

УДК 629.7.058.6 : 629.7.016.2

DOI 10.51955/2312-1327\_2023\_4\_28

## МОДИФИЦИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ДАННЫХ АЗН-В С КОРРЕКЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА (ЧАСТЬ 1)

*Андрей Сергеевич Калинин,  
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.** Международная организация гражданской авиации указывает на необходимость подтверждения данных АЗН-В. Сообщения АЗН-В включают информацию о горизонтальном и вертикальном местоположении. Информация о высоте воздушного судна в гражданской авиации имеет большое значение. В статье предложена модифицированная методика подтверждения данных АЗН-В при выполнении полетов на местных воздушных линиях, которая позволяет оценить и выполнить сравнение геометрической и барометрической высот полета воздушного судна, передаваемых в стандартном сообщении АЗН-В. Предлагаемая модификация методики заключается в коррекции значений температуры, использовании полной барометрической формулы Лапласа, учете параметров качества АЗН-В. При выполнении горизонтального полета и отсутствии данных наземного вектора скорости, коррекция температуры осуществляется с использованием передаваемых в сообщении АЗН-В воздушных скоростей (TAS, IAS). В методике используется максимально допустимая ошибка 90 м. Также предлагается определять температуру воздуха по данным геометрической и барометрической высот, передаваемым в стандартном сообщении АЗН-В. Определение температуры воздуха на высотах предполагает использование данных АЗН-В от воздушных судов, выполнивших взлет. Для определения температуры по данным ВС, выполнивших посадку, необходима статистика данных от нескольких судов.

**Ключевые слова:** безопасность полетов, АЗН-В, температура, барометрическая высота, геометрическая высота, TAS, IAS.

## MODIFIED METHODOLOGY FOR CONFIRMING ADS-B DATA WITH CORRECTION OF TEMPERATURE VALUES WHEN ESTIMATING THE FLIGHT ALTITUDE

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

**Abstract.** The International Civil Aviation Organization indicates the need to confirm the ADS-B data. The ADS-B messages include information about the horizontal and vertical location. Information about the altitude of an aircraft in civil aviation is of great importance. The article

proposes a modified methodology for confirming ADS-B data when performing flights on local airlines, which allows us to estimate and compare the geometric and barometric altitude of aircraft flight transmitted in a standard ADS-B message. The proposed modification of the method consists in correcting the temperature values, using the full barometric Laplace formula, taking into account the ADS-B quality parameters. In a level flight, with no ground velocity vector data, temperature is corrected using the airspeeds (TAS, IAS) transmitted in the ADS-B message. The method uses a maximum permissible error of 90 m. It is also proposed to determine the air temperature according to geometric and barometric altitude data transmitted in the standard ADS-B message. The determination of air temperature at altitudes involves the use of the ADS-B data from the aircraft that completed take-off. To determine the temperature according to the data of the aircraft completed landing, statistics of data from several aircraft is needed.

**Key words:** flight safety, ADS-B, temperature, barometric altitude, geometric altitude, TAS, IAS.

## Введение

Транспортная стратегия РФ до 2030 года<sup>1</sup> предполагает необходимость проведения реконструкции, капитального ремонта и модернизации аэродромов гражданской авиации (ГА), расположенных в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) и Дальневосточном федеральном округе (ДФО). Стратегия подразумевает внедрение и развитие перспективных систем и технологий. К таким системам можно отнести автоматическое зависимое наблюдение вещательного типа (АЗН-В).

В сравнении с вторичным радиолокатором (ВРЛ), наземная станция АЗН-В имеет меньшую стоимость и является более экономически эффективной с эксплуатационной точки зрения [Калинцев и др., 2021]. К недостаткам технологии, согласно документу Международной организации гражданской авиации (ИКАО)<sup>2</sup>, следует отнести необходимость подтверждения данных другими источниками наблюдения, такими как многопозиционные системы наблюдения (МПСН) и ВРЛ. Учитывая экономическую эффективность АЗН-В и рекомендации ИКАО в части необходимости подтверждения данных, можно заключить, что задача разработки алгоритмических методов подтверждения данных АЗН-В является актуальной.

В работах [Калинцев и др., 2021; Плясовских и др., 2020; Плясовских и др., 2019] были представлены алгоритмические способы подтверждения данных АЗН-В, предполагающие накопление измерений координат воздушного судна (ВС) на станции АЗН-В с последующим статистическим анализом полученных данных. Также разработана методика подтверждения данных АЗН-В путем оценки высоты полета ВС [Подтверждение достоверности..., 2023], предполагающая расчет геометрической высоты АЗН-В ВС и сравнение ее со значением высоты, передаваемой в сообщении АЗН-В.

В предложенной авторами [Подтверждение достоверности..., 2023] методике используются параметры реальной атмосферы, а также значения температуры, полученные от метеослужбы. Для повышения точности целесообразно корректировать прогнозные значения температуры и учитывать

<sup>1</sup> 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).

<sup>2</sup> Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2020. 372 p.

влажность воздуха. В настоящей статье представлена модифицированная методика подтверждения данных АЗН-В, учитывающая влажность воздуха и коррекцию температуры, допустимые ошибки метеопараметров, а также показатели качества АЗН-В.

Отметим, что в приложении документа RTCA DO260B<sup>3</sup> рассмотрены варианты будущих сообщений, включающих передачу метеоданных, таких как температура, направление и скорость ветра и др. При этом, согласно RTCA<sup>3</sup>, передача вектора воздушной скорости может быть реализована в ближайшей перспективе, т.к. форматы передаваемых сообщений уже определены и поддерживаются текущими версиями линии передачи данных 1090 ES<sup>3</sup>.

Вышедший в конце 2020 года стандарт АЗН-В версии 3<sup>4</sup> поддерживает передачу воздушной скорости и метеоданных<sup>4,5</sup>, однако, оборудование, поддерживающее данный стандарт, еще не получило широкого распространения. Со временем количество ВС с таким оборудованием будет только увеличиваться.

В настоящее время, в соответствии RTCA DO260B<sup>3</sup>, данные вектора воздушной скорости передаются при отсутствии данных о векторе наземной скорости от ГНСС<sup>2,3</sup>. Поэтому необходимость подтверждения и определения геометрической высоты полета ВС, при отсутствии на борту ВС данных о наземной скорости, является важной задачей.

Разработка методики подтверждения высоты, применение которой возможно как с уже получившими широкое распространение стандартами АЗН-В версии 0, 1 и 2, так и с уже вышедшим, но еще не получившим широкое распространение стандартом версии 3, также является актуальной задачей.

Целью исследования является разработка модифицированной методики подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В с применением информации от барометрического высотомера, для оценки достоверности получаемых данных геометрической высоты АЗН-В при использовании наземной станции АЗН-В в качестве единственного средства наблюдения при обеспечении УВД.

При этом необходимо решить следующие задачи: приведения к уровню MSL, учета ошибок метео, разработки методики определения профиля температуры по данным АЗН-В. При этом следует учесть увеличение количества ВС, оборудованных АЗН-В версии 3, в будущем.

Настоящая публикация разделена на две части. В первой части были разработаны теоретические основы, разработана модифицированная методика, разработаны алгоритмы ее применения. Во второй части разработанные методики и алгоритмы будут применены с использованием реальных данных, полученных станцией АЗН-В, а также реальных значений метеопараметров атмосферы, полученных от метеослужбы и архива погоды.

---

<sup>3</sup> 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.

<sup>4</sup> 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.

<sup>5</sup> FPAW // [Электронный ресурс]. – URL: <https://fpaw.aero/sites/default/files/node/15/edit/4-darr-2020-10-14-ads-b-wx-status.pdf> (дата обращения: 21.08.2023).

## Материалы и методы

Материалом исследования является предложенная авторами [Подтверждение достоверности..., 2023] методика, 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 использованы реальные данные АЗН-В наземной станции НС-1А производства АО «ВНИИРА», расположенной на аэродроме Мезень. Необходимо обратить внимание, что обрабатываются данные АЗН-В, представленные в соответствии с протоколом ASTERIX<sup>6</sup>.

При моделировании применяются фактические значения параметров атмосферы и прогнозные значения. Модель обработки данных и выполнения расчетов представлена на рисунке 1. Подробное описание модели и результаты моделирования представлены во второй части исследования.

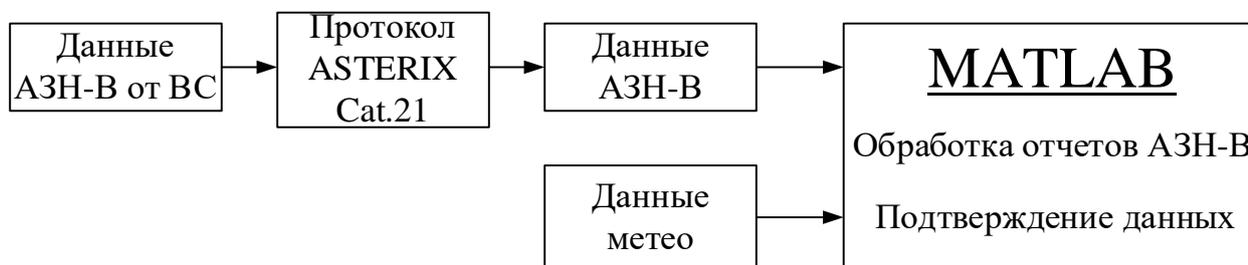


Рисунок 1 – Модель обработки данных АЗН-В

## Результаты

Методика подтверждения данных АЗН-В подробно описана в работе [Подтверждение достоверности..., 2023], при этом отмечено, что точность методики, в основном, определяется точностью значений температуры в точке расположения ВС. С целью повышения точности методики [Подтверждение достоверности..., 2023] предлагается использовать реальные значения температуры в точке ВС и учитывать только подтвержденные на борту ВС данные барометрического давления.

Требования к элементам данных наблюдения определены Протоколом ASTERIX<sup>6</sup>. В соответствии с требованиями<sup>6</sup>, элементы данных сообщения АЗН-В: «Эшелон полета» (I021/145) и «Геометрическая высота» (I021/140) должны всегда передаваться в АС УВД. Принимая во внимание необходимость использования данных, получаемых от разных источников, в том числе и от метеослужбы, процедуру подтверждения данных следует выполнять в АС УВД.

В протоколе ASTERIX<sup>6</sup> приведены «Показатели качества» (I021/090) АЗН-В. Среди передаваемых системой АЗН-В данных представляют интерес значения параметров «Геометрическая точность высоты» (GVA) и «Категория навигационной целостности для барометрической высоты» (NIC<sub>BARO</sub>)<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> EUROCONTROL standard document for surveillance data exchange part 12: Cat 021 ADS-B messages vol SUR.ET1.ST05.2000-STD-12-01. EUROCONTROL, Brussels, 2003.

Код целостности барометрической высоты «NIC<sub>BARO</sub>» содержит информацию о проверке соответствия данных барометрической высоты со значениями, полученными от другого источника барометрической высоты. При выполненной проверке и соответствии данных, значение кода устанавливается в единицу. Время проверки соответствия не должно превышать 2 с.<sup>3</sup>

Таблица 1 – Декодирование параметра NIC<sub>BARO</sub>

Код	Описание
0	Передаваемая барометрическая высота не подвергалась перекрестной проверке с другим источником
1	Передаваемая барометрическая высота была перепроверена с другим источником и проверена на соответствие

Для подтверждения данных о давлении в модифицированной методике производится проверка состояния параметра NIC<sub>BARO</sub>, который может принимать два значения: 0 и 1 (табл. 1). При этом выполняется произведение значения показателя качества NIC<sub>BARO</sub> и рассчитанной по давлению, с учетом параметров реальной атмосферы, высоты полета ВС:

$$H_{\text{реал.атм}} = \text{NIC}_{\text{BARO}} \cdot H_{\text{реал}} \quad (1)$$

Параметр «GVA» декодируется в соответствии с требованиями документа<sup>3</sup>. Подполе «Геометрическая вертикальная точность (GVA)» устанавливается с использованием вертикального показателя качества (VFOM) (95%) из источника местоположения GNSS, используемого для кодирования поля геометрической высоты в сообщении о местоположении в воздухе. Кодировка представлена числовым значением от 0 до 3. Значения 1 и 2 соответствуют точности  $\leq 150$  и  $\leq 45$  м, соответственно. Значение 0 устанавливается, когда значение точности либо неизвестно, либо точность превышает 150 м.<sup>3</sup>

Передаваемая приемником ГНСС системы АЗН-В геометрическая высота ВС определяется как превышение над эллипсоидом WGS-84<sup>3</sup>. Барометрическая высота ВС определяется относительно уровня MSL. В вертикальной плоскости ошибки эллипсоида WGS-84 относительно уровня MSL варьируются от –100 до +70 м [Use of Barometric Altitude ..., 2012].

При сравнении данных о высоте необходима единая точка отсчета. Лучшим приближением к MSL является геоид [Use of Barometric Altitude ..., 2012]. В предложенной методике все высоты приводятся к уровню MSL.

Для точки, соответствующей координатам ВС, при подтверждении данных необходимо определить волну геоида (N).

Эллипсоидальная высота на заданной широте и долготе равна сумме ортометрической высоты и высоты геоида [Find Ellipsoidal..., s.a.]. Высота над геоидом (H) может быть определена как разность высоты над эллипсоидом (h) и

высоты геоида ( $N$ ) в точке с координатами ВС, полученными из сообщения АЗН-В [Find Ellipsoidal..., s.a.):

$$H = h - N \quad (2)$$

Высота полета ВС, рассчитанная для реальной атмосферы, будет отличаться от барометрической высоты [Taib et al., 2016], которая согласно ИКАО получена в соответствии с Международной стандартной атмосферой (ISA)<sup>7</sup>.

Атмосферное давление на высотах полета ВС до 11 000 м, определяется по методике, описанной в работе [Подтверждение достоверности..., 2023] и в соответствии с ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная, параметры» по формуле:

$$P = P_0 \cdot \theta^{\left(\frac{g_c}{L \cdot R}\right)}, \quad (3)$$

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 ( $287,0531 \frac{Дж}{кг \cdot К}$ );

$\theta = T/T_0$ , где  $T = T_0 - L \cdot h$ ;

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

$g_c$  – стандартное ускорение свободного падения;

$h$  – барометрическая геопотенциальная высота ВС.

Высота ВС может быть определена с помощью полной барометрической формулы (Лапласа) [Таблицы физических величин..., 1976]:

$$z_2 - z_1 = 18400 \left(1 + C_1 t_{cp}\right) \left[1 + C_2 \left(\frac{e}{P}\right)_{cp}\right] (1 + C_3 \cos 2\varphi) (1 + C_4 z_{cp}) \lg \left(\frac{P_1}{P_2}\right), \quad (4)$$

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, °С;

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

в воздухе к атмосферному давлению;

$z_{cp}$  – средний уровень в слое, м;

$\varphi$  – широта места;

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

<sup>7</sup> Manual of the ICAO standard atmosphere. Doc. 7488/3, 1993. 305 p.

Для приведения температуры к уровню моря (MSL), согласно ISA<sup>7</sup>, используется температурный градиент равный -6,5 К/км. Приведение температуры к уровню MSL выполняется по формуле<sup>7</sup>:

$$t_b = t_z - \beta H, \quad (5)$$

где  $t_z$  – температура воздуха на уровне станции, °С;

$t_0$  – температура воздуха на уровне MSL, °С;

$H$  – высота превышения метеостанции, м;

$\beta$  – вертикальный температурный градиент, -0,0065°С/м.

При подтверждении данных АЗН-В ВС следует использовать фактические значения температуры у земной поверхности и давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере QNH (METAR), либо по реальной QFF. Давление QFF является предпочтительным и может быть получено от метеослужбы.

В качестве источника данных о давлении могут быть использованы карты барической топографии, кольцевые карты и т.д. При отсутствии доступа к данным карт барической топографии, кольцевым картам, возможно определение градиента следующим способом. Примем, что давление на метеостанциях измеряется практически одновременно. Для двух точек с приведенными к уровню MSL давлениями выполняется линейная интерполяция значений давления. Таким образом, мы имеем горизонтальный градиент давления между двумя точками выполнения полетов.

Важным отличием предложенной модифицированной методики от методики [Подтверждение достоверности..., 2023] является приведение давления, температуры и геометрической высоты АЗН-В к общему уровню MSL. Использование общего уровня MSL позволяет выполнить подтверждение данных в некоторой области выполнения полетов.

Сводки METAR и SPECI содержат информацию о температуре точки росы<sup>8</sup>, которая является характеристикой влагосодержания воздуха. Парциальное давление водяного пара на станции, может быть получено по эмпирической формуле Магнуса [Матвеев, 2000; Связов и др., 2018]:

$$e = E_0 10^{\frac{a\tau}{b+\tau}} \quad (6)$$

где  $E_0 = 6,1078$  гПа – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха 0 °С;

$\tau$  – температура точки росы, °С;

$a=7,63$ ;  $b=241,9$ ; °С – коэффициенты для расчета парциального давления над поверхностью чистой воды;

$a=9,6$ ;  $b=265,5$ ; °С – коэффициенты для расчета парциального давления над поверхностью чистого льда.

---

<sup>8</sup> Федеральные авиационные правила «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов»: утв. Приказом Минтранса РФ № 60 от 3 марта 2014 г.

На основании наблюдений для различных районов установлено, что парциальное давление паров воды убывает с высотой [Задачник..., 1984]. Упругость водяного пара на высоте  $z$  может быть найдена по формуле [Задачник..., 1984]:

$$e_z = e_0 10^{-k(t_0-t)} \quad (7)$$

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.

Для равнинной местности с небольшими высотами превышения, учитывая малость изменения величины  $e_z$  при приведении к уровню MSL, приведением  $e_z$  к уровню MSL можно пренебречь. В методике парциальное давление рассчитывается для уровней полета ВС и метеостанции.

Температура воздуха прогнозируется метеослужбой для абсолютных высот (AMSL): 600, 1500 и 3000 (4500) м, а также на других высотах по запросу<sup>8</sup>. Следовательно, средняя температура слоя может быть найдена с помощью прогнозов метеослужбы.

Для учета действующей температуры в точке ВС и других параметров атмосферы выполнена модификация методики [Подтверждение достоверности..., 2023]. Модифицированная методика предполагает применение реальных значений температуры в точке расположения ВС, которая может быть вычислена, либо получена из передаваемых в сообщении АЗН-В данных.

### **Определение температуры по данным АЗН-В**

В приложении документа RTCA<sup>3</sup> приведена формула, связывающая скорость изменения вертикального давления с вертикальной скоростью<sup>3</sup>:

$$\frac{\partial H_p}{\partial t} = \left( \frac{T_{sd(hp)}}{T_{actual}} \right) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

где  $T_{sd(hp)}$  – статическая температура стандартной атмосферы на барометрической высоте  $hp$ ;

$T_{actual}$  – фактическая или измеренная температура на барометрической высоте  $hp$ , полученная по данным радиозондовых измерений или радиопередач MET с одного или нескольких самолетов в полете.

Согласно RTCA<sup>3</sup> приведенное уравнение может использоваться пользователем АЗН-В для преобразования геометрической скорости в скорость барометрической высоты или наоборот.

В соответствии с требованиями RTCA<sup>3</sup> в состав сообщения АЗН-В включают значения геометрической или барометрической скорости. Однако, эти параметры передаются с разрешением 64 фут/мин. Барометрическая и

геометрическая скорости могут быть определены дифференцированием соответствующей высоты. Выразим температуру из выражения (8), тогда:

$$T_{actual} = T_{sd(hp)} \left( \frac{\frac{\partial h}{\partial t}}{\frac{\partial H_p}{\partial t}} \right) \quad (9)$$

Данные геометрической и барометрической высот, в соответствии с требованиями RTCA<sup>3</sup>, передаются с разрешением 25 футов<sup>3</sup>.

С целью снижения влияния дискретности передаваемых значений высот, элементы вектора полученных данных о соответствующих высотах ВС, сглаживаются методом скользящего среднего.

Результатом вычислений по формуле (9) являются мгновенные значения температуры в точке движения ВС, что подразумевает необходимость усреднения полученных результатов. Следующим шагом выполняется удаление аномальных значений температуры. Полученные данные усредняются методом скользящего среднего с фиксированным размером окна.

Необходимо подчеркнуть, что предложенный метод оценки температуры по данным барометрической и геометрической высот применим только к данным АЗН-В, полученным от ВС, выполнившего взлет или посадку. Используются данные геометрической и барометрической высот, обработанные в соответствии с Протоколом ASTERIX<sup>6</sup>.

### **Коррекция температуры на высоте по данным АЗН-В, полученным при выполнении набора высоты или снижении ВС**

Для ВС, выполнившего взлет и набор высоты, при наличии требуемого количества данных, по формуле (9) выполняется вычисление температурного профиля от 300 м до Н<sub>В</sub>. При этом Н<sub>В</sub> на 15% меньше высоты горизонтального полета ВС. Прогнозы температуры на высотах нижележащих слоев корректируются на значения, полученные по данным АЗН-В.

Для ВС, вошедшего в зону МДП или МВЛ, при отсутствии данных о температурном профиле, используются прогнозные значения.

При наличии данных, полученных от нескольких ВС, осуществивших взлет или посадку, коррекция прогнозных значений выполняется по накопленным и усредненным данным температуры на высотах, с использованием метода наименьших квадратов (далее МНК).

### **Определение температуры по данным АЗН-В при выполнении горизонтального полета ВС**

Согласно техническим положениям ИКАО<sup>9</sup>, для повышения информационной осведомленности передается дополнительная информация, в

---

<sup>9</sup> Технические положения, касающиеся услуг режима S и расширенного сквиттера. Doc. 9871 AN/460. ИКАО. Издание второе, 2012. 352 с.

том числе данные о воздушной скорости – TAS (True Air Speed, истинная воздушная скорость), IAS (Indicated Air Speed, приборная скорость).

В соответствии с требованиями RTCA<sup>3</sup> ЛПД 1090 ES поддерживает передачу данных воздушных скоростей TAS и IAS. В настоящее время эта информация передается в сообщениях АЗН-В версий 0,1 и 2 только в случае невозможности получения от бортовых систем данных о скорости относительно земной поверхности<sup>3</sup>. В ситуации отсутствия данных наземного вектора скорости необходимо иметь дополнительную информацию о геометрической высоте и способ подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В (при восстановлении работоспособности источника данных) для проверки корректности работы оборудования.

В приложении документа RTCA<sup>3</sup> обсуждается потенциальная широкополосная передача сведений о векторе воздушной скорости в стандартном режиме АЗН-В: передача вектора воздушной скорости будет осуществляться поочередно с вектором наземной скорости, но с меньшей частотой. Для повышения и соответствия частоты получаемых данных следует использовать треугольник скоростей<sup>3</sup>.

При передаче одной из скоростей (TAS или IAS), вторая может быть получена с использованием треугольника скоростей<sup>3</sup>.

IAS для несжимаемого потока ( $M < 0,3$ ), при условии отсутствия ошибок приборов и положения, может быть найдена как [Gracey, 1980]:

$$IAS = \sqrt{\frac{2(P_{TOTAL} - P_{STATIC})}{\rho_0}} \quad (10)$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха на уровне моря (ISA  $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ );

$P_{TOTAL} - P_{STATIC} = q$  – разность давлений (динамическое давление), измеряемая трубкой Пито;

$P_{TOTAL} = P_{STATIC} + q$ , где  $P_{TOTAL}$  – общее давление;

$P_{STATIC}$  – статическое давление (атмосферное давление в точке полета ВС);

$q$  – динамическое давление.

Тогда динамическое давление равно [Gracey, 1980]:

$$q = \frac{1}{2} \rho_0 IAS^2 \quad (11)$$

Для значений  $M > 0,3$  необходимо учитывать свойства сжимаемости потока, ошибки положения и инструментальные ошибки [Gracey, 1980; Lowry, 1999].

Для перевода IAS в CAS (Calibrated airspeed, калиброванная воздушная скорость) используют специальные таблицы, которые обычно содержатся в руководстве по эксплуатации пилота (РОН). С использованием таблицы может быть определена скорость CAS из скорости IAS [True Airspeed..., s.a.].

Примем, что решаемая задача удовлетворяет условиям: подтверждение данных АЗН-В выполняется для прямолинейного и горизонтального движения ВС, скорости TAS IAS передаются поочередно, при этом в АС УВД содержится информация о ВС и его характеристиках, в том числе таблица перевода IAS в

CAS. Тогда можем принять, что на стороне АС УВД может быть рассчитана скорость CAS<sup>3</sup> [Lowry, 1999]:

$$CAS = \sqrt{\frac{2\gamma P_0}{(\gamma-1)\rho_0} \left[ \left( \frac{q}{P_0} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (12)$$

где  $\gamma$  – отношение удельных теплоемкостей ( $\gamma = c_p/c_v$ );

$P_0$  – давление на уровне моря (Н/м<sup>2</sup>).

Выразим из формулы CAS динамическое давление  $q$  приняв  $\gamma = \frac{1}{4}$  [Lowry, 1999]:

$$q = P_0 \cdot \left( \left[ \frac{\left( \frac{CAS}{a_0} \right)^2}{5} + 1 \right]^{\frac{7}{2}} - 1 \right) \quad (13)$$

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

Число Маха с использованием значения динамического давления в дозвуковом сжимаемом потоке может быть найдено как [Lowry, 1999]:

$$M = \sqrt{5 \left[ \left( \frac{q}{P} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (14)$$

где  $P$  – давление в точке полета ВС.

Согласно RTCA<sup>3</sup>, TAS может быть определена по формуле:

$$TAS = a_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} M, \quad (15)$$

где  $M$  – число Маха;

$T$  – температура воздуха окружающей среды.

Температура воздуха на высоте полета ВС может быть выражена из формулы TAS:

$$T = T_0 \left( \frac{TAS}{a_0 M} \right)^2, \quad (16)$$

Эквивалентная воздушная скорость EAS (Equivalent airspeed) может быть найдена как [Lowry, 1999]:

$$EAS = \sqrt{\frac{2\gamma P}{(\gamma-1)\rho_0} \left[ \left( \frac{q}{P} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}, \quad (17)$$

EAS также может быть выражена через скорость TAS [Lowry, 1999]:

$$EAS = TAS \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad (18)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха в точке ВС (Actual air Density).

Тогда плотность воздуха в точке ВС  $\rho$  можно выразить как:

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{EAS}{TAS} \right)^2 \quad (19)$$

Введя виртуальную температуру в уравнение состояния влажного воздуха можно получить его плотность<sup>10</sup>:

$$\rho = \frac{P}{RT_v} \quad (20)$$

где  $P$  – давление в точке ВС.

Тогда, зная плотность воздуха в точке ВС ( $\rho$ ), виртуальная температура может быть найдена как:

$$T_v = \frac{P}{\rho R} \quad (21)$$

Виртуальная температура может быть определена по формуле<sup>10</sup>:

$$T_v = T \left( 1 + 0,378 \frac{e}{P} \right) \quad (22)$$

где  $T$  – температура в точке ВС.

$e$  – парциальное давление водяного пара в точке ВС.

Парциальное давление в точке ВС может быть выражено из формулы (22):

$$e = \left( \frac{T_v - T}{0,378} \right) \cdot \frac{P}{T} \quad (23)$$

В зависимости от имеющихся данных АЗН-В, полученных от ВС, при выполнении подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В, возможны следующие варианты:

1. С борта ВС по ЛПД 1090ES поступают стандартные данные АЗН-В (информация о значениях воздушных скоростей TAS и IAS отсутствует);

2. С борта ВС по ЛПД 1090ES поступают данные АЗН-В, содержащие информацию о значениях воздушных скоростей TAS и IAS.

В первом случае, в соответствии с модифицированной методикой, подтверждение данных геометрической высоты АЗН-В выполняется с использованием полной формулы Лапласа и с учетом коррекции прогнозных значений (при наличии требуемого количества данных).

Во втором случае, по данным сообщений о воздушной скорости (TAS/IAS) выполняется вычисление требуемых параметров атмосферы с применением модифицированной методики, включающей коррекцию температуры и учет парциального давления в точке полета ВС. Следующим шагом выполняется подтверждение данных с использованием полной формулы Лапласа.

## Передача данных о температуре

<sup>10</sup> 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.

Документ RTCA DO-260C<sup>4</sup> содержит требования к АЗН-В версии 3. В настоящее время, сертифицируемое в Российской Федерации оборудование НС АЗН-В имеет возможность приема и обработки сообщений АЗН-В версии 3. Третья версия АЗН-В еще не получила широкого распространения среди пользователей воздушного пространства, однако со временем количество ВС, оборудованных транспондерами АЗН-В версии 3 будет только расти.

Данные о погоде АЗН-В (ADS-B Wx) являются дополнительной функцией АЗН-В версии 3. ADS-B Wx AIREP обеспечивает передачу метеоданных, полученных на ВС, в автоматическом режиме и на регулярной основе<sup>5</sup>.

Устройства АЗН-В с дополнительной функцией ADS-B Wx AIREP поддерживают сообщения о состоянии воздушного судна, состоянии погоды и альтернативные сообщения о состоянии погоды.

В соответствии с материалами ICAO<sup>11</sup>, сообщения АЗН-В версии 3 о состоянии погоды передаются с интервалом 2,2 сек. Согласно материалам<sup>5</sup>, сообщения о состоянии погоды включают направление и скорость ветра, воздушную скорость и температуру воздуха.

Передаваемая в сообщениях АЗН-В версии 3 температура может быть использована для подтверждения данных ГНСС.

### **Допустимый интервал и показатели качества АЗН-В**

При выполнении подтверждения данных геометрической высоты ГНСС возникает вопрос о допустимых ошибках. В качестве допустимого интервала примем величину, равную сумме допустимых ошибок параметров атмосферы и барометрического высотомера, скорректируем ее и, в дальнейшем, учтем значение параметра вертикальной точности АЗН-В.

При выполнении полетов по RVSM максимально допустимая ошибка, превышающая значение 90 м, требует проведения расследования<sup>12</sup>. В рамках модифицированной методики примем максимально допустимый интервал, равный максимально допустимой ошибке (90 м). Значение допустимого интервала сравнивается с этой величиной и не должно ее превышать.

В соответствии с документом ИКАО<sup>13</sup>, устанавливающим требования при выполнении полетов по RVSM, погрешность системы измерения высоты (ASE) любого конкретного ВС не должна превышать 275 футов<sup>13</sup>.

Примем, что значение максимально допустимой ошибки барометрического высотомера составляет 275 футов (83 м).

---

<sup>11</sup> ICAO // [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2021/ADSB/P01-OverviewADSBOut-ENG.pdf> (дата обращения: 21.08.2023).

<sup>12</sup> ICAO. Инструктивный материал по применению минимума вертикального эшелонирования в 300 м (1000 фут) в Европейском воздушном пространстве с RVSM // [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/EUR%20Documents/EUR%20Documents/009%20-%20RVSM%20Implementation%20v3/EUR%20RVSM%20Doc%20009%20-%20Version%203%20-%20Russian.pdf> (дата обращения: 21.07.2023).

<sup>13</sup> ICAO. Руководство по непрерывному мониторингу безопасности полетов в воздушном пространстве RVSM Европейского региона ИЕАО РУКОВОДСТВО // [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/EUR%20Documents/EUR%20Documents/034%20-%20Guidance%20RVSM/EUR%20Doc%200034%20-%20RU.pdf> (дата обращения: 21.07.2023).

Требования к точности прогнозов и измерений приведены в Федеральных авиационных правилах № 60<sup>8</sup>. Приведем значения СКП к одной вероятности. Вероятность того, что нормально распределенная случайная величина находится в диапазоне  $\mu \pm n\sigma$ , может быть найдена по известной формуле:

$$\text{Pr} = \text{erf}\left(\frac{n}{\sqrt{2}}\right) \quad (24)$$

Вероятности 90% соответствует 1,64 сигма. Приведем значения СКО к вероятности 95%. Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – СКП метеопараметров для вероятностей 90% и 95%

Измеряемая величина	Требование ФАП № 60 для вероятности 90%	СКП, приведенная к вероятности 95%
Давление измерения (наблюдение) QNH(QFE)	$\pm 0,5$ гПа	1,2 гПа
Температура и точка росы:	$\pm 1$ °С	2,39 °С

Для прогнозных значений температуры на высотах 300 м, 600 м, 1500 м, 3000 м в требованиях ФАП №60<sup>8</sup> указаны средние на дистанции значения. Вероятностная оценка точности прогнозов относится к области метеорологии. В контексте поставленной задачи примем суммарную СКП прогнозных значений температуры двух ближайших к высоте полета ВС слоев равным 4,5 °С.

Проанализируем значения GVA применительно к предлагаемой методике. Для параметра GVA=0, погрешность определения высоты с помощью ГНСС превышает 150 м или неизвестна, применять такие данные в методике нельзя. Следовательно, значения высоты ГНСС АЗН-В, в данном случае, являются не подтвержденными.

Для параметра GVA=1 погрешность ГНСС находится в пределах 45...150 м. Значения, близкие к верхней границе интервала, применять нецелесообразно, так как они вносят значительную неопределенность, применительно к предлагаемой методике.

С целью снижения неопределенности введем граничное значение, равное 75 м – половина верхней границы параметра GVA=1.

Для параметра GVA=2 погрешность ГНСС не превышает 45 м, что позволяет сравнивать геометрическую высоту АЗН-В ГНСС с рассчитанной по реальной атмосфере высотой. Однако, необходимо скорректировать интервал. Учет неточность данных ГНСС:

$$H_{\text{дон.}} = \sqrt{\Delta h_B^2 + M_\varepsilon^2 - \varepsilon^2} \quad (25)$$

где  $\Delta h_B$  – интервал ошибки барометрической высоты;

$M_\varepsilon^2$  – ошибка метео – ошибка измерений и прогнозирования параметров атмосферы;

$\varepsilon$  – погрешность ГНСС при значении параметра GVA=2 (45 м), либо граничное значение 75 м, при значении параметра GVA=1;

$H_{Доп.}$  – допустимый интервал, в который должна попасть разность высот.

Ошибка метео равна сумме СКП метеопараметров, приведенных для одной вероятности.

### **Методика определения максимально допустимого интервала**

1. Вычисляем по формуле Лапласа (4) высоту полета ВС, с использованием данных АЗН-В;

2. Суммируем полученные значения давления и температуры со значениями допустимых ошибок метеопараметров;

3. Вычисляем по формуле Лапласа (4) значения высоты с учетом допустимых ошибок метеопараметров;

4. Находим модуль разности высот ( $\Delta h_{Error}$ ), полученных в пунктах 1 и 3;

5. Находим максимально допустимую ошибку определения параметров температуры на высоте ( $T_{Air\_err}$ ) и переводим значение ошибки в метры, для этого:

5.1. К рассчитанным или используемым параметрам температуры на высоте добавляем нормально распределенные значения с заданным заранее, в зависимости от источника используемых данных, СКП. Ошибка принята нормально распределенной случайной величиной. Для данных температуры, полученных из сообщений воздушной скорости АЗН-В, СКП температуры задается равной  $4,1^{\circ}\text{C}$  [de Naan et al., 2013a]. Учитывая, что оценка СКП прогнозных значений температуры является сложной задачей и относится к области метеорологии, целесообразно увеличить величину СКП температуры прогнозных значений на 10% и принять ее равной  $4,5^{\circ}\text{C}$ . Для коррекции температуры по данным барометрической и геометрической высот, с учетом моделирования (сравнения полученных значений температуры и значений температуры модели прогнозирования ECMWF) примем СКП равную  $3,5^{\circ}\text{C}$ . В работе [de Naan, 2013b] для данных температуры AMDAR получено СКО равное 1 К. Принимая во внимание использование одних и тех же датчиков ВС, при определении температуры, можно предположить равную точность температур AMDAR и АЗН-В версии 3. Тогда для температуры, передаваемой в сообщении АЗН-В версии 3, примем СКП равной  $1,5^{\circ}\text{C}$ ;

5.2. Далее генерируем значения нормально распределенной величины температуры с заданным значением СКП;

5.3. С использованием сгенерированных значений температуры (п. 5.2.) Выполняем вычисления по формуле Лапласа (4) и находим разность со значениями, полученными в п.1;

5.4. Выполняем вычисление СКП величины, полученной в пункте 5.3 – величина максимально допустимой ошибки в метрах. Приводим величину СКП к вероятности 95%.

6. Находим допустимый интервал по формуле:

$$\Delta H_i = \sqrt{\Delta h_{B_i}^2 + T_{Air\_err_i}^2 + \Delta h_{Error_i}^2 - \varepsilon^2}, \quad (26)$$

$\Delta h_{Error}$  – разность высоты и допустимой ошибки;

$T_{Air\_err}$  – максимально допустимая ошибка в м, вызванная ошибкой определения параметров температуры;

Допустимый интервал принимается равным среднему значению полученной величины  $\Delta H_i$ :

$$\Delta \bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta H_i, \quad (27)$$

7. Выполняем сравнение допустимого интервала с величиной максимально допустимой ошибки (90м). Проверяем условие:

$$\Delta \bar{H} - 90 > 0 \quad (28)$$

При невыполнении условия – данные не могут быть подтверждены. При выполнении условия переходим к пункту 8.

8. Параметр  $NIC_{BARO}$  позволяет использовать только прошедшие перекрестную проверку значения барометрической высоты. Разность максимально допустимого отклонения высоты полета для реальной атмосферы и высоты ГНСС, приведенной к уровню MSL, не должна превышать рассчитанный максимально допустимый интервал:

$$\left| H_{реал.атм} - H_{ГНСС\_MSL} \right| < \Delta \bar{H} \quad (29)$$

где  $\Delta H$  – 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 от АЗН-В значениям скоростей TAS и IAS с использованием таблиц коррекции скоростей определяем значение CAS;

2. По формуле (13) находим значение динамического давления  $q$ ;

3. Зная динамическое давление  $q$  и рассчитав давление по формуле (3) с использованием формулы (14), вычисляем число Маха;

4. По полученным от АЗН-В значениям TAS, IAS и рассчитанному числу Маха находим значение температуры по формуле (16);

5. Рассчитав по формуле (17) значения скорости EAS и по полученным от АЗН-В значениям скорости TAS находим плотность воздуха в точке ВС с использованием формулы (19);

6. По формуле (22) находим значения виртуальной температуры в точке ВС;

7. По формуле (23) находим значения парциального давления в точке ВС;

8. Полученные значения применяются при выполнении подтверждения данных и являются приоритетными.

При наличии данных о температуре слоя воздуха, полученных по данным АЗН-В при наборе высоты ВС, прогнозные значения температуры на высотах корректируются на значения, полученные из сообщений, с использованием формулы (9).

**Модифицированная методика** предполагает подтверждение данных АЗН-В по следующему алгоритму:

1. По данным барометрической высоты с использованием барометрической формулы (3) получаем значение реального давления в точке полета;

2. Выполняем вычисление высоты полета с использованием полной формулы Лапласа, при этом используем давление QNH (QFF) для соответствующей площади и полученное от ВС реальное давление в точке полета;

3. Температура у поверхности земли берется по данным метеослужбы для той площади, в которой выполняется полет ВС и пересчитывается к уровню MSL. При наличии данных температуры, полученных с использованием формулы (9), прогнозные значения корректируются на реальные значения температуры для требуемых высот;

4. При отсутствии данных о воздушных скоростях TAS, IAS и числе Маха, температура в воздухе вычисляется интерполяцией прогнозных значений между двумя соседними высотами, для которых имеется прогноз. При наличии данных о температуре воздуха на высотах, полученных по формуле (9), прогнозные значения корректируются на реальные. Парциальное давление в точке ВС находим по формуле (7). При наличии данных АЗН-В о значениях TAS и IAS ВС выполняется коррекция значений температуры и парциального давления по представленной выше методике коррекции температуры. При передаче в сообщении АЗН-В (ADS-Wx) данных о температуре воздуха, используются полученные по ЛПД значения температуры;

5. Выполняется вычисление высоты слоя с использованием полной барометрической формулы Лапласа (4). Полученная высота – Нреал;

6. Находим величину допустимого интервала по представленной выше методике.

7. Находим произведение полученного от АЗН-В ВС параметра  $NIС_{BARO}$  и рассчитанного значения высоты для реальной атмосферы по формуле (1);

8. Высота ГНСС, полученная от АЗН-В, приводится к уровню моря –  $H_{ГНСС\_MSL}$ ;

9. Выполняется сравнение полученных высот. При этом модуль разности вычисленных с применением выражения (29) значений не должен превышать рассчитанный допустимый интервал.

## **Дискуссия**

Информация АЗН-В включает данные горизонтального местоположения ВС, геометрической и барометрической высоты, а также дополнительную

информацию. В работах [Kalintsev et al., 2023; Плясовских и др., 2019; Плясовских и др., 2020] рассматривается вопрос подтверждения данных горизонтального местоположения ВС. В работе [Метод..., 2023] предложено оценивать достоверность данных АЗН-В с использованием метода стробирования. Данные методы алгоритмического подтверждения данных могут быть применены для подтверждения координат ВС АЗН-В в горизонтальной плоскости на региональных аэродромах с низкой интенсивностью воздушного движения.

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.

В настоящей работе предложена модификация методики [Подтверждение достоверности..., 2023]. Модифицированная методика предполагает использование параметров атмосферы, приведенных к уровню MSL, учитывает ошибки метеопараметров атмосферы и параметры NIC BARO, GVA. Это позволяет выполнять подтверждение на некоторой территории, использовать только прошедшие перекрестную проверку данные барометрического высотомера и учитывать значения параметров качества геометрической точности АЗН-В.

Расчеты показали, что на высоте 3500 м ошибка определения температуры, равная 1, 2, 3, 4°C, ведет к ошибке определения высоты: 6,35, 12,7, 19,05, 25,40 м соответственно. Результаты моделирования в работе [Подтверждение достоверности..., 2023] также показали, что основную неопределенность при выполнении вычислений вносит температура в точке ВС. Для повышения точности в настоящей работе предложено использовать температуру, полученную косвенно, по передаваемым в составе сообщения АЗН-В параметрам полета ВС: барометрической и геометрической высотам, а также данным сообщения о воздушной скорости.

Предложенная модифицированная методика аналогично методике [Подтверждение достоверности..., 2023] предполагает коррекцию параметров атмосферы по данным метеозондов.

В дальнейшем следует разработать механизм определения больших отклонений для определяемых данных температуры по передаваемым в стандартном сообщении АЗН-В значениям геометрической и барометрической высот. Точность метода может быть повышена использованием модели движения ВС, учитывающей его характеристики.

В настоящее время стандарт АЗН-В версий 0, 1 и 2 подразумевает передачу сообщений о курсе и векторе воздушных скоростей<sup>3</sup>. Однако, сообщения с информацией данного типа передаются при отсутствии данных о векторе наземной скорости. В такой ситуации представляется важным иметь данные о достоверности получаемой информации о местоположении ВС, в частности о высоте ВС. Предложенная методика коррекции температуры позволяет повысить точность подтверждения данных геометрической высоты АЗН-В.

В работе [Калинцев и др., 2021] предложено использовать запросчик режима S совместно со станцией АЗН-В, что позволит получать по запросу данные о воздушной скорости и числе Маха. Существующее оборудование АЗН-В версии 3 поддерживает передачу данных температуры и воздушной скорости<sup>5,11</sup>. Следует подчеркнуть, что в настоящее время в РФ, сертифицируемое наземное оборудование АЗН-В имеет возможность приема и обработки данных АЗН-В версии 3. Увеличение парка ВС с оборудованием АЗН-В версии 3 позволит повысить точность подтверждения геометрической высоты.

### **Заключение**

В настоящей работе получена модификация методики, предложенной авторами [Подтверждение достоверности..., 2023]. В работе [Подтверждение достоверности..., 2023] указано, что наибольшую неопределенность, при выполнении подтверждения данных, вносит температура воздуха на высотах выполнения полетов. Выполненные расчеты показали, что для высоты 3500 м ошибка определения температуры 3 и 4°C вносит погрешность определения высоты 19,05 и 25,40 м соответственно. В первоначальной методике при определении температуры в точках полета ВС использовалась интерполяция прогнозных значений температуры на высотах, получаемых от метеослужбы, а также, в случае доступности данных, интерполяция значений от метеозондов.

В предложенной модифицированной методике при определении температуры, в зависимости от типа доступных данных, используются прогнозные значения от метеослужбы, значения, полученные по данным воздушных скоростей, передаваемых в сообщениях АЗН-В при отсутствии данных о наземном векторе, значения температуры, полученные по данным геометрической и барометрической высоты, передаваемые в стандартном сообщении АЗН-В для ВС, выполняющих взлет или посадку.

Методика получения данных температуры по данным геометрической и барометрической высот, в настоящее время, может быть использована для получения данных температуры на высотах в качестве дополнительного источника, на аэродромах МВЛ с небольшой метеорологической инфраструктурой.

Предложенная в данной работе модифицированная методика подтверждения геометрической высоты АЗН-В применима для подтверждения данных при выполнении полетов МВЛ. В отличие от методики [Подтверждение достоверности..., 2023], модифицированная методика позволяет выполнять подтверждение данных для определенных областей и учитывает индикатор качества высоты  $NIС_{BARO}$  и параметр геометрической точности  $GVA$ .

Использование параметра  $NIС_{BARO}$  позволяет учитывать в расчетах только подтвержденную на борту ВС информацию о давлении. Действующие значения  $TAS$  и  $IAS$  позволяют выполнить подтверждение данных АЗН-В в случае отсутствия на борту данных о наземном векторе скорости, а также определить температуру на высоте полета ВС.

Важной отличительной чертой представленной методики в сравнении с методикой [Подтверждение достоверности..., 2023] является учет ошибок

метеопараметров и итеративное вычисление допустимого интервала. Использование допустимых ошибок метеопараметров при подтверждении данных геометрической высоты АЗН-В позволит определить предельную высоту, на которой методика применима при действующих параметрах высоты, температуры и давления.

Методика может быть использована с данными АЗН-В версии 3. Следует отметить, что в настоящее время, сертифицируемое оборудование НС АЗН-В, имеет возможность приема и обработки сигналов АЗН-В версии 3.

Представленная работа состоит из двух частей. В настоящей части разработана модифицированная методика, основанная на разработках [Подтверждение достоверности..., 2023]. Во второй части будут представлены результаты моделирования применения методики с использованием реальных данных метеопараметров и сообщений АЗН-В.

### Библиографический список

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.* Подтверждение данных АЗН-В в аэродромной зоне методом стробирования / А. С. Калинцев, Е. А. Рубцов, А. П. Плясовских // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 7. С. 39-49. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-7-39-49. EDN RIWKIN.

*Матвеев Л. Т.* Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 780 с.

Метод стробирования данных АЗН-В и его вероятностные модели / Е. А. Рубцов, С. А. Кудряков, Я. М. Далингер, А. С. Калинцев // Научный Вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2023. Т. 26, № 4. С. 50-63. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-50-63. EDN LWXHZS.

*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-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 3. С. 32-40. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-3-32-40. EDN JWKBQM.

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. EDN MWAEJQ.

*Связов Е. М.* Прогноз и восстановление давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере, с использованием гидродинамических моделей и фактических данных приземных метеорологических наблюдений / Е.М. Связов, А.С. Глотова // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2018. Т. 28. № 4. С. 441-446. EDN YRJKCT.

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.

*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.

Find Ellipsoidal Height from Orthometric Height // Mathworks // [Электронный ресурс]. – URL: <https://uk.mathworks.com/help/map/ref/egm96geoid.html> (дата обращения: 18.04.2023).

Gracey W. Measurement of Aircraft Speed and Altitude. NASA Reference Publication 1046. 1980. 308 p.

Kalintsev A. Application of ADS-B for Providing Surveillance at Civil Aviation Regional Aerodromes / A. Kalintsev, E. Rubtsov, N. Povarenkin // Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation. Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. pp. 371-382.

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

Taib N. A. An Analysis of Geometric Altitude Data in ADS-B Messages / N. A. Taib, B. S. Ali // Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. 2016. pp. 697-704.

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

Use of Barometric Altitude and Geometric Altitude Information in ADS-B Message for ATC Applications," presented at the The Eight Meeting Of The Southeast Asia and Bay of Bengal Sub-Regional ADS-B Implementation Working Group (SEA/BOB ADS-B WG/8) Provisional Agenda, Yangon, Myanmar, 2012. 4 p.

### References

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. 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.

Find Ellipsoidal Height from Orthometric Height. *Mathworks*. Available at: <https://uk.mathworks.com/help/map/ref/egm96geoid.html> (accessed 18 April 2023).

Gracey W. (1980). Measurement of Aircraft Speed and Altitude. NASA Reference Publication 1046, 1980. 308 p.

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)

Kalintsev A., Rubtsov E., Povarenkin N. (2022). Application of ADS-B for Providing Surveillance at Civil Aviation Regional Aerodromes. *Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. 371-382.

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

Matveev L. T. (2000). Atmospheric physics. Saint Petersburg: *Gidrometeoizdat*, 2000.780 p. (in Russ.).

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*. 1(36): 118-133. DOI 10.51955/2312-1327\_2023\_1\_118. (in Russian)

Rubtsov E. A., Kudryakov S. A., Dalinger I. M., Kalintsev A. S. (2023). ADS-B data gating technique and its probabilistic models. *Civil Aviation High Technologies*. 26(4): 50–63. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-50-63.

Sviyazov E. M., Glotova A. S. (2018) The forecast and recovery of sea-level standard pressure, using hydrodynamic models and actual data of surface meteorological observations. *Vestnik Udmurt University*. 28(4): 441-446. (in Russian)

Taib N. A. Ali B. S. (2016). An Analysis of Geometric Altitude Data in ADS-B Messages. *Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, 2016. 697-704.

True Airspeed from Indicated Airspeed Calculation. *Mathworks*. Available at: <https://uk.mathworks.com/help/aeroblks/true-airspeed-from-indicated-airspeed-calculation.html> (accessed 18 April 2023).

Use of Barometric Altitude and Geometric Altitude Information in ADS-B Message for ATC Applications," presented at the The Eight Meeting Of The Southeast Asia and Bay of Bengal Sub-Regional ADS-B Implementation Working Group (SEA/BOB ADS-B WG/8) Provisional Agenda, Yangon, Myanmar, 2012. 4 p.