

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ДАННЫХ АЗН-В С КОРРЕКЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА НА МЕСТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ (ЧАСТЬ 2)

*Андрей Сергеевич Калининцев,
orcid.org/0000-0002-2578-2892,
ФГУП «Государственный научно-исследовательский
институт гражданской авиации» (ГосНИИ ГА),
ул. Михалковская, д. 67, корпус 1
Москва, 125438, Россия
kas4job@gmail.com*

Аннотация. В первой части статьи была предложена модифицированная методика подтверждения данных АЗН-В, которая оценивает и сравнивает высоты полета воздушного судна: барометрическую (получаемую от барометрического высотомера) и геометрическую (получаемую от приемника ГНСС). В представленной работе выполнено моделирование применения модифицированной методики подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В. При моделировании были использованы реальные данные, полученные от наземной станции АЗН-В, расположенной на аэродроме Мезень. Используются реальные значения давления и температуры. Модифицированная методика учитывает значения показателей качества данных АЗН-В. Для одного полета МВЛ было показано превышение допустимого интервала (данные ГНСС, согласно методике, не подтверждены). Полученный результат согласуется с параметром геометрической вертикальной точности GVA. Для верификации модифицированной методики определения температуры по данным геометрической и барометрической высот, полученные данные температуры сравниваются со значениями модели прогнозирования ECMWF. Среднее значение RMSE для 11 рейсов составило 1,58 °С. Для ВС, набирающих высоту, максимальное значение RMSE составило 1,93 °С, для ВС, выполняющих посадку, максимальное RMSE = 2,7 °С.

Ключевые слова: безопасность полетов, АЗН-В, модель, местные воздушные линии, барометрическая высота, геометрическая высота, TAS, IAS.

SIMULATION OF ADS-B DATA CONFIRMATION WITH TEMPERATURE CORRECTION WHEN ESTIMATING FLIGHT ALTITUDE ON LOCAL AIR LINES (PART 2)

*Andrey S. Kalintsev,
orcid.org/0000-0002-2578-2892,
The State Scientific Research Institute
of Civil Aviation (GosNII GA),
Mikhalkovskaya str. 67, bld. 1
Moscow, 125438, Russia
kas4job@gmail.com*

Abstract. In the first part of the article, the author proposed a modified method for confirming the ADS-B data, which estimates and compares the aircraft flight altitude: barometric altitude (received from a barometric pressure altimeter) and geometric altitude (received from a GNSS receiver). In the presented work, application of the modified technique for confirming the ADS-B geometric altitude data is simulated. When simulating, real data were used which were received from the ADS-B ground station located at the Mezen aerodrome. Real values of pressure

and temperature were used. The methodology takes into account the values of quality indicators of ADS-B data. For one flight on local airlines, an excess of the permissible interval was shown (GNSS data, according to the methodology, are not confirmed). The result obtained is consistent with the geometric vertical accuracy parameter GVA. To verify the modified method of the temperature determination according to geometric and barometric altitude, the obtained temperature data are compared with the values of the ECMWF forecasting model. The average RMSE value for 11 flights was 1.58 °C. For climbing aircraft the maximum RMSE value was 1.93 °C, for landing aircraft, maximum RMSE = 2.7°C.

Key words: flight safety, ADS-B, model, local airlines, barometric altitude, geometric altitude, TAS, IAS.

Введение

В соответствии с Транспортной стратегией РФ до 2030 года³⁸, критический износ аэродромной инфраструктуры является одним из ключевых вызовов транспортного комплекса. Стратегия³⁸ предполагает необходимость модернизации инфраструктуры аэродромов гражданской авиации. Очевидно, что в рамках реализации стратегии³⁸ в части модернизации авиационной инфраструктуры следует использовать экономически эффективные технологии и оборудование.

Наземная станция АЗН-В может заменить собой вторичный радиолокатор (ВРЛ), а ее стоимость будет в 5-7 раз ниже [Калинцев и др., 2021]. Однако повсеместному внедрению АЗН-В препятствует тот факт, что координаты ВС могут быть определены бортовыми системами с большой погрешностью, при этом оценить величину погрешности на земле практически невозможно. Для решения этой задачи Международная организация гражданской авиации (ИКАО) рекомендует подтверждать данные АЗН-В с помощью дорогостоящих вторичных радиолокаторов (ВРЛ) и многопозиционных систем наблюдения (МПСН)³⁹, что сводит на нет всю предполагаемую экономическую выгоду. Отсюда следует, что крайне актуальной становится задача разработки альтернативных методов подтверждения данных АЗН-В.

В работах [Калинцев и др., 2021; Плясовских и др., 2020; Плясовских и др., 2019] предложены методики подтверждения данных в горизонтальной плоскости. В основе приведенных методик лежат алгоритмические методы подтверждения данных. В работе [Подтверждение достоверности..., 2023] предложена методика подтверждения данных АЗН-В в вертикальной плоскости. В методике [Подтверждение достоверности..., 2023] используются метеопараметры реальной атмосферы и прогнозные значения температуры на высотах, получаемые от метеослужбы.

В первой части исследования [Калинцев., 2023] была представлена модифицированная методика подтверждения данных АЗН-В, учитывающая влажность воздуха, коррекцию температуры, допустимые ошибки метеопараметров, а также показатели качества АЗН-В. Целью настоящей

³⁸ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 с прогнозом на период до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р).

³⁹ Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2020. 372 p.

публикации является моделирование применения разработанной модифицированной методики. В данной работе выполнено полунатурное моделирование применения методики, проведена оценка точности получения температурных значений по данным геометрической и барометрической высот, полученных в стандартном сообщении АЗН-В.

Целью работы является моделирование применения методики подтверждения данных АЗН-В, предложенной в первой части исследования [Калинцев, 2023]. При этом необходимо решить задачи получения и обработки данных АЗН-В, метеопараметров, вычисления температуры атмосферы на высотах по данным геометрической и барометрической высот, передаваемых в стандартном сообщении АЗН-В. Выполнить сравнение полученных данных со значениями модели числовых прогнозов ECMWF.

Материалы и методы

Материалом исследования является разработанная в первой части статьи модифицированная методика [Калинцев., 2023], способы получения температуры и метеопараметров атмосферы.

При выполнении исследования были применены методы анализа и синтеза, методы теории вероятностей и математической статистики, системный анализ, математическое и полунатурное моделирование.

В работе выполнено моделирование с использованием реальных данных АЗН-В, полученных от наземной станции НС-1А, расположенной на аэродроме Мезень. Из отчетов АЗН-В была извлечена информация о местоположении ВС, выполняющих полеты МВЛ, получены значения геометрической, барометрической высот полета и показатели качества NIS_{BARO} , GVA . Для полетов МВЛ выполнен анализ показателей качества АЗН-В. Выполнено моделирование подтверждения данных ГНСС.

При моделировании были использованы фактические значения параметров атмосферы и прогнозные значения. Модель обработки данных и выполнения расчетов представлена на рисунке 1.

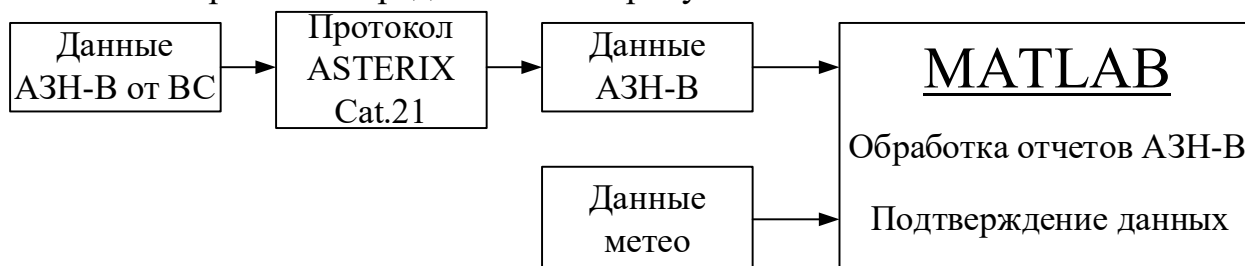


Рисунок 1 – Модель обработки данных АЗН-В

Необходимо обратить внимание, что обрабатываются данные АЗН-В, представленные в соответствии с протоколом ASTERIX⁴⁰. При моделировании не учитывалась высота перехода.

⁴⁰ EUROCONTROL Specification for Surveillance Data Exchange – ASTERIX Part 12 Category 21: ADS-B Target Reports. EUROCONTROL-SPEC-0149-12. EUROCONTROL, Brussels, 2021.

Из метеопрогнозов для площадей были взяты значения температуры для высот 1500 и 3000 м. Для определения температуры слоя H , в среде MATLAB, по прогнозным значениям ближайших слоев с известной температурой, выполнена линейная интерполяция для значений, соответствующих высоте полета по данным ГНСС. Для соответствующих площадей, по данным сайта «Расписание погоды» [Архив погоды в Архангельске..., 2023, Архив погоды в Мезени ..., 2023], были использованы архивные значения приведенного давления к уровню моря, температуры и точки росы. Температура у поверхности земли приведена к уровню MSL.

Вычисления выполняются для каждой итерации программы, при движении ВС над другой площадью (площадью с другими значениями) значения температуры соответствуют прогнозам для этой площади. Для полученных координат АЗН-В ВС вычисляется высота геоида и значения высоты ГНСС приводятся к MSL.

Методика определения максимально допустимого интервала подробно приведена в первой части исследования. Приведем основные этапы исследуемой модифицированной методики подтверждения геометрической высоты АЗН-В.

1. Находим с использованием полной формулы Лапласа (1) высоту полета ВС [Таблицы..., 1976]:

$$z_2 - z_1 = 18400 \left(1 + C_1 t_{cp}\right) \left[1 + C_2 \left(\frac{e}{P}\right)_{cp}\right] (1 + C_3 \cos 2\varphi) (1 + C_4 z_{cp}) \lg \left(\frac{P_1}{P_2}\right), \quad (1)$$

где $z_2 - z_1$ – разность высот, м;

P_1 – давление на высоте z_1 (QNH или QFF);

P_2 – давление на высоте z_2 (давление в точке полета ВС);

t_{cp} – средняя температура слоя, °C;

$\left(\frac{e}{P}\right)_{cp}$ – среднеарифметическое отношение упругости пара,

содержащегося в воздухе к атмосферному давлению;

z_{cp} – средний уровень в слое, м;

φ – широта места;

C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные ($C_1 = 0,0036 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $C_2 = 0,378$; $C_3 = 0,00264$; $C_4 = 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ м}$).

2. Полученные значения давления и температуры суммируем со значениями допустимых ошибок соответствующих метеопараметров;

3. Находим по формуле (1) значения высоты с учетом допустимых ошибок метеопараметров;

4. Для значений, полученных в пунктах 1 и 3, находим модуль разности высот (Δh_{Error});

5. Максимально допустимая ошибка параметров температуры на высоте (T_{Air_err}) определяется по следующему алгоритму:

5.1. К рассчитанным или используемым параметрам температуры на высоте добавляем нормально распределенные значения с заданной заранее, в зависимости от источника используемых данных, СКП. При этом ошибка считается нормально распределенной случайной величиной. Для температуры, полученной по данным из сообщений воздушной скорости АЗН-В, основываясь на исследованиях [de Naan et al., 2013a], СКП принята равной 4,1 °С. СКП температуры прогнозных значений принята равной 4,5 °С. Для коррекции температуры по данным барометрической и геометрической высот, с учетом выполненного в разделе «моделирование» настоящей статьи сравнения полученных значений температуры и значений температуры модели прогнозирования ECMWF, СКП принята равной 3,5 °С. Согласно RTCA DO-260C⁴¹ АЗН-В версии 3 поддерживает передачу температуры и воздушной скорости⁴. Учитывая использование одних и тех же датчиков определения температуры атмосферы на ВС, сделано предположение о равной точности температур AMDAR и АЗН-В версии 3. Согласно [de Naan, 2013b] СКО температуры по данным AMDAR составило 1 К. Следовательно, для передаваемой в сообщении АЗН-В версии 3 температуры, СКП принята равной 1,5 °С;

5.2. Следующим этапом необходимо сгенерировать значения нормально распределенной величины температуры с заданным значением СКП;

5.3. Для полученных в п. 5.2. сгенерированных значений температуры выполняем вычисления высот с учетом ошибок определения температуры по формуле (1) и находим разность с высотой полета, полученной в п. 1;

5.4. Находим СКП величины, полученной в пункте 5.3. – величина максимально допустимой ошибки в метрах. Далее необходимо привести найденную величину СКП к вероятности 95%.

6. Выполняем вычисление допустимого интервала по формуле:

$$\Delta H_i = \sqrt{\Delta h_{B_i}^2 + T_{Air_err_i}^2 + \Delta h_{Error_i}^2 - \varepsilon^2}, \quad (2)$$

где Δh_{Error} – разность высоты и допустимой ошибки;

T_{Air_err} – максимально допустимая ошибка в м, вызванная ошибкой определения параметров температуры.

Отметим, что допустимый интервал принимается равным среднему значению полученной величины ΔH_i и находится по формуле:

⁴¹ Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) and traffic information services – broadcast (TIS-B). RTCA DO260C, 2020. 1714 p.

$$\Delta \bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta H_i, \quad (3)$$

7. Далее необходимо сравнить значение допустимого интервала со значением допустимого интервала (90 м) по формуле:

$$\Delta \bar{H} - 90 > 0 \quad (4)$$

В случае невыполнения условия подтверждение данных невозможно.

8. При выполнении условия п. 7 необходимо определить разность максимально допустимого отклонения высоты полета, рассчитанной для реальной атмосферы, и геометрической высоты АЗН-В, приведенной к уровню MSL. Ее значение не должно превышать рассчитанный максимально допустимый интервал:

$$\left| H_{\text{реал.атм}} - H_{\text{ГНСС_MSL}} \right| < \Delta \bar{H}, \quad (5)$$

где ΔH – максимально допустимый интервал.

Коррекция температуры и учет парциального давления по данным из сообщения АЗН-В о воздушной скорости в точке ВС выполняется по следующему алгоритму:

1. По полученным из сообщения АЗН-В значениям скоростей TAS и IAS, с использованием таблиц коррекции скоростей, определяем значение CAS;

2. Находим значение динамического давления q , приняв $\gamma = \frac{1}{4}$ [Lowry, 1999]:

$$q = P_0 \cdot \left(\left[\frac{\left(\frac{CAS}{a_0} \right)^2}{5} + 1 \right]^{\frac{7}{2}} - 1 \right) \quad (6)$$

где a_0 – скорость звука (ISA $a_0 = 340,294$ м/с).

3. Атмосферное давление до 11 000 м, может быть определено по методике, представленной в работе [Подтверждение достоверности..., 2023] и в соответствии с ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная, параметры», по формуле:

$$P = P_0 \cdot \theta^{\left(\frac{g_c}{L \cdot R} \right)}, \quad (7)$$

где P_0 – давление на уровне моря (101325 Па);

L – градиент температуры в соответствии с параметрами стандартной атмосферы (0,0065 К/м);

R – газовая постоянная ($287,0531 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$);

$\theta = \frac{T}{T_0}$, где $T = T_0 - L \cdot h$;

g_c – стандартное ускорение свободного падения;

T_0 – температура поверхностного слоя стандартной атмосферы (288,15 К);

h – барометрическая геопотенциальная высота ВС.

Число Маха может быть найдено как [Lowry, 1999]:

$$M = \sqrt{5 \left[\left(\frac{q}{P} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (8)$$

4. Температура в точке полета ВС может быть выражена из представленной в RTCA⁴² формулы TAS:

$$T = T_0 \left(\frac{TAS}{a_0 M} \right)^2, \quad (9)$$

5. Согласно [Lowry, 1999], эквивалентная воздушная скорость EAS (Equivalent airspeed) может быть найдена по формуле:

$$EAS = \sqrt{\frac{2\gamma P}{(\gamma-1)\rho_0} \left[\left(\frac{q}{P} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}, \quad (10)$$

Тогда плотность воздуха в точке ВС ρ можно выразить как:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{EAS}{TAS} \right)^2 \quad (11)$$

6. Выполняется вычисление виртуальной температуры по формуле⁴³:

$$T_v = T \left(1 + 0,378 \frac{e}{P} \right) \quad (12)$$

7. Значения парциального давления в точке ВС могут быть найдены по формуле:

$$e = \left(\frac{T_v - T}{0,378} \right) \cdot \frac{P}{T} \quad (13)$$

8. Полученные значения являются приоритетными при выполнении подтверждения данных.

Температура воздуха может быть выражена из формулы, связывающей геометрическую и барометрическую скорости, приведенной в RTCA⁵. Согласно модифицированной методике [Калинцев, 2023], температуру на высотах находят по формуле:

⁴² Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) and traffic information services – broadcast (TIS-B). RTCA DO260B, 2009. 1410 p.

⁴³ Хромов С. П. Метеорология и климатология: учебник / С. П. Хромов, М. А. Петросянц. 7-е изд. М.: Изд-во Моск. ун-та : Наука, 2006. 582 с.

$$T_{actual} = T_{sd(hp)} \left(\frac{\frac{\partial h}{\partial t}}{\frac{\partial H_p}{\partial t}} \right) \quad (14)$$

При этом необходимо использовать сообщения от ВС, выполняющих взлет. Допустимо использовать данные АЗН-В от ВС, выполнивших посадку, но при этом необходимо использовать накопленные данные от нескольких ВС. При обработке данных, полученных от выполнивших посадку ВС, следует использовать метод наименьших квадратов (далее МНК). При наличии данных, прогнозные значения температуры на высотах корректируются на значения, полученные с использованием формулы (14).

Алгоритм модифицированной методики подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В выглядит следующим образом:

1. По формуле (7) полученные значения барометрической высоты АЗН-В преобразуем в значения реального давления в точке ВС.

2. Приводим к уровню MSL температуры у поверхности земли. При наличии значений температуры для требуемых высот, полученных с использованием формулы (14), необходимо скорректировать прогнозные значения температуры на реальные.

3. При отсутствии данных о значениях воздушных скоростей TAS, IAS и числе Маха, температура воздуха вычисляется линейной интерполяцией двух прогнозных значений на соседних высотах, для которых имеется прогноз.

При наличии необходимого количества данных, для расчета температуры с использованием формулы (9), выполняется коррекция прогнозных значений температуры на реальные значения. При этом парциальное давление на высоте полета ВС определяется по формуле [Задачник..., 1984]:

$$e_z = e_0 10^{-k(t_0 - t)} \quad (15)$$

где t и t_0 температура воздуха на высоте и у земной поверхности соответственно;

e_0 – парциальное давление у земной поверхности;

$k = 0,0387$ – эмпирический коэффициент.

В случае приема сообщения АЗН-В (ADS-Wx), содержащего данные о температуре воздуха, используются принятые значения температуры;

4. Находим высоту полета ВС. Для этого используем полную формулу Лапласа (1), давление QNH (QFF) соответствующей площади и полученное в п. 1. реальное давление в точке полета ВС. Полученная высота – $H_{реал}$;

5. Находим величину максимально допустимого интервала согласно приведенной выше методике;

6. Выполняем проверку надежности барометрического источника данных ВС по формуле (16):

$$H_{реал_атм} = NIC_{BARO} \cdot H_{реал} \quad (16)$$

7. Геометрическая высота АЗН-В (ГНСС) приводится к уровню моря – $H_{ГНСС_MSL}$;

8. Выполняется сравнение полученных высот по формуле (5). Модуль разности не должен превышать допустимый интервал.

Коррекция температуры и учет парциального давления по данным из сообщения АЗН-В о воздушной скорости в точке ВС выполняется по следующему алгоритму:

1. По полученным от АЗН-В значениям скоростей TAS и IAS с использованием таблиц коррекции скоростей определяем значение CAS;
2. По формуле (6) находим значение динамического давления q ;
3. Зная динамическое давление q и рассчитав давление по формуле (7) с использованием формулы (8), вычисляем число Маха;
4. По полученным от АЗН-В значениям TAS, IAS и рассчитанному числу Маха находим значение температуры по формуле (9).

Результаты

Выполнено моделирование определения параметров атмосферы в точке полета ВС. Для моделирования передаваемых по ЛПД 1090 ES данных (TAS, IAS) использована модель Simulink [Indicated Airspeed..., s.a.].

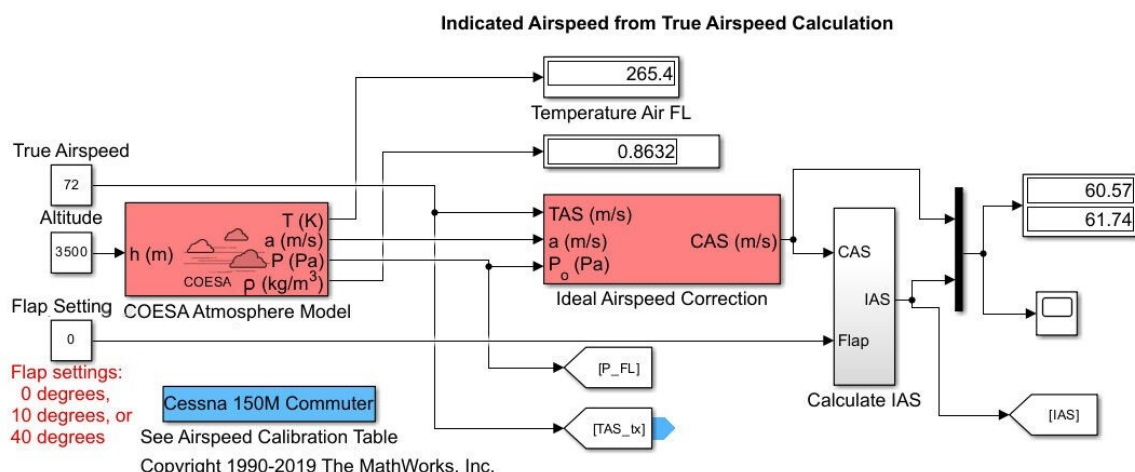


Рисунок 2 – Модель Simulink

Рассчитанные моделью IAS from TAS данные передаются на разработанную в среде MATLAB Simulink модель вычисления значений температуры и плотности (рис. 3.).

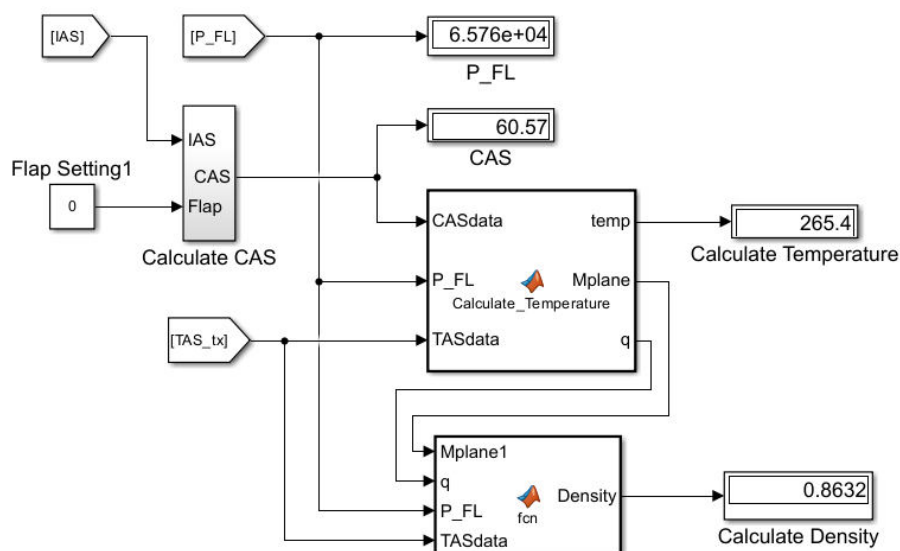


Рисунок 3 – Модель вычисления значений температуры и плотности

Блок «COESA Atmosphere model» позволяет задать стандартную атмосферу и экстремальные значения параметров атмосферы, соответствующие документации MIL-STD-210A и MIL-HDBK-310. В качестве экстремальных параметров могут быть заданы высокая и низкая температура, а также плотность. Частота появления экстремальных значений задается процентом времени.

Результаты моделирования определения параметров атмосферы (рис. 2 и 3) в точке ВС приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты вычисления температуры по данным АЗН-В

Н, м	COESA		MIL-HDBK-310, low temperature 1%		MIL-HDBK-310, high temperature 1%	
	Т _{исх.} , К	Т _{расч.} , К	Т _{исх.} , К	Т _{расч.} , К	Т _{исх.} , К	Т _{расч.} , К
1000	281.65	281.65	227.147	227.147	292.157	292.158
1500	278.4	278.4	230.65	230.65	293.16	293.159
2000	275.15	275.1	234.139	234.139	294.16	294.155
2500	271.9	271.9	231.82	231.82	291.663	291.666
3000	268.65	268.65	229.49	229.49	289.165	289.172

Таблица 2 – Результаты вычисления плотности по данным АЗН-В

Н, м	COESA		MIL-HDBK-310, low temperature 1%		MIL-HDBK-310, high temperature 1%	
	ρ _{исх.} , кг/м ³	ρ _{расч.} , кг/м ³	ρ _{исх.} , кг/м ³	ρ _{расч.} , кг/м ³	ρ _{исх.} , кг/м ³	ρ _{расч.} , кг/м ³
1000	1.112	1.112	1.344	1.344	1.075	1.075
1500	1.058	1.058	1.229	1.229	1.011	1.011
2000	1.006	1.006	1.124	1.124	0.95054	0.95056
2500	0.9569	0.9569	1.054	1.054	0.9039	0.9039
3000	0.9091	0.9091	0.9886	0.9886	0.8595	0.8595

Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что с использованием модели рис. 3, для заданных высот, за исключением значений на высоте 2000 м (модель MIL-HDBK-310, high temperature 1%), значения плотности в точке ВС восстановлены без ошибок.

Восстановленные значения температуры отличаются для модели с экстремальными значениями температуры (модель MIL-HDBK-310, high temperature 1%) в третьем значке после запятой. Остальные значения совпадают. Можно сделать вывод, что погрешность будет определяться ошибками определения воздушных скоростей (TAS/IAS), их разрешением и ошибками перевода CAS.

Необходимо отметить, что следует обрабатывать усредненные за некоторое время данные. Для повышения частоты данных TAS и IAS следует использовать навигационный треугольник скоростей, согласно требованиям RTCA⁵.

Определение температуры на высоте по данным АЗН-В

Выполнено моделирование определения температуры по данным геометрической и барометрической высот. Необходимо подчеркнуть, что используются данные, обработанные в соответствии с протоколом ASTERIX³.

Приведем алгоритм удаления аномалий и сглаживания данных. Аномальные значения температуры отфильтрованы в несколько этапов. На первом этапе из выборки полученных данных удалены значения температуры, превышающие +40 °C и – 100 °C. Далее выполнено вычисление СКО с использованием метода скользящего окна по 3 точкам. Значения СКО, превышающие 6 °C, удалены. При моделировании установлено, что на каждые 100 метров высоты ВС получено, в среднем, 30 сообщений (отчетов ASTERIX). Следующим шагом выполняется усреднение полученных данных: методом скользящего окна вычисляется математическое ожидание для 30 отсчетов. Значения, полученные по данным прямолинейного движения, исключены. Геометрическая высота ГНСС АЗН-В приведена к уровню MSL.

Ниже приведены графики зависимости температуры от приведенной к уровню MSL высоты ГНСС АЗН-В (рис. 4). Данные представлены без сглаживания и со сглаживанием. На приведенных графиках аномальные значения удалены.

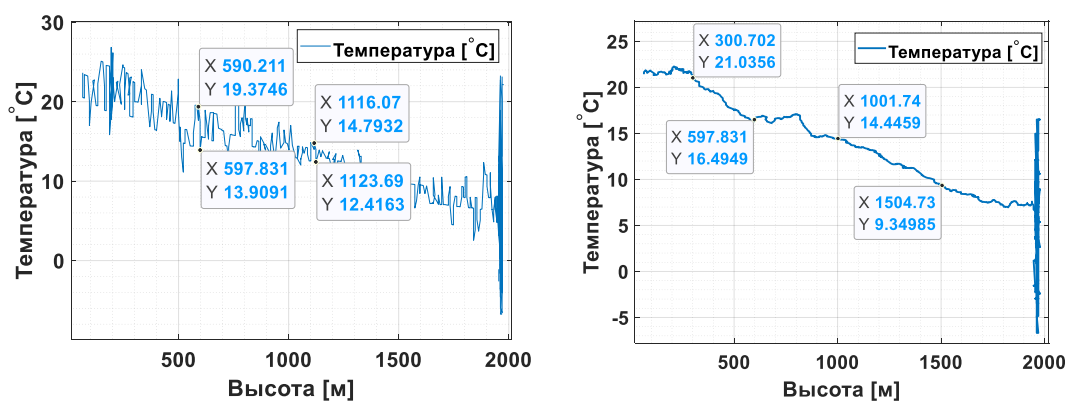


Рисунок 4 – Значения температуры по данным рейса Мезень – Архангельск 23.05.2023 без сглаживания – слева. Температура со сглаживанием – справа

Температура воздуха у земной поверхности 22 °С. Прогнозные значения температуры на высотах 300, 600, 1500, и 3000 м составляли 22 °С, 16 °С, 8 °С и -5 °С соответственно.

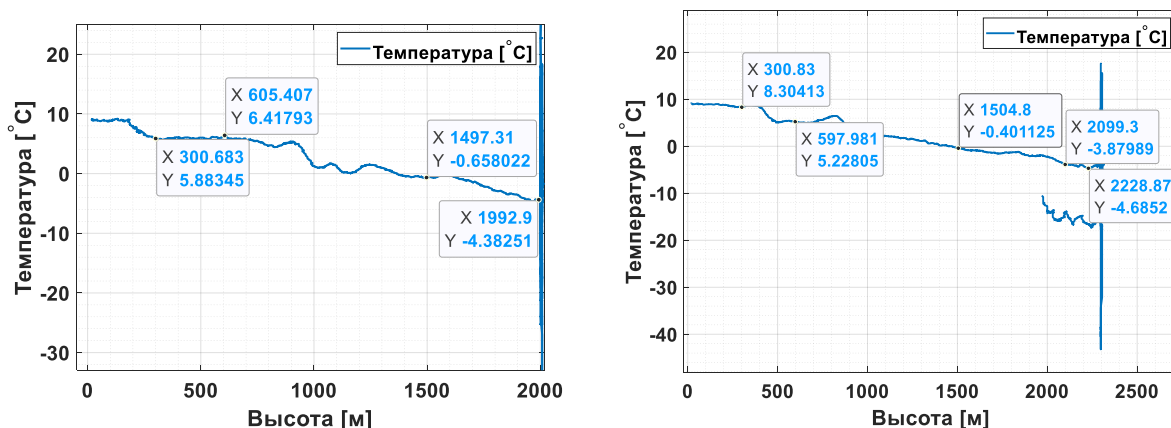


Рисунок 5 – Значения температуры по данным рейсов 01.06.23. Архангельск – Мезень слева, Мезень – Архангельск справа

Прогнозные значения температуры по площадям для высот 300, 600, 1500 м составили 5 °С, 8 °С, 1 °С. По данным геометрической и барометрической высот температура составила 5,8 °С, 6,4 °С, -0,6 °С, на соответствующих высотах.

Температура по данным прогностического зонда Windy (модель ECMWF)⁷ для высот 300, 600, 1500 и 2100 м составила 9 °С, 6 °С, 0 °С, -4 °С соответственно. По данным АЗН-В для рейса Архангельск – Мезень получили значения 5,8 °С, 6,4 °С, -0,6 °С и -4,3 °С, для рейса Мезень – Архангельск значения составили 8,3 °С, 5,2 °С, -0,4 °С, -3,8 °С.

Для рейса Мезень – Архангельск 01.06.23, в связи со снижением ВС в Архангельской зоне УВД, наблюдаются значения температуры в районе -15 °С (рис. 5.). Эти данные следует исключать. Можно сделать вывод, что необходимо использовать в одном наборе данных значения только для набора высоты или посадки ВС.

Отметим, что оценка полученных параметров температуры является темой отдельного исследования и относится к области метеорологии.

Для верификации результатов выполнено сравнение полученных значений температуры со значениями модели прогноза погоды ECMWF, разработанной Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды.

При моделировании выполнено сравнение оценки температуры, рассчитанной по формуле (14) с удалением аномальных значений, со значениями прогностического зонда Windy (ECMWF модель)⁴⁴. Значения модели ECMWF были взяты для высот: 300-3000 м, с шагом 100 м. Для данных температуры по данным АЗН-В и модели ECMWF выполнено вычисление RMSE по формуле [Root-mean-square..., s.a.]:

⁴⁴Windy // [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.windy.com> (дата обращения: 21.07.2023).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - F_i|^2} \quad (17)$$

В результате моделирования установлено, что предложенная методика определения температуры может вносить погрешность при горизонтальном движении ВС. Температура рассчитывалась от 300 м до высоты, равной 85% высоты горизонтального полета ВС ($H_{ГП} \cdot 0,85$). На рис. 6 приведены графики полученных значений температуры и прогнозных значений модели ECMWF.

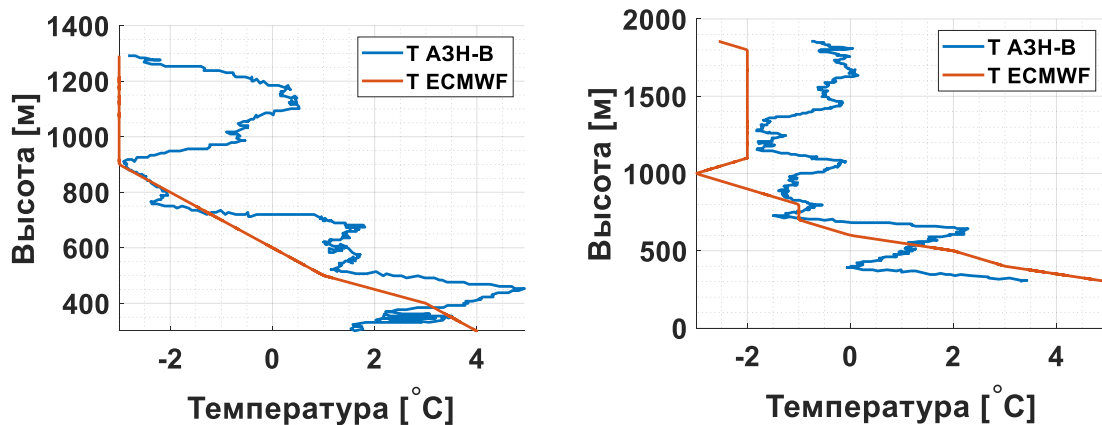


Рисунок 6 – Архангельск – Мезень 20.06.2023 – слева. Мезень – Архангельск 20.06.2023 – справа

Приведем пример температуры по данным рейса с максимальной $RMSE=2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и рейса с минимальной $RMSE=0,86\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 7).

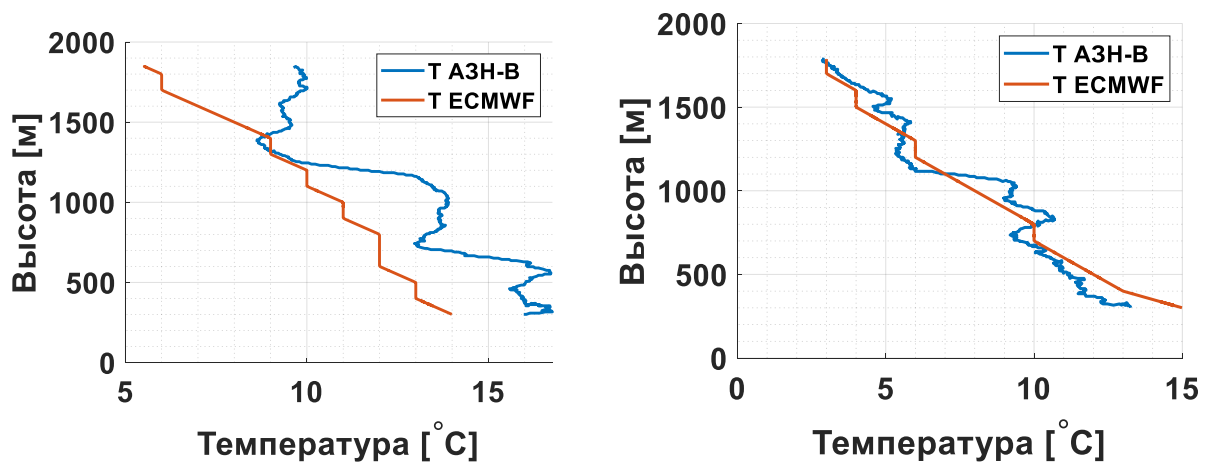


Рисунок 7 – Архангельск – Мезень 27.06.2023 – слева. Архангельск – Мезень 06.07.2023 – справа

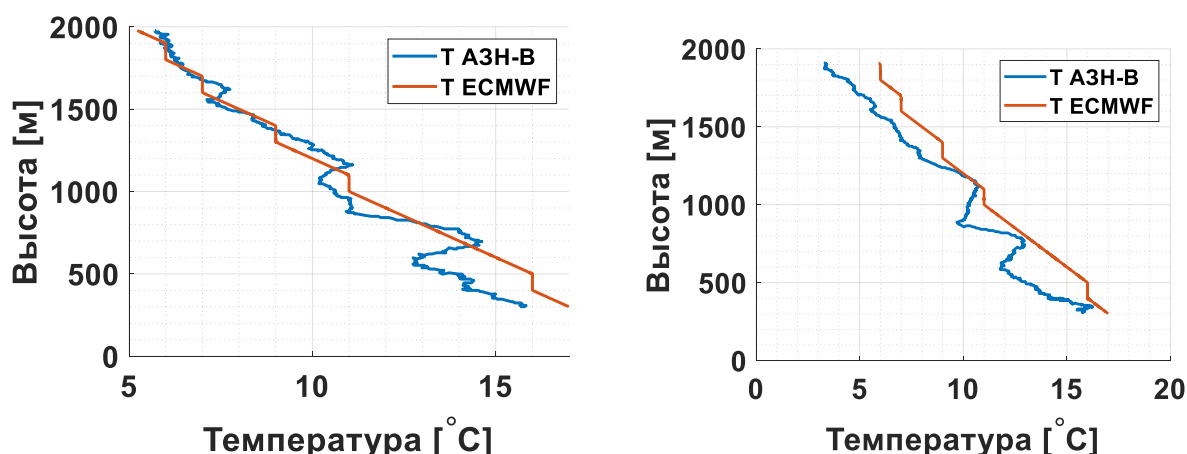


Рисунок 8 – Мезень – Архангельск 02.07.23 – слева. Архангельск – Мезень 02.07.23 – справа

Таблица 3 – Результаты сравнения температуры по данным АЗН-В и ECMWF

Рейс, дата	RMSE, °C	МО разности Температуры АЗН-В и модели ECMWF, °C	СКО разности Температуры АЗН-В и модели ECMWF, °C
Мезень – Архангельск, 20.06.2023	1,53	-0,73	1,35
Архангельск – Мезень, 20.06.2023	1,77	-1,12	1,4
Мезень – Архангельск, 27.06.2023	0,94	0,23	0,9
Архангельск – Мезень, 27.06.2023	2,7	-2,42	1,22
Мезень – Архангельск, 29.06.2023	1,6	-1,41	0,74
Архангельск – Мезень, 29.06.2023	3,32	-0,9	3,19
Мезень – Архангельск, 02.07.2023	0,98	0,4	0,9
Архангельск – Мезень, 02.07.2023	1,72	1,52	0,81
Мезень – Архангельск, 04.07.2023	1,93	1,74	0,84
Архангельск – Мезень, 04.07.2023	1,81	1,24	1,32
Мезень – Архангельск, 06.07.2023	1,58	-0,85	1,33
Архангельск – Мезень, 06.07.2023	0,86	0,021	0,86

Среднее значение RMSE для 11 рейсов равно 1,58 °C (рейс Архангельск – Мезень, 29.06.2023 не учитывался).

Следует отметить, что в данных рейса Архангельск – Мезень 29.06.2023 были обнаружены аномальные значения геометрической высоты АЗН-В: наблюдался сбой в работе ГНСС. Данные были получены только до удаления 42 км и высоты 1200 м. Эти данные необходимо исключить. Значения

приведены в таблице для демонстрации возникающих ошибок при возникновении аномалий ГНСС АЗН-В.

Для рейса Архангельск – Мезень 04.07.2023 при первичной обработке были получены аномальные значения температуры. Анализ графиков показал, что усреднение выполнено некорректно. Уменьшение количества отсчетов позволило восстановить значения температуры.

В методике следует использовать данные АЗН-В от ВС, выполняющего набор высоты. Данные от ВС, выполняющего посадку, могут быть использованы при обработке накопленной статистики от нескольких ВС МНК.

На основе представленных выше данных, в рамках предлагаемой методики, примем, что максимально допустимое значение СКП температуры в воздухе не должно превышать 3,5 °С. В данном случае речь идет о суммарной погрешности температуры в воздухе: температуры, полученной по данным АЗН-В, и температуры прогнозного значения вышележащего слоя.

Результаты моделирования подтверждения геометрической высоты ГНСС АЗН-В представлены на рис. 9 и 10. При этом приняты следующие обозначения:

- Н баро – полученные от ВС данные поля Flight Level³ АЗН-В, пересчитанные в барометрическую высоту полета;
- Н ГНСС к MSL – приведенная к MSL геометрическая высота АЗН-В;
- Н*NIC BARO – произведение пересчитанной для реальной атмосферы высоты полета ВС и показателя качества NIC_{BARO} АЗН-В.

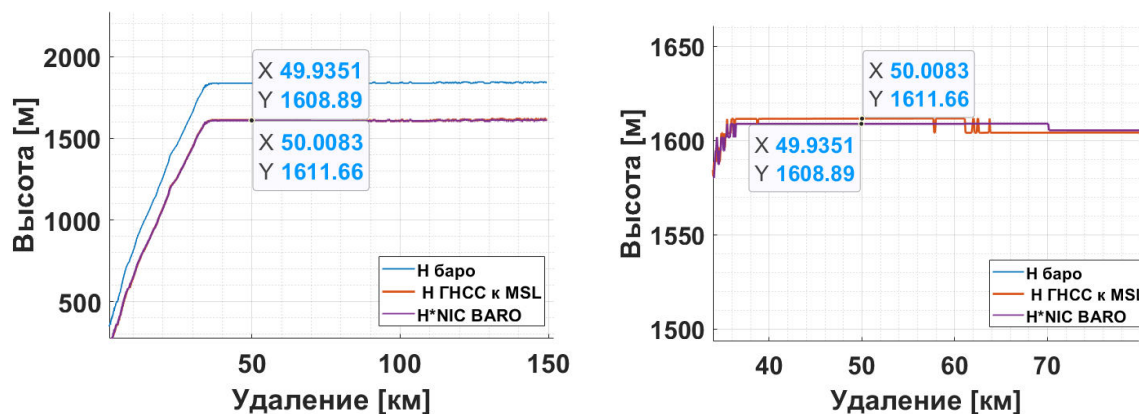


Рисунок 9 – Результаты моделирования подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В

На рис. 9 представлены результаты моделирования подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В. Разность значений высоты, рассчитанных для реальной атмосферы и приведенных к уровню MSL значений геометрической высоты АЗН-В, не превышает допустимый интервал. Следовательно, по представленным графикам можно сделать вывод, что выше эшелона перехода данные геометрической высоты АЗН-В подтверждаются на протяжении всего полета ВС.

Для демонстрации работоспособности методики на рис. 10 приведен пример неподтвержденных данных.

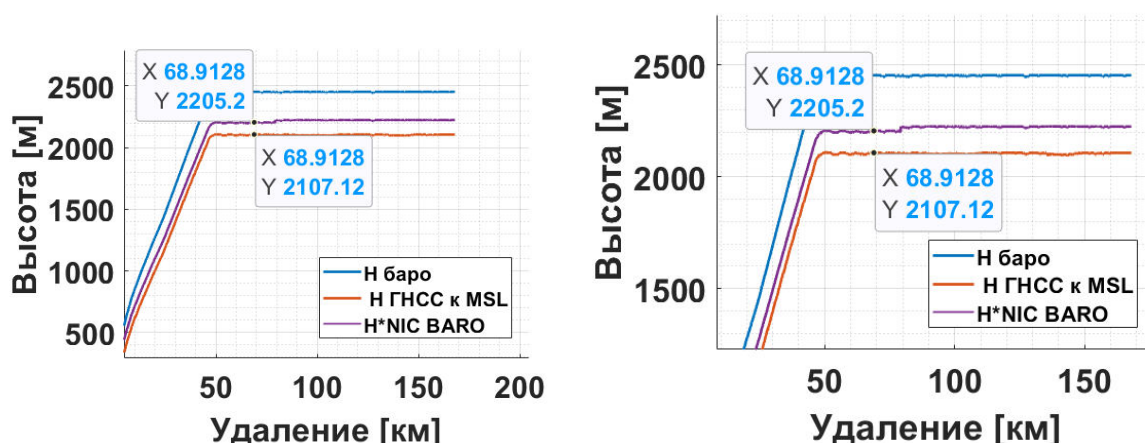


Рисунок 10 – Результаты моделирования подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В

По представленным на рис. 10 данным можно сделать вывод, что данные геометрической высоты не подтверждаются, так как разность приведённой к уровню MSL геометрической высоты и рассчитанной по реальной атмосфере высоты превышает допустимые значения 90 м.

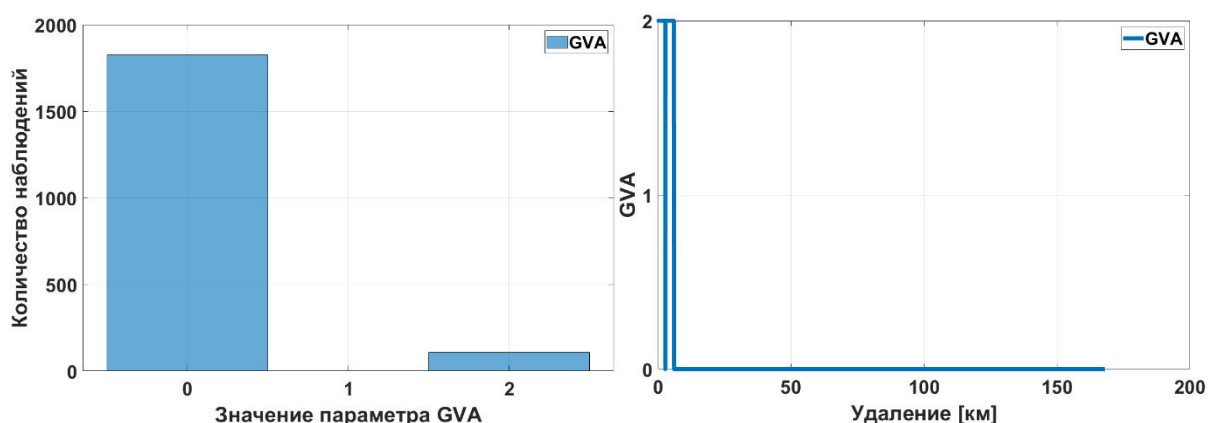


Рисунок 11 – График параметров качества АЗН-В NIC_{BARO} и GVA для рейса с неподтвержденными данными

В приведенном примере параметр $GVA=0$ игнорируется с целью проверки работоспособности методики.

Оценка погрешностей

Рассмотрим определение допустимого интервала и значения погрешностей для следующих возможных ситуаций:

1. а) Определение температур по воздушной скорости CAS и TAS. Примем, что данные распределены нормально и независимы. Для каждой скорости задано СКП=0,5 м/с. Высота 4500 м.

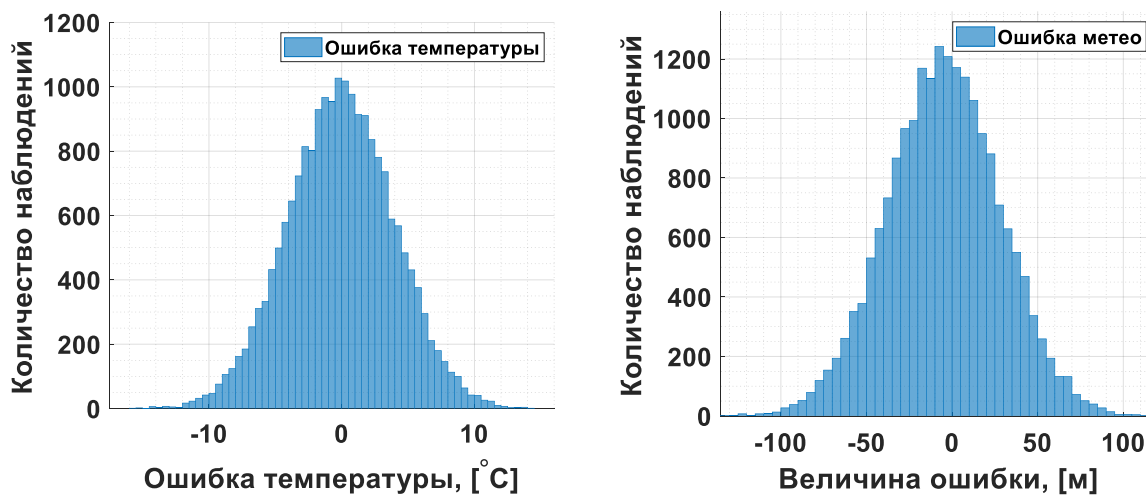


Рисунок 12 – Гистограммы ошибки температуры и отклонения от высоты

СКО отклонения от высоты (далее – S_{Air} , м), вызванная ошибкой определения температуры, составила 27,167 м – отклонение только для заданных погрешностей определения температуры на высоте, без учета наземных ошибок. Все ошибки учтены в допустимом интервале. Допустимый интервал составил 90, 57 м.

б) TAS рассчитывается из скорости CAS по параметрам давления и скорости звука на актуальной высоте. К значениям температуры добавлена ошибка СКП=2 °С. С учетом СКП рассчитывается скорость звука, которая является входным параметром для функции скорости TAS. Здесь определяющей является СКП температуры. Допустимый интервал составил 79,63 м, $S_{Air} = 16,5$ м.

2. Рассмотрим ошибки и величину допустимого интервала при использовании прогнозных значений температуры на высотах. Покажем необходимость сравнения допустимого интервала и максимально допустимой погрешности (90 м).

При использовании прогнозных значений, СКП ошибки температуры принято равным 4,5 °С. Высота 4500 м. Допустимый интервал составил 108,6 м, S_{Air} получена равной 37,01 м. Допустимый интервал превышает максимально допустимую погрешность (90 м). Для высоты 3000 м с заданными ранее значениями СКП допустимый интервал получен равным 89,17 м, $S_{Air} = 26,86$ м. Таким образом, для прогнозных значений температуры с заданным СКП ограничение по высоте составило 3300 м.

Выполним моделирование определения допустимого интервала для значений температуры, полученной из значений воздушной скорости. Зададим только СКП температуры равную 4,1 °С. Высота 4500 м. Допустимый интервал составил 102,6 м, $S_{Air} = 33,01$ м. Допустимый интервал превышает максимально допустимую погрешность равную 90 м. Для высоты 3300 м с заданными ранее значениями СКП, допустимый интервал равен 88,46 м,

$S_{Air} = 24,5$ м. Таким образом, для прогнозных значений температуры с заданным СКП ограничение по высоте составило 3300 м.

Для случая передачи данных температуры с борта ВС (АЗН-В версии 3) примем СКП температуры 1,5 °С, высота 4500 м, допустимый интервал равен 76,59 м, $S_{Air} = 12,39$ м.

Сравнение точности методик можно выполнить по величине допустимого интервала. Наибольшие значения интервала получены для случая использования прогнозных значений. Использование температуры по данным сообщения о воздушной скорости АЗН-В позволит, при наличии данных, использовать актуальные значения температуры и несколько уменьшить размеры допустимого интервала в сравнении с прогнозными значениями.

Наиболее точным способом является передача температуры напрямую с борта ВС в составе сообщения АЗН-В версии 3. Использование оборудования 3 версии позволит повысить точность предлагаемого метода подтверждения данных.

Приведем преимущества модифицированной методики. Предлагаемая модифицированная методика позволяет использовать полученные по передаваемым данным АЗН-В, скорректированные значения температуры. Приведение к уровню MSL позволяет выполнить подтверждение данных, при выполнении полетов по трассе, для некоторой области выполнения полетов. Таким образом, расширяется область применения предлагаемой методики. Важной отличительной чертой предлагаемой модификации является использование допустимого интервала. Применение интервала позволяет учесть допустимые ошибки определения метеопараметров атмосферы и значения показателей качества, передаваемых по ЛПД АЗН-В. Значения интервала вычисляются итеративно.

Дискуссия

В работе [Semke et al., 2017], в результате выполненного анализа сигналов АЗН-В, авторами выявлены несоответствия барометрической и геометрической высот, а также обнаружены аномалии в виде перепадов по высоте. Выявленные аномалии представляют собой совместное скачкообразное изменение данных о высоте ВС. О значениях показателей качества данных АЗН-В в своем исследовании авторы не сообщают.

В работе [Ali et al., 2019] проанализированы данные о высоте ВС АЗН-В, в том числе и индикаторы качества высоты. Авторы работы [Ali et al., 2019] приходят к выводам о целесообразности использования параметров NIS BARO и SIL в будущих наземных и бортовых приложениях в качестве барьера.

В работе [Подтверждение достоверности..., 2023] предложена методика подтверждения данных геометрической высоты. Необходимо отметить, что методика [Подтверждение достоверности..., 2023] не учитывает ошибки метеопараметров и предполагает проверку данных в небольшой окрестности относительно порога ВПП.

Рассмотрим методы определения температуры по данным АЗН-В в контексте решаемой задачи. Предложенный в работе [De Leege et al., 2013] метод определения температуры, опять же, применительно к поставленной задаче, обладает некоторыми недостатками. Авторы работы [De Leege et al., 2013] принимают геометрическую высоту как истинное местоположение ВС. К данным давления, полученного из барометрической высоты, и геометрической высоты выполняется подгонка многочлена, описывающего зависимость этих величин.

Для полученного многочлена, применяя закон идеального газа и предположение гидростатического равновесия, авторами работы [De Leege et al., 2013] выполняется оценка температуры. Необходимо отметить, что использование зависимости геометрической высоты и давления при определении температуры, применительно к решаемой задаче, не позволит выполнить проверку данных.

В работе [Stone et al., 2015] выполняется оценка среднего слоя атмосферы (авторы используют слой толщиной 1500-2000 м), для реализации предложенного авторами способа определения температуры необходимо использование 2 ВС или одного ВС, выполняющего набор высоты или снижение. В результате авторы находят температуру слоя. Методика применима на высотах более 1000 м и для толщины слоя 1500-2000 м. Применительно к поставленной задаче необходимо определить температуру на высотах 300-3000 м.

Следует отметить, что модифицированная методика, разработанная на основе [Подтверждение достоверности..., 2023], также предполагает коррекцию значений метеопараметров атмосферы по данным метеозондов.

На рис. 11 представлены дополнительные параметры качества АЗН-В полета ВС с неподтвержденными предлагаемой методикой данными. Параметр GVA на удалении от 6 км до 167 км равен нулю, что интерпретируется как неизвестная или превышающая 150 м вертикальная точность. Значения GVA согласуются с полученными по предлагаемой методике выводами о недостоверности данных геометрической высоты ГНСС.

Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что при коррекции температуры в точке ВС, погрешность будет определяться в первую очередь ошибками перевода CAS и разрешением скоростей TAS и IAS. Отметим, что значения СКП ошибок следует задавать по накопленной статистике полученных данных.

Анализ значений температуры модели ECMWF и температуры, полученной по данным геометрической и барометрической высот, показал, что для данных, полученных по значениям ВС, выполняющих посадку, возможны значительные отклонения температуры от значений модели ECMWF. Смещение может быть связано с выполнением предпосадочного маневра ВС либо с точностью самой модели прогнозирования в данный момент времени.

Отметим, что в дальнейшем необходимо предусмотреть механизм учета больших отклонений значений температуры, полученных с использованием геометрической и барометрической высот.

Первичное сглаживание выполняется по набору данных, то есть по накопленным значениям. Модификация способа сглаживания (фильтрации) данных может быть использована для повышения точности определения температуры. В дальнейших исследованиях необходимо выполнить проверку точности получаемых данных с использованием реальных значений температуры на высотах. Также, при определении температуры по данным геометрической и барометрической высот следует учесть особенности выполнения взлета и захода на посадку.

Следует выполнить анализ ошибок передаваемой в сообщениях АЗН-В версии 3 температуры. Ожидается, что значения ошибок будут совпадать с ошибками AMDAR, так как температура передается напрямую и используются одни и те же датчики ВС.

Выводы

Моделирование показало, что основной вклад в погрешность определения высоты полета ВС для реальной атмосферы вносит температура. От ее величины зависит разность значений высоты, рассчитанной для реальной атмосферы, и приведенной к уровню MSL геометрической высоты.

Для коррекции значений температуры на высоте необходимо использовать данные температуры, полученные по передаваемым значениям барометрической и геометрической высот. Геометрическая высота может быть подтверждена в случае отсутствия данных наземного вектора и при наличии данных скоростей TAS и IAS.

Выполнено моделирование определения параметров атмосферы по данным TAS и IAS. При моделировании были заданы экстремальные значения параметров атмосферы, в соответствии с MIL-HDBK-310. Моделирование вычисления параметров атмосферы по данным IAS и TAS показало, что предложенная методика коррекции позволяет вычислить значения температуры и плотности.

В результате анализа данных температуры, полученных из сообщений ВС, выполняющего набор высоты, и сравнения с моделью ECMWF, установлено, что максимальное значение RMSE составило 1,93 °C. Среднее значение RMSE для 11 рейсов составило 1,58 °C. Точность предложенного способа определения температуры можно повысить путем использования дополнительных данных о параметрах ВС, а также модификацией методов фильтрации данных. Максимальное RMSE по данным ВС, выполняющего снижение, составило 2,7 °C.

Следует отметить, что необходима верификация методики определения температуры с использованием фактических значений температуры на высотах. Также необходим дальнейший анализ и модификация предложенной методики с целью повышения согласованности и точности.

Предложенная методика получения значений температуры по передаваемым в стандартном сообщении АЗН-В данным геометрической и барометрической высот может быть использована для контроля прогнозных значений или с целью получения значений температуры на высотах на

аэродромах не обладающих развитой метеорологической инфраструктурой, таких как аэродромы МВЛ, а также на посадочных площадках.

Используемый при подтверждении данных геометрической высоты АЗН-В индикатор качества высоты NI_{BARO} позволяет использовать только прошедшие на ВС проверку значения барометрической высоты. Параметр GVA, при выполнении вычисления максимально допустимого интервала, позволяет учитывать геометрическую точность ГНСС.

Отличительной особенностью представленной модификации методики [Подтверждение достоверности..., 2023] является итеративное вычисление максимально допустимого интервала, что позволяет учитывать ошибки определения метеопараметров.

Необходимо подчеркнуть возможность использования предложенной в работе модифицированной методики с данными стандарта АЗН-В третьей версии. Предложенная модифицированная методика применима для подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В при выполнении полетов МВЛ.

Библиографический список

- Архив погоды в Архангельске // [Электронный ресурс]. 2023. – URL: [https://rp5.ru/Архив погоды в Архангельске](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Архангельске) (дата обращения: 21.07.2023).
- Архив погоды в Мезени // [Электронный ресурс]. 2023. – URL: [https://rp5.ru/Архив погоды в Мезени](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Мезени) (дата обращения: 21.07.2023).
- Задачник по общей метеорологии / А. Г. Бройдо, С. В. Зверева, А. В. Курбатова, Т. В. Ушакова; под ред. В. Г. Морачевского. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 312 с.
- Калинцев А. С. Модифицированная методика подтверждения данных АЗН-в с коррекцией температуры при оценке высоты полета (часть 1) // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2023. № 4. С. 28-49. DOI 10.51955/2312-1327_2023_4_28.
- Калинцев А. С. Подтверждение данных АЗН-В в аэродромной зоне методом стробирования / А. С. Калинцев, Е. А. Рубцов, А. П. Плясовских // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 7. С. 39-49. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-7-39-49.
- Плясовских А. П. Метод оценки достоверности информации АЗН-в в системе наблюдения и контроля аэродромного движения / А. П. Плясовских, Е. А. Рубцов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2019. № 3(24). С. 90-102. EDN SMYDUN.
- Плясовских А. П. Теоретическое обоснование подтверждения достоверности информации о местоположении объекта на рабочей площади аэродрома / А. П. Плясовских, Е. А. Рубцов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 3. С. 32-40. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-3-32-40. EDN JWKVQM.
- Подтверждение достоверности сообщений АЗН-В путем оценки высоты полета воздушного судна / А. П. Плясовских, Е. А. Рубцов, А. С. Калинцев, В. Ю. Давиденко// Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2023. № 1(36). С. 118-133. DOI 10.51955/2312-1327_2023_1_118.
- Таблицы физических величин: справочник / В. Г. Аверин, Б. А. Аронзон, Н. С. Бабаев и др.; под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.
- Ali B. S. A study on geometric and barometric altitude data in automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) messages / B. S. Ali, N. A. Taib // The Journal of Navigation, 2019. Vol. 72. № 5. pp. 1140-1158.
- de Haan S. An improved correction method for high quality wind and temperature observations derived from Mode-S EHS. KNMI, 2013b. 54 p.

de Haan S. The use of a commercial ADS-B receiver to derive upper air wind and temperature observations from Mode-S EHS information in The Netherlands / *S. de Haan, M. de Haij, J. Sondij. De Bilt, The Netherlands : KNMI, 2013a. 45 p.*

De Leege A. M. P. Using Automatic Dependent Surveillance-Broadcast for Meteorological Monitoring / *A. M. P. De Leege, M. M. van Paassen, M. Mulder // Journal of Aircraft. 2013. № 50(1). P. 249–261. doi:10.2514/1.c031901.*

Indicated Airspeed from True Airspeed Calculation // Mathworks // [Электронный ресурс]. URL: <https://uk.mathworks.com/help/aeroblks/indicated-airspeed-from-true-airspeed-calculation.html> (дата обращения: 18.04.2023).

Lowry J. T. Performance of Light Aircraft (AIAA Education Series). Washington: DC, 1999. 475 p.

Root-mean-square error between arrays// Mathworks // [Электронный ресурс]. URL: <https://uk.mathworks.com/help/matlab/ref/rmse.html> (дата обращения: 21.07.2023).

Semke W. Analysis of radar and ADS-B influences on aircraft detect and avoid (DAA) systems / *W. Semke, N. Allen, A. Tabassum, M. Mccrink [et al.] // Aerospace. 2017. Т. 4. № 3. P. 49. DOI:10.3390/aerospace4030049.*

Stone E. K. Introducing an approach for extracting temperature from aircraft GNSS and pressure altitude reports in ADS-B messages / *E. K. Stone, M. Kitchen // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2015. Т. 32. №. 4. С. 736-743.*

References

- Ali B. S., Taib N. A.* (2019). A study on geometric and barometric altitude data in automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) messages. *The Journal of Navigation. 72(5): 1140-1158.*
- Averin V. G., Aronzon B. A., Babaev N. S.* (1976). Tables of physical quantities: reference book. Moscow: Atomizdat Publ., 1976. 1006 p. (in Russian)
- Broido A. G., Zvereva S. V., Kurbatova A. V., Ushakova T. V.* (1984). Book of problems on general meteorology / Eds. V. G. Morachevskogo. Leningrad : *Gidrometeoizdat*, 1984. 312 p. (in Russian).
- de Haan S.* (2013b). An improved correction method for high quality wind and temperature observations derived from Mode-S EHS. KNMI, 2013. 54 p.
- de Haan S., de Haij M., Sondij J.* (2013a). The use of a commercial ADS-B receiver to derive upper air wind and temperature observations from Mode-S EHS information in The Netherlands. De Bilt, The Netherlands : KNMI, 2013. 45 p.
- De Leege A. M. P., van Paassen M. M., Mulder M.* (2013). Using Automatic Dependent Surveillance-Broadcast for Meteorological Monitoring. *Journal of Aircraft. 50(1): 249–261. doi:10.2514/1.c031901.*
- Indicated Airspeed from True Airspeed Calculation. *Mathworks*. Available at: <https://uk.mathworks.com/help/aeroblks/indicated-airspeed-from-true-airspeed-calculation.html> (accessed 18 April 2023).
- Kalintsev A. S.* (2023). Modified methodology for confirming ADS-B data with correction of temperature values when estimating the flight altitude (part 1). *Crede Experto: transport, society, education, language. 4: 28-49. DOI 10.51955/2312-1327_2023_4_28.* (in Russian)
- Kalintsev A. S., Rubtsov E. A., Plyasovskih A. P.* (2021). Confirmation of ADS-B data in the aerodrome traffic zone by gating method. *T-Comm. 15(7): 39-49.* (in Russian)
- Lowry J. T.* (1999). Performance of Light Aircraft (AIAA Education Series). Washington: DC, 1999. 475 p.
- Plyasovskih A. P., Rubtsov E. A.* (2019). Reliability estimation method of ADS-B information for surface movement guidance and control system. *Vestnik Saint Petersburg State University of Civil Aviation. 3(24): 90-102.* (in Russian)
- Plyasovskih A. P., Rubtsov E. A.* (2020). Theoretical substantiation of confirmation of the validity of information about the location of the object on the work area of the aerodrome. *T-Comm. 14(3): 32-40. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-3-32-40.* (in Russian)

Plyasovskikh A. P., Rubtsov E. A., Kalintsev A. S., Davidenko V. Yu. (2023). Confirmation of ADS-B Messages by aircraft flight altitude. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 2023. № 1(36): 118-133. DOI 10.51955/2312-1327_2023_1_118. (in Russian)

Root-mean-square error between arrays. *Mathworks*. Available at: <https://uk.mathworks.com/help/matlab/ref/rmse.html> (accessed: 21 July 2023).

Semke W., Allen N., Tabassum A., Mccrink M. [et al.]. (2017). Analysis of radar and ADS-B influences on aircraft detect and avoid (DAA) systems. *Aerospace*. 4(3): 49. DOI:10.3390/aerospace4030049.

Stone E. K., Kitchen M. (2015). Introducing an approach for extracting temperature from aircraft GNSS and pressure altitude reports in ADS-B messages. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 32(4): 736-743.

Weather archive in Arkhangelsk. (2023). Available at: [https://rp5.ru/Архив погоды в Архангельске](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Архангельске) (accessed 21 July 2023) (in Russian)

Weather archive in Mezen. (2023). Available at: URL: [https://rp5.ru/Архив погоды в Мезени](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Мезени) (accessed 21 July 2023). (in Russian)