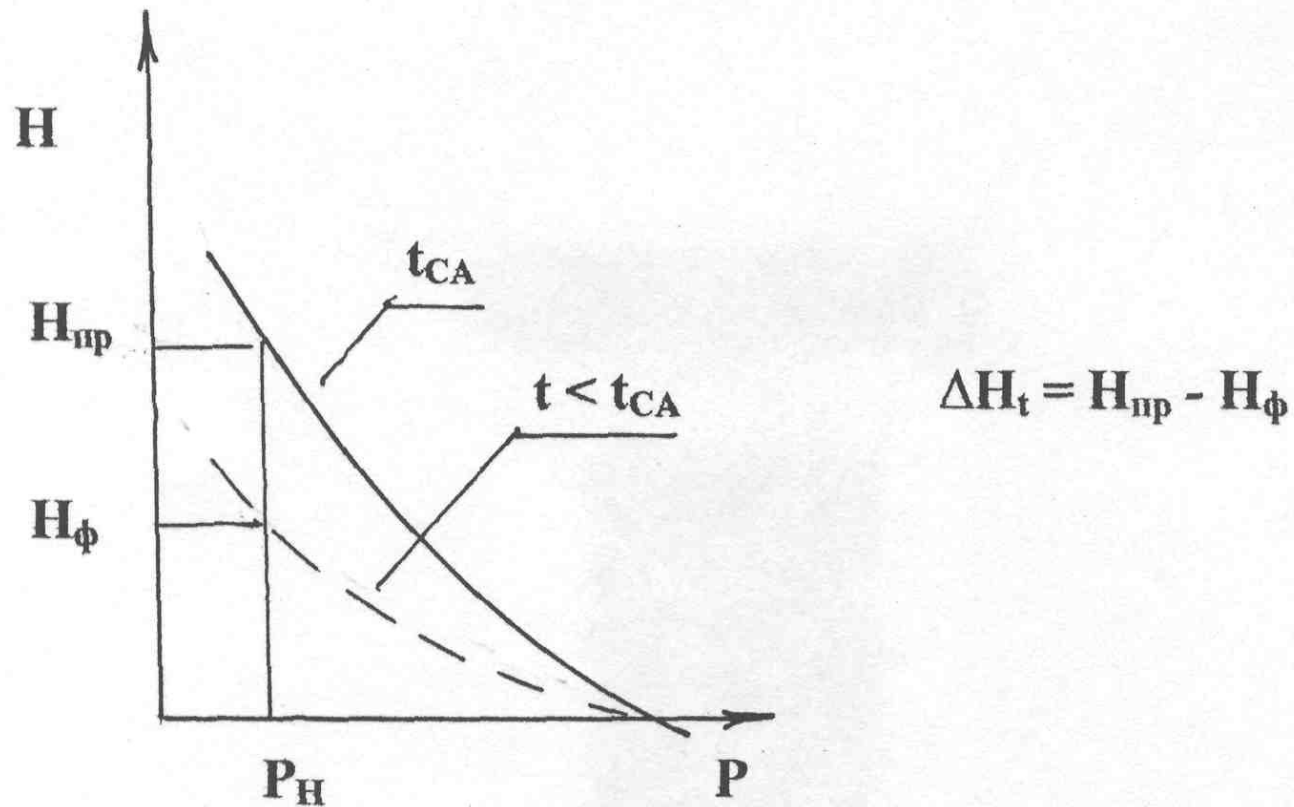
На входе – давление на высоте, измеряемое
анероидной коробкой.

На выходе – приборная высота,
соответствующая этому давлению в СА.

Установка давления просто сдвигает шкалу
высот.



Связь давления и высоты



ΔH_t - методическая температурная погрешность барометрического высотомера

Связь давления и высоты

$$\int_{P_0}^{P_H} \frac{dP}{P} = - \int_0^H \frac{gdH}{RT} + C,$$

T - является функцией высоты.

В предположении постоянного температурного градиента

$$T = T_0 - \gamma H,$$

$$P_H = P_0 \left(1 - \frac{\gamma H}{T_0}\right)^{\frac{1}{k}};$$

$$H = \frac{T_0}{\gamma} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0}\right)^k\right];$$

$$k = \frac{\gamma R}{g}.$$

- Температурная погрешность зависит не от температуры у земли или на высоте, а от кривой распределения температуры в слое воздуха между этими уровнями.
- Поскольку это распределение неизвестно, рассчитать поправку невозможно. Можно говорить лишь об учете ее среднего значения (систематической погрешности)



Температурная погрешность при постоянном градиенте температуры

$$\Delta H_t = H_{np} - H_{отн} = H_{np} - (H - H_{aэр}),$$

$$H_{np} = a_0 (P_{уст}^{k_0} - P_H^{k_0});$$

$$a_0 = T_0 (\gamma_0 P_0^{k_0})^{-1};$$

$$k_0 = \frac{\gamma_0 R}{g};$$

Простая формула связи фактической (H_f) и приборной ($H_{пр}$) высот может быть получена из формулы Лапласа:

$$H = R T_{ср} \ln \frac{P_0}{P_H}$$

$$\frac{H_{пр}}{H_f} = \frac{T_{ср.сА}}{T_{ср.ф}}$$

$$\Delta H_t = H_f - H_{пр} = \frac{T_{ср.ф} - T_{ср.сА}}{T_{ср.ф}} H_f$$

$$\Delta H_t = \frac{t_0 - 15}{T_{ср.ф}} H_f$$

$T_{ср сА}$ – средняя абсолютная температура слоя воздуха в сА

$T_{ср ф}$ – фактическая средняя абсолютная температура слоя воздуха

По вышеприведенной формуле может рассчитываться температурная поправка при заходе APV.

Для расчета средней температуры слоя воздуха должна *измеряться* температура на высоте и *вводиться* в систему температура на аэродроме.



Более удобная и точная формула

$$H_{пр} = \frac{T_{ср.са}}{T_{ср.ф}} H_{ф} = \frac{273 + 15 - \Delta t}{273 + t_0 - \Delta t} H_{ф}$$

$$\Delta t = 0,5 \cdot 0,0065 H_{ф} ; \text{ при } H_{ф} \approx 1000 \text{ м}$$

$$H_{пр} = \frac{285}{270 + t_0} H_{ф}$$

НПП ГА-85

H_t - методическая температурная поправка высотомера, определяемая по среднегодовой температуре на аэродроме по многолетним наблюдениям с помощью навигационной линейки, м, или по формуле:

$$\Delta H_t = \frac{t_0 - 15}{300} H_{испр}$$

(Каждые 3 градуса отклонения температуры от стандартной дают температурную поправку в 1% от высоты)

$$\Delta H_t = \frac{t_0 - 15}{T_{срф}} H_{ф}$$

История температурной поправки в PANS OPS



PANS OPS, v.I

Вариант таблицы до 1998 г

Каждые 10 градусов отклонения температуры от стандартной дают температурную поправку в 4% от высоты

Таблица III-3-2. Величины, добавляемые пилотом к опубликованным значениям абсолютной высоты (метры)

Температура на аэродроме, °C	Относительная высота над уровнем установки высотомера (метры)													
	60	90	120	150	180	210	240	270	300	450	600	900	1 200	1 500
0	0	6	6	6	12	12	12	12	12	18	24	40	54	67
-10	6	6	12	12	12	18	24	24	24	36	48	79	103	128
-20	6	12	12	18	24	24	30	36	36	54	72	115	150	189
-30	12	12	18	24	30	36	40	40	48	72	97	150	201	250
-40	12	18	24	30	36	40	48	54	60	90	122	189	250	311
-50	12	24	30	36	40	54	60	67	72	110	146	225	299	372

Примечание. Данная таблица основана на превышении аэродрома, равном 600 м; однако ею можно пользоваться при производстве полетов на любом аэродроме.

Вариант таблицы, предложенный Академией ГА (введен поправкой №10 от 5.11.1998)

Таблица III-3-2. Величины, добавляемые пилотом к опубликованным значениям абсолютной высоты (метры)

Температура на аэродроме С°	Относительная высота над уровнем установки высотомера (метры)													
	60	90	120	150	180	210	240	270	300	450	600	900	1200	1500
0	0	5	5	5	5	10	10	10	10	20	25	35	50	60
-10	5	5	10	10	15	15	20	20	25	35	50	70	95	120
-20	5	10	15	20	20	25	30	35	35	55	75	110	150	185
-30	10	15	20	25	30	35	40	45	50	75	100	155	205	255
-40	15	20	25	35	40	45	50	60	65	100	130	200	265	335
-50	15	25	35	40	50	55	65	75	80	125	165	250	330	415

Примечание. Таблица основана на превышении аэродрома 600 м, однако ею можно пользоваться при производстве полетов на любом аэродроме.

Действующий вариант таблицы (введен поправкой №11 от 1.11.2001)

Таблица П-1-4-1 а). Значения, которые должен добавить пилот к минимальным опубликованным относительным/абсолютным высотам (м)

Температура на аэродроме (°С)	Высота над превышением места установки высотомера (метры)													
	60	90	120	150	180	210	240	270	300	450	600	900	1 200	1 500
0	5	5	10	10	10	15	15	15	20	25	35	50	70	85
-10	10	10	15	15	25	20	25	30	30	45	60	90	120	150
-20	10	15	20	25	25	30	35	40	45	65	85	130	170	215
-30	15	20	25	30	35	40	45	55	60	85	115	170	230	285
-40	15	25	30	40	45	50	60	65	75	110	145	220	290	365
-50	20	30	40	45	55	65	75	80	90	135	180	270	360	450

PANS OPS о точном расчете поправки

1.3.1 Для расчета поправок для превышения конкретных аэродромов, места установки высотомера над уровнем моря или для отсутствующих в таблицах значений используется уравнение 24 (Engineering Science Data Unit Publication, (ESDU) Performance, Volume 2, Item Number 77022)¹. Это уравнение предполагает **использование близкой к стандартной** атмосферы.

$$\Delta h_{CORRECTION} = \Delta h_{PAirplane} - \Delta h_{GAirplane} = (-\Delta T_{std}/L_o) \ln[1 + L_o \Delta h_{PAirplane} / (T_o + L_o \cdot h_{PAerodrome})],$$

где: $\Delta h_{PAirplane}$ – относительная высота воздушного судна над аэродромом (по давлению);

$\Delta h_{GAirplane}$ – относительная высота воздушного судна над аэродромом (геопотенциальная);

ΔT_{std} - отклонение температуры от температуры стандартного дня (МСА);

L_o – стандартный вертикальный градиент температуры **в зависимости от барометрической** абсолютной высоты в первом слое (уровень моря – тропопауза) МСА;

T_o - стандартная температура на уровне моря.

1.3.2 Приведенное выше уравнение не может быть решено непосредственно в величинах $\Delta h_{GAirplane}$ и **требуется решение методом итерации**. Решение может быть получено с помощью простой программы расчета или электронных таблиц.

Все варианты таблиц PANS OPS
основаны на стандартном постоянном
градиенте температуры – 6,5 градуса на
километр высоты

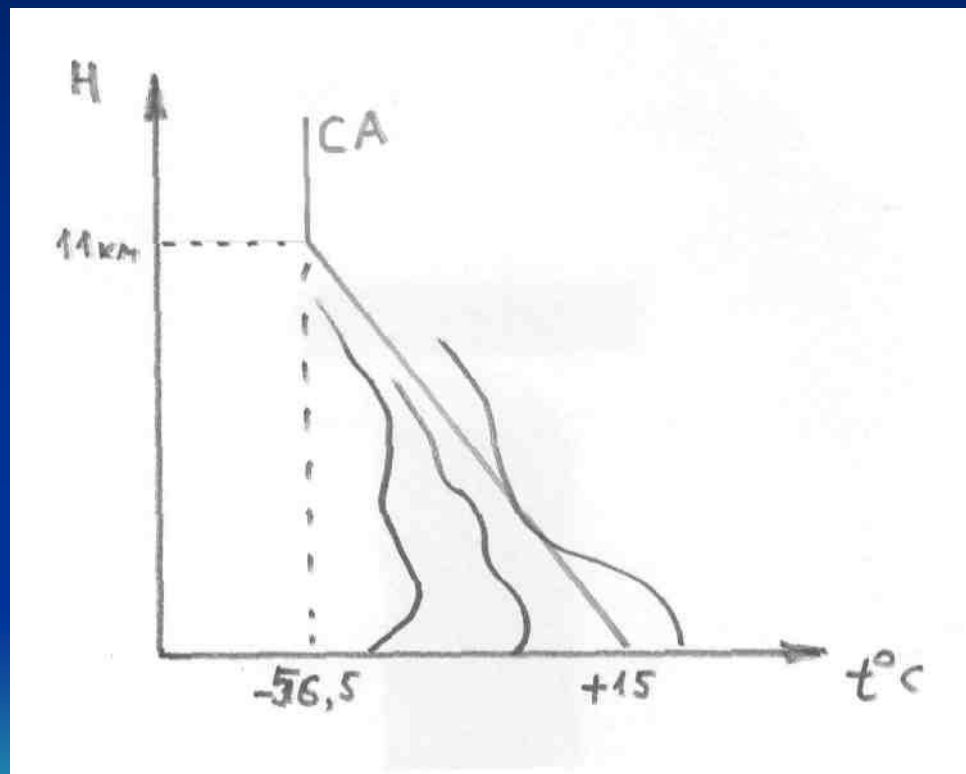


Вертикальные градиенты температуры

Пинус Н.З., Шметер С.М. Аэрология. Гидрометеиздат, Л., 1965

Высота, км	Широта (северная)		
	0-30°	30-60°	60-90°
0-2	5,4—5,9	3,8—4,2	-1,0— (-1,1)
2-5	5,3—6,1	4,8—6,0	4,6—5,6
5—8	5,8—6,5	6,5—6,9	6,1—6,3
8—11	6,7—7,8	4,2—7,2	0,1—3,5

Изменение температуры с высотой



Источники данных для расчета градиентов

Пункты:

Тикси, Архангельск, Ханты-Мансийск, Жиганск, Якутск, Киренск, Иркутск, Чита, Охотск, Хабаровск, Красноярск, Ленинград, Ном, Фэрбенкс, Те-Пас, Порт Гаррисон, Черчилл, Бейкер Лейк, Резольют, Юрика, Анкоридж

Данные:

Многолетние средние месячные значения температуры и геопотенциала (высоты) изобарических поверхностей 700 и 850 мб, а также у земли для месяцев года со среднемесячной температурой ниже нуля.

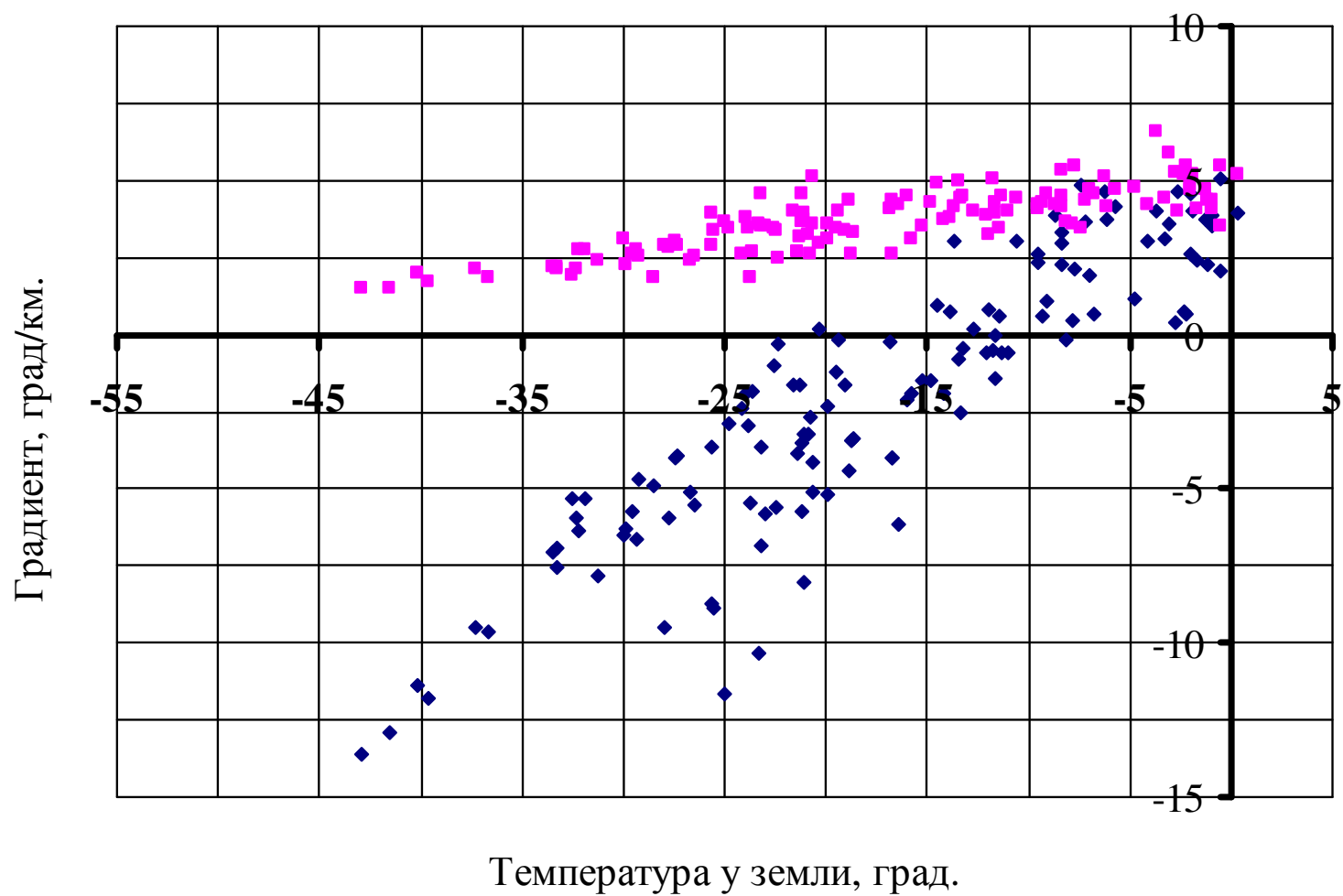
Источник:

Атлас климатических характеристик температуры, плотности и давления воздуха, ветра и геопотенциала в тропосфере и нижней атмосфере Северного полушария.

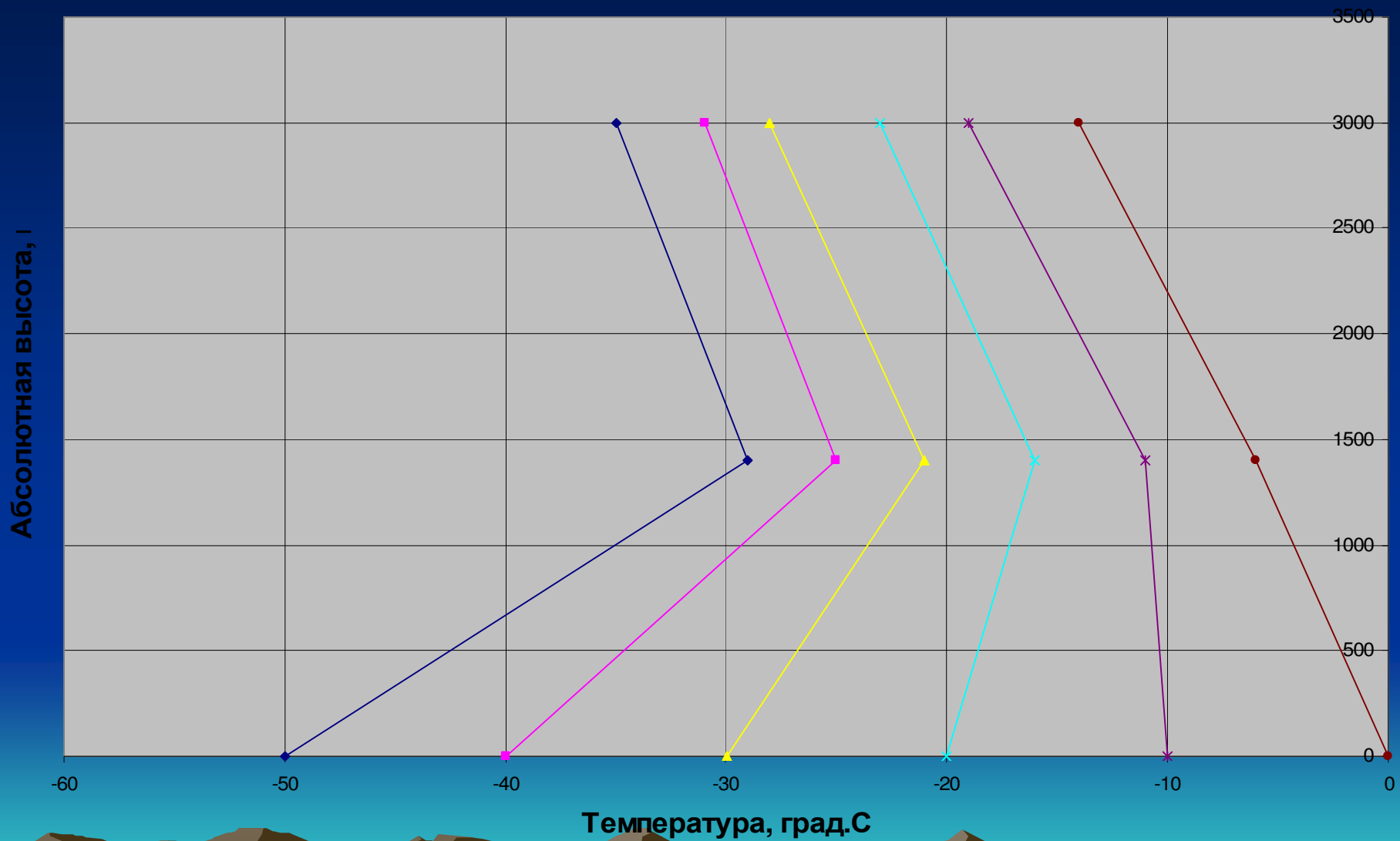
Гидрометеоиздат, М., 1975.



Зависимость вертикальных градиентов температуры от температуры на аэродроме



Модель изменения температуры с высотой



Температура, град.С

Абсолютная высота, м

Температурные поправки с учетом зависимости градиентов от температуры на аэродроме

Относительная высота пролета контрольной точки Н (метры)										
	100	200	300	400	600	800	900	1200	1500	2100
Превышение аэродрома 0 метров, давление 760 мм.рт.ст.										
0	6	11	16	21	31	41	46	59	72	96
-10	10	19	18	36	53	68	76	97	116	151
-20	14	27	40	52	76	97	108	136	161	208
-30	18	36	53	69	100	128	141	177	208	266
-40	23	46	67	87	126	161	177	221	258	326
-50	29	56	82	107	153	196	215	266	309	388
Превышение аэродрома 1000 метров, давление 674 мм.рт.ст.										
0	3	6	9	12	17	22	25	32	38	50
-10	7	24	20	26	38	50	56	72	89	120
-20	11	22	32	42	61	79	89	116	142	193
-30	16	31	45	58	85	111	124	162	199	271
-40	21	40	59	76	111	144	161	210	259	352
-50	26	50	73	95	138	180	201	262	322	438

Выводы

1. **Точный учет** температурной погрешности **невозможен**, поскольку неизвестно фактическое распределение температуры от земли до высоты полета.

Поэтому необходимо возможно более точно **учитывать систематическую составляющую** погрешности (ее среднее значение). Отклонение от нее компенсируется установленным запасом высоты над препятствием.



Выводы

2. При заходе на посадку с вертикальным наведением (APV/Baro-VNAV) температурная погрешность с достаточной точностью может быть учтена алгоритмами работы бортовой аппаратуры на основе расчета средней температуры слоя воздуха.

Для этого необходимо, помимо измерения температуры на высоте, обеспечить ввод как давления, так и температуры на аэродроме.



Выводы

3. Предлагаемые ИКАО методы расчета и таблицы температурных поправок основаны на стандартном значении вертикального градиента температуры. При низких температурах это допущение не соответствует действительности и приводит к завышению поправок, что, хотя и снижает риск столкновения с препятствиями, но приводит к неточному выдерживанию заданного профиля полета.



Выводы

4. Для более точного учета систематической составляющей температурной поправки можно использовать таблицы, основанные на обработке статистических данных о зависимости градиентов от температуры на аэродроме.



Выводы

5. В практике полетов при расчете безопасных высот (до 4000 м) для учета температурной поправки при любых температурах можно использовать формулу

$$H_{\text{пр}} = H_{\text{ф}} * 285 / (270 + t_0),$$

основанную на стандартном градиенте и соответствующую расчету на НЛ-10.



Спасибо за внимание!

