

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ БАРОМЕТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ МЕХАНИЧЕСКИМ АЛЬТИМЕТРОМ И СИСТЕМОЙ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ

В.И. Панферов^{1, 2}, С.В. Панферов², А.М. Хаяутин¹, Н.А. Тренин¹, К.В. Яцук¹

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск, Россия,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Для безопасности и повышения эффективности обработки полетных заданий необходима достоверная информация о высотно-скоростных параметрах воздушного судна (ВС). В связи с этим задача изучения особенностей и совершенствования характеристик существующих измерителей данных параметров является вполне актуальной. **Цель исследования:** рассмотреть особенности определения барометрической высоты ВС механическим указателем и системой воздушных сигналов (СВС). **Материалы и методы.** Проанализировано существование барометрического метода измерения высоты ВС, установлено, что для построения отчетливой теории метода обязательно нужно знать зависимость температуры атмосферы от высоты $T = T(h)$. При этом известно, что эта температура обычно убывает с ростом высоты. Однако скорость убывания непредсказуемо меняется как в различное время года и суток, так и в разных пунктах и на разных высотах. Более того, в некоторых случаях в определенном диапазоне высот температура может не убывать, а, наоборот, возрастать. В связи с этим существует некоторая проблема с формализацией этой зависимости. При построении теории метода для механических указателей поступают так, что используют зависимость $T = T(h)$ для международной стандартной атмосферы (МСА), в которой температура и давление однозначно связаны. При разработке алгоритмического обеспечения СВС считают, что температура с высотой убывает так же, как и в стандартной атмосфере, но фактическое ее значение на уровне плоскости начала отсчета может быть любым, совсем не связанным с давлением и высотой в МСА. Для этого в СВС предусматривается датчик температуры на уровне плоскости начала отсчета высоты. **Результаты.** Получена формула, позволяющая определять различие показаний механического высотомера и СВС. Установлено, что данная разность является функцией давления и температуры на уровне плоскости начала отсчета высоты, а также и фактического давления на высоте полета. Проведены численные исследования, позволяющие оценить расхождение показаний. Установлено, что относительная разность показаний может достигать в эксплуатационных условиях порядка $\approx 10\%$, причем она практически не зависит от высоты ЛА и является, по существу, константой для указанных начальных значений давления и температуры (на уровне плоскости начала отсчета высоты). **Заключение.** Разработанные алгоритмы могут быть использованы при совершенствовании алгоритмического обеспечения СВС.

Ключевые слова: барометрическая высота, система воздушных сигналов, механический высотомер, разность показаний, градуировочная зависимость.

Актуальность

Достоверные данные о барометрической высоте, вертикальной скорости, приборной и истинной воздушной скоростях, углах атаки и скольжения позволяют повысить как качество управления летательным аппаратом, так и безопасность его эксплуатации. Поэтому задача исследования особенностей и совершенствования характеристик средств измерения высотно-скоростных параметров, в том числе и измерителей барометрической высоты, является вполне актуальной [1–18].

Постановка задачи

Одним из высотно-скоростных параметров воздушного судна (ВС) является его барометрическая высота. Как известно, определяется эта величина механическим высотомером и системой воздушных сигналов (СВС), исследованию и совершенствованию характеристик которых посвя-

щено большое число работ [1–18]. Причем при конструировании этих измерителей используются как несколько разные допущения, так и в связи с этим различные технические средства [19–21]. Поэтому показания измерителей различаются и достаточно интересно выяснить, как, в каких пределах изменяется это различие, а также и то, какие факторы влияют на это различие.

Решение поставленной задачи

Хорошо известно, что температура атмосферного воздуха обычно убывает с ростом высоты. Но при этом скорость этого убывания непредсказуемо меняется как в различное время года и суток, так и в разных пунктах и на разных высотах. Более того, в некоторых случаях в определенном диапазоне высот температура может не убывать, а, наоборот, возрастать. Таким образом, почти всегда зависимость температуры T от высоты h , то есть $T = T(h)$ неизвестна, да и непрерывно меняется. Вместе с тем при построении теории барометрических высотомеров обязательно необходимо принять какую-то вполне определенную зависимость $T = T(h)$, обычно используют зависимость $T = T(h)$ для международной стандартной атмосферы (МСА) [19–21]. Это, так сказать, «средняя» зависимость, среднее состояние атмосферы. На высотах до 11 000 м эту зависимость представляют следующей формулой

$$T = T_0 - \gamma(h - h_0), \quad (1)$$

где T_0 – температура воздуха на высоте h_0 ; $\gamma = 0,0065$ К/м – градиент температуры.

Используя эту формулу, получили, что зависимость барометрического давления от высоты представляется соотношением [19]

$$p = p_0 \left\{ 1 - \frac{\gamma(h - h_0)}{T_0} \right\}^{\uparrow \left(\frac{g}{\gamma R} \right)}. \quad (2)$$

Здесь знак \uparrow означает возведение в степень.

Разрешая данное уравнение относительно h , установили, что, измеряя атмосферное давление, относительную высоту воздушного судна $(h - h_0)$, можно вычислить по следующему уравнению

$$h - h_0 = \frac{T_0}{\gamma} \left\{ 1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\uparrow \left(\frac{\gamma R}{g} \right)} \right\}. \quad (3)$$

Данная формула и используется при градуировке барометрических измерителей высоты – механических высотомеров и систем воздушных сигналов (СВС) [19–21]. Однако при этом необходимо иметь в виду следующее.

Как видно из формулы (3), для определения барометрической высоты нужно знать как давление p_0 на уровне плоскости начала отсчета этой величины, так и температуру воздуха T_0 на этом уровне. Но в конструкции механического высотомера имеется только задатчик p_0 (так называемая кремальера), а задатчика температуры нет. Вместе с тем, как это следует из (3), T_0 в любом случае необходимо как-то указывать. Как нам представляется, в механическом высотомере T_0 определяется по взаимозависимости давления и температуры для стандартной атмосферы – по указанному давлению p_0 . Эта зависимость, как известно, имеет вид

$$\left(\frac{p_0}{101325} \right) = \left(\frac{T_0}{288,1} \right)^{\uparrow \left(\frac{g}{\gamma R} \right)} \Rightarrow T_0 = 288,1 \left(\frac{p_0}{101325} \right)^{\uparrow \left(\frac{\gamma R}{g} \right)}. \quad (4)$$

Поэтому итоговая градуировочная зависимость для механического высотомера будет следующей:

$$\begin{aligned} h - h_0 &= \frac{288,1}{\gamma} \left(\frac{p_0}{101325} \right)^{\uparrow \left(\frac{\gamma R}{g} \right)} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\uparrow \left(\frac{\gamma R}{g} \right)} \right] = \\ &= \frac{288,1}{\gamma} \left[\left(\frac{p_0}{101325} \right)^{\uparrow \left(\frac{\gamma R}{g} \right)} - \left(\frac{p}{101325} \right)^{\uparrow \left(\frac{\gamma R}{g} \right)} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

У современных цифровых СВС имеется как датчик p_0 , так и датчик T_0 , т. е. имеется возможность указывать как действительное значение давления, так и действительное значение температуры на уровне плоскости начала отсчета высоты, т. е. СВС работает напрямую по соотношению (3) [19–21]. Однако при этом по-прежнему считается, что далее с ростом высоты температура изменяется также как и в стандартной атмосфере, т. е. в СВС по-прежнему «считается», что градиент температуры $\gamma = 0,0065$ К/м, что в реальных условиях может быть совсем не так.

Таким образом, объективно существует различие показаний барометрической высоты механического альтиметра и СВС.

Учитывая уравнения (3) и (5), нетрудно показать, что различие показаний относительной высоты $(h - h_0)$ механического высотомера и СВС можно вычислить по соотношению

$$\delta = \frac{288,1}{\gamma} \left[\left(\frac{p_0}{101325} \right)^{\uparrow \left(\frac{\gamma R}{g} \right)} - \left(\frac{p}{101325} \right)^{\uparrow \left(\frac{\gamma R}{g} \right)} \right] - \frac{T_0}{\gamma} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\uparrow \left(\frac{\gamma R}{g} \right)} \right] = f(p_0, T_0, p). \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), разность показаний δ является функцией указанного для механического альтиметра и СВС значения p_0 , T_0 , указанного только для СВС, и фактического давления на высоте полета p .

Численный анализ разности показаний

На рис. 1 приведены кривые зависимости разности показаний относительной высоты $(h - h_0)$ механическим высотомером и СВС от величины атмосферного давления p для $p_0 = 101325$ Па и трех значений T_0 : $T_0 = 288,1$ К (+15 °С) – верхняя кривая; $T_0 = 293,1$ К (+20 °С) – средняя кривая и $T_0 = 303,1$ К (+30 °С) – нижняя кривая.

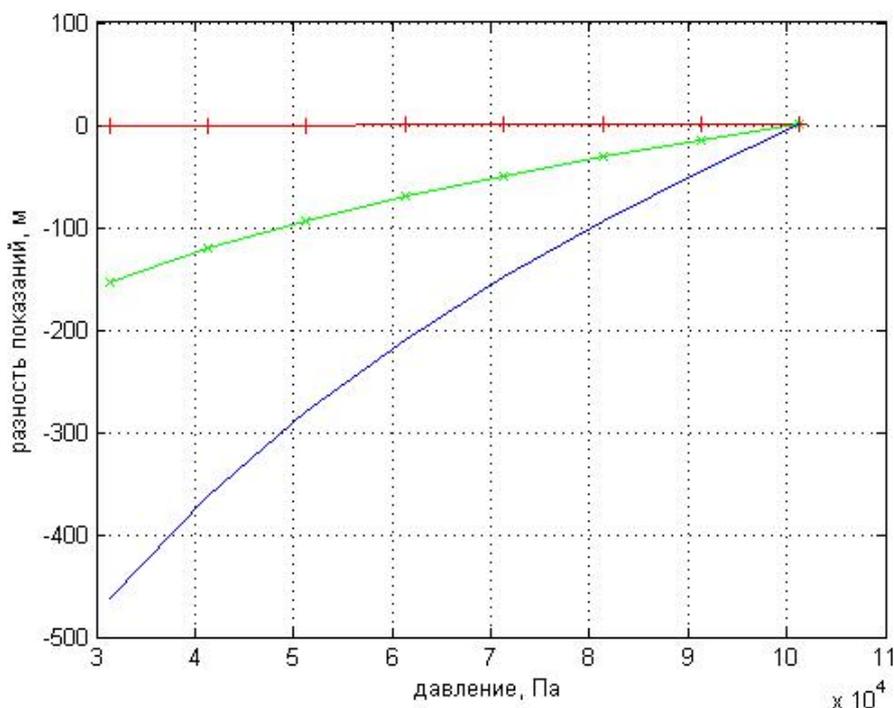


Рис. 1. Разность показаний относительной высоты $(h - h_0)$ механическим высотомером и СВС от величины атмосферного давления p для $p_0 = 101325$ Па и трех значений T_0 : $T_0 = 288,1$ К (+15 °С); $T_0 = 293,1$ К (+20 °С) и $T_0 = 303,1$ К (+30 °С)

На рис. 2 приведены кривые зависимости разности показаний относительной высоты $(h - h_0)$ механическим высотомером и СВС от величины атмосферного давления p для $p_0 = 101325$ Па и

трех значений T_0 : $T_0 = 288,1 \text{ К (+15 °C)}$ – нижняя кривая; $T_0 = 273,1 \text{ К (0 °C)}$ – средняя кривая и $T_0 = 263,1 \text{ К (-10 °C)}$ – верхняя кривая.

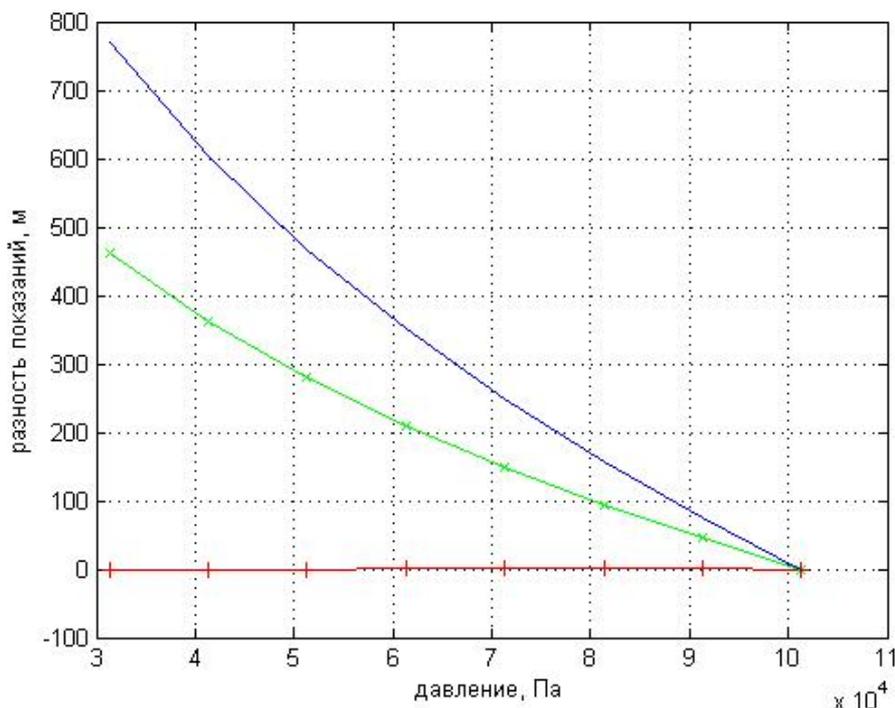


Рис. 2. Разность показаний относительной высоты ($h - h_0$) механическим высотомером и СВС от величины атмосферного давления p для $p_0 = 101\,325 \text{ Па}$ и трех значений T_0 :
 $T_0 = 288,1 \text{ К (+15 °C)}$; $T_0 = 273,1 \text{ К (0 °C)}$ и $T_0 = 263,1 \text{ К (-10 °C)}$

Как видно из рис. 1 и 2, если действительная температура воздуха на плоскости начала отсчета высоты превышает температуру для стандартной атмосферы (определяется по заданному значению p_0) для этого уровня, то механический высотомер дает заниженное по сравнению с СВС значение относительной высоты (см. рис. 1). Если же, наоборот, действительная температура атмосферного воздуха меньше, чем в стандартной атмосфере, то – завышенное значение (см. рис. 2).

Также из рис. 1 и 2 видно, что разность показаний растет по модулю с увеличением высоты (с уменьшением атмосферного давления). Кроме того, в данных случаях, если задаваемая для СВС температура атмосферного воздуха $T_0 = 288,1 \text{ К (+15 °C)}$, то при $p_0 = 101\,325 \text{ Па}$ разность показаний тождественно равна нулю $\delta \equiv 0$ на любой высоте ЛА. Это вполне понятно и объяснимо. Однако, если $p_0 \neq 101\,325 \text{ Па}$, а $T_0 = 288,1 \text{ К (+15 °C)}$, то появляется ненулевая разность показаний на разных высотах (см. верхнюю кривую на рис. 3). Здесь же на рис. 3 приведены кривые зависимости разности показаний относительной высоты ($h - h_0$) механическим высотомером и СВС от величины атмосферного давления p для $p_0 = 98\,940 \text{ Па}$ и трех значений T_0 : $T_0 = 288,1 \text{ К (+15 °C)}$ – верхняя кривая; $T_0 = 293,1 \text{ К (+20 °C)}$ – средняя кривая и $T_0 = 303,1 \text{ К (+30 °C)}$ – нижняя кривая. Как видно из рис. 3 модули разности показаний выросли по сравнению со случаем рис. 1.

На рис. 4 приведены кривые зависимости разности показаний относительной высоты ($h - h_0$) механическим высотомером и СВС от величины атмосферного давления p для $p_0 = 98\,940 \text{ Па}$ и трех значений T_0 : $T_0 = 288,1 \text{ К (+15 °C)}$ – нижняя кривая; $T_0 = 273,1 \text{ К (0 °C)}$ – средняя кривая и $T_0 = 263,1 \text{ К (-10 °C)}$ – верхняя кривая.

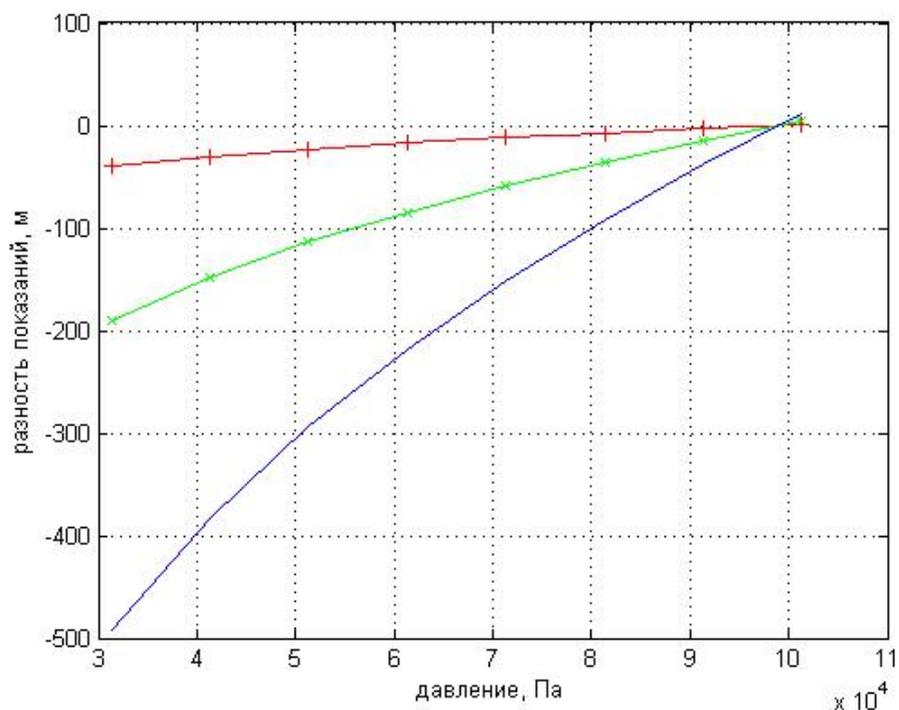


Рис. 3. Разность показаний относительной высоты ($h - h_0$) механическим высотомером и СВС от величины атмосферного давления p для $p_0 = 98\,940$ Па и трех значений T_0 :
 $T_0 = 288,1$ К (+15 °С) ; $T_0 = 293,1$ К (+20 °С) и $T_0 = 303,1$ К (+30 °С)

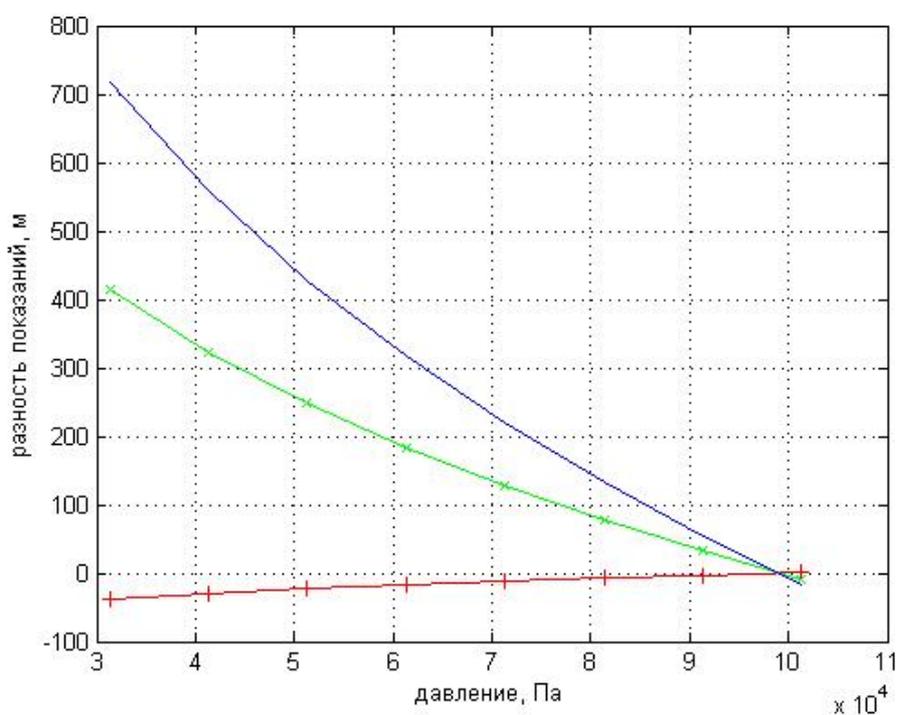


Рис. 4. Разность показаний относительной высоты ($h - h_0$) механическим высотомером и СВС от величины атмосферного давления p для $p_0 = 98\,940$ Па и трех значений T_0 :
 $T_0 = 288,1$ К (+15 °С) ; $T_0 = 273,1$ К (0 °С) и $T_0 = 263,1$ К (-10 °С)

Сравнивая рис. 2 и 4, следует заключить, что в данном случае разность показаний по модулю несколько уменьшилась по сравнению с рис. 2.

Вычислим относительную разность показаний, причем за базовое значение примем показания СВС, т. е. барометрическую высоту, вычисленную по формуле (3). Для примера на рис. 5 и 6 приведены кривые относительной разности показаний для случаев рис. 3 и 4 соответственно.

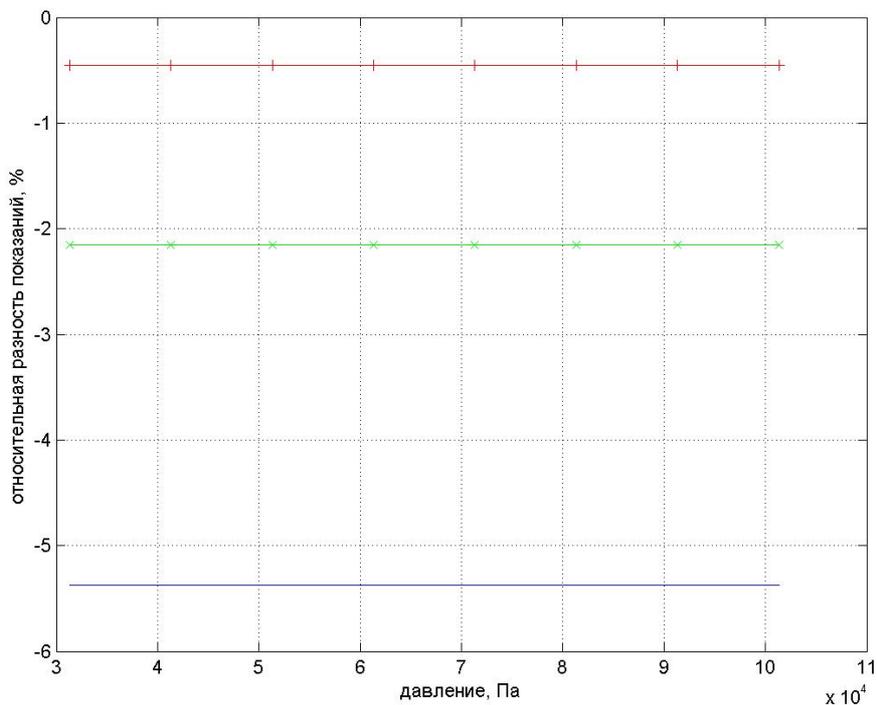


Рис. 5. Относительная разность показаний механического высотомера и СВС от величины атмосферного давления p для $p_0 = 98\,940$ Па и трех значений T_0 :
 $T_0 = 288,1$ К (+15 °С) ; $T_0 = 293,1$ К (+20 °С) и $T_0 = 303,1$ К (+30 °С)

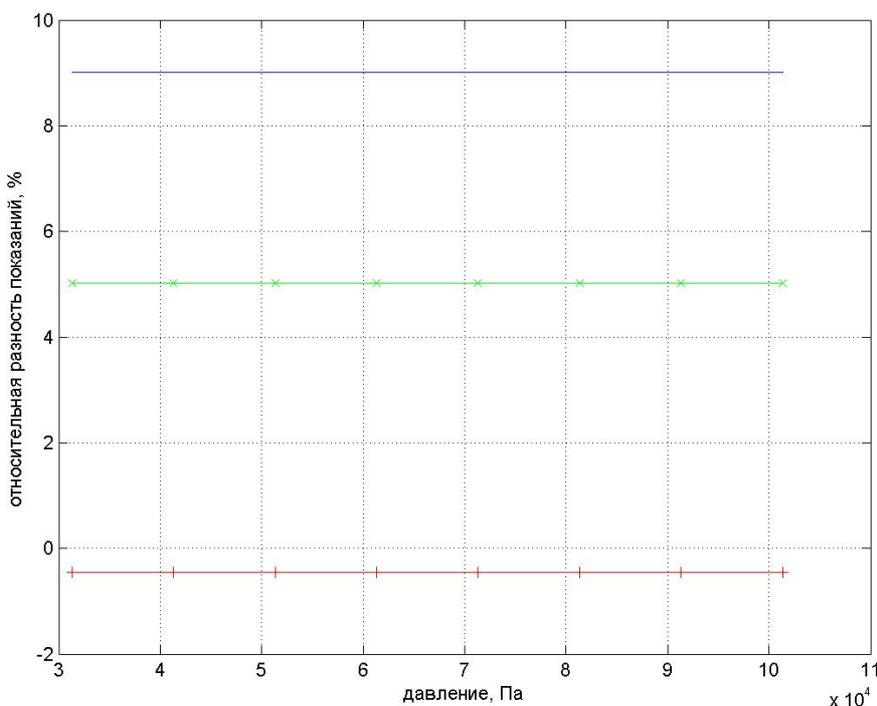


Рис. 6. Относительная разность показаний механического высотомера и СВС от величины атмосферного давления p для $p_0 = 98\,940$ Па и трех значений T_0 :
 $T_0 = 288,1$ К (+15 °С) ; $T_0 = 273,1$ К (0 °С) и $T_0 = 263,1$ К (-10 °С)

Как видно из рис. 5 и 6, относительная разность показаний может составлять порядка $\approx 10\%$, причем эта величина практически не зависит от высоты (от фактического давления p) и является по существу константой для указанных значений p_0, T_0 .

Выводы

Рассмотрена задача определения разности показаний высоты механическим указателем и СВС летательного аппарата. Найдена формула, показывающая, что данная разность является функцией давления и температуры на уровне плоскости начала отсчета высоты, а также и фактического давления на высоте полета. Проведены численные исследования, позволяющие оценить расхождение показаний. Установлено, что относительная разность показаний может достигать в эксплуатационных условиях порядка $\approx 10\%$, причем она практически не зависит от высоты ЛА и является, по существу, константой для указанных начальных значений давления и температуры (на уровне плоскости начала отсчета высоты).

Установлено также, что если T_0 , указанная для СВС, выше температуры, определяемой по p_0 для стандартной атмосферы, то механический высотомер дает заниженное по сравнению с СВС значение высоты, а в противоположной ситуации, наоборот – завышенное значение.

Литература

1. Системотехническая разработка и анализ погрешностей системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока / В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Е.С. Ефремова, Б.И. Мифтахов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – Вып. 8. – С. 232–244.
2. Крылов, Д.Л. Функциональная схема, алгоритмы обработки информации и погрешности системы воздушных сигналов самолета с неподвижными невыступающими приемниками потока / Д.Л. Крылов, В.М. Солдаткин // Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли: сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф. – Казань: Изд-во Академии наук Республики Татарстан, 2016. – С. 570–574.
3. Ефремова, Е.С. Информационно-измерительная система воздушных сигналов дозвукового летательного аппарата на основе вихревого метода: дис. ... канд. техн. наук / Е.С. Ефремова. – Казань: КазНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ, 2020. – 207 с.
4. Козицин, В.К. Система воздушных сигналов вертолета на основе свободно ориентированного приемника давлений: автореф. ... дис. канд. техн. наук / В.К. Козицин. – Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2006. – 23 с.
5. Солдаткин, В.В. Алгоритмы формирования и обработки информации системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника / В.В. Солдаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 3 (299). – С. 110–120.
6. Алгоритмическое обеспечение системы воздушных сигналов одновинтового вертолета с неподвижным аэрометрическим приемником на характерных режимах эксплуатации / В.В. Солдаткин, И.Ф. Мингазов, А.Р. Мустафин, Д.Н. Нурутдинова // Труды Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии». – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2018. – С. 881–885.
7. Ефремова, Е.С. Алгоритмическое обеспечение вихревой системы воздушных сигналов дозвукового самолета / Е.С. Ефремова // Труды Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии». – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2018. – С. 812–816.
8. Солдаткин, В.В. Автоматическая подстройка измерительных каналов системы воздушных сигналов вертолета / В.В. Солдаткин // Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. – 2004. – № 2. – С. 26–29.
9. Джангиров, М.В. Погрешности барометрических высотомеров на основе микромеханических датчиков атмосферного давления / М.В. Джангиров // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вып. 4 (51), ч. 2. – С. 115–119.
10. Алмазов, В.В. Оценка характеристик аэрометрических систем / В.В. Алмазов, Н.Н. Макаров, М.Ю. Сорокин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 1 (2). – С. 385–390.

11. Олейник, А.И. Алгоритмическое обеспечение информационного комплекса высотно-скоростных параметров полета самолета / А.И. Олейник // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2014. – № 10. – С. 22–27.

12. Никитин, А.В. Повышение помехоустойчивости измерения высотно-скоростных параметров на борту вертолета / А.В. Никитин, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин // *Известия вузов. Авиационная техника*. – 2016. – № 4. – С. 131–137.

13. Бабич, О.А. Измерение высоты полета над уровнем моря (режим QNH) по сигналам бортовых датчиков / О.А. Бабич // *Навигация и управление летательными аппаратами*. – 2014. – № 9. – С. 2–13.

14. Искендеров, И.А. Особенности современных барометрических датчиков и возможности их применения на летательных аппаратах / И.А. Искендеров, Р.Ю. Мурад // *World science*. – 2016. – Т. 1, № 5 (9). – С. 55–59.

15. Крылов, Д.Л. Построение и алгоритмы обработки информации системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока / Д.Л. Крылов, В.М. Солдаткин // *Информационные системы и технологии: материалы III Междунар. науч.-техн. интернет-конф.* – Орел: Изд-во ООО «Стерх». – 2015. – С. 1–6.

16. Олейник, А.И. Метод расширения диапазона измерения аэродинамических параметров полета маневренного самолета / А.И. Олейник // *Вестник СибГАУ им. академика М.Ф. Решетнева*. – 2012. – № 1 (41). – С. 100–103.

17. Исследования по разработке системы определения высотно-скоростных параметров воздушно-космического самолета / М.П. Балашов, И.Ф. Белов, Д.П. Буйко и др. // *Ученые записки ЦАГИ*. – 2002. – Т. XXXIII, № 1-2. – С. 120–128.

18. Судаков, А.И. Анализ проблемы измерения высотно-скоростных параметров вертолета / А.И. Судаков, В.В. Геращенко, С.А. Котляров // *Решетневские чтения: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф.* – Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – 2017. – Ч. 1. – С. 470–471.

19. Панферов, В.И. Авиационные приборы и пилотажно-навигационные комплексы: учеб. пособие: в 3 ч. / В.И. Панферов, Н.А. Тренин, А.М. Хаяутин. – Челябинск: Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – Ч. 1. – 145 с.

20. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов / Г.И. Клоев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 510 с.

21. Ефимов, И.П. Авиационные приборы: учеб. пособие / И.П. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2018. – 255 с.

Панферов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске; профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tgsiv@mail.ru.

Панферов Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; panferovsv@susu.ru.

Хаяутин Андрей Михайлович, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск.

Тренин Николай Александрович, канд. воен. наук, начальник кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск.

Яцук Константин Васильевич, доцент, доцент кафедры тактики и общевойсковых дисциплин, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск.

Поступила в редакцию 21 сентября 2021 г.

TO THE QUESTION OF DETERMINING THE BAROMETRIC HEIGHT BY A MECHANICAL ALTIMETER AND AIR SIGNAL SYSTEM

V.I. Panferov^{1,2*}, S.V. Panferov², A.M. Hayutin¹, N.A. Trenin¹, K.V. Yatsuk¹¹ Russian Air Force Military Educational and Scientific Center "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin", Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation,² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

* E-mail: tgsiv@mail.ru

Reliable information on the altitude and speed parameters of the aircraft (AC) is required for safety and increasing the efficiency of flight missions. In this regard, the task of studying the features and improving the characteristics of existing meters for these parameters is quite urgent. **Purpose of the study.** The features of determining the barometric altitude of an aircraft by a mechanical indicator and an air signal system (SHS) are considered. **Materials and methods.** The essence of the barometric method for measuring the altitude of the aircraft is analyzed, it is found that to build a clear theory of the method, it is necessary to know the dependence of the temperature of the atmosphere on the altitude. Moreover, it is known that this temperature usually decreases with increasing altitude. However, the rate of decrease unpredictably changes both at different times of the year and day, and at different points and at different heights. Moreover, in some cases, in a certain range of heights, the temperature may not decrease, but, on the contrary, increase. In this regard, there is some problem with the formalization of this dependence. When constructing a theory of the method for mechanical pointers, one proceeds in such a way that the dependence for the International Standard Atmosphere (ISA) is used, in which temperature and pressure are uniquely related. When developing algorithmic support for SHS, it is considered that the temperature decreases with height as well as in a standard atmosphere, but its actual value at the level of the reference plane can be anything that is not at all related to pressure and altitude in ISA. For this purpose, a temperature control unit is provided in the SHS at the level of the height reference plane. **Results.** A formula has been obtained that makes it possible to determine the difference between the readings of a mechanical altimeter and SHS. It was found that this difference is a function of pressure and temperature at the level of the plane of the altitude reference plane, as well as the actual pressure at the flight altitude. Numerical studies have been carried out to assess the discrepancy between the readings. It has been established that the relative difference in readings can reach the order of magnitude under operating conditions, and it practically does not depend on the aircraft altitude and is, in essence, a constant for the indicated initial values of pressure and temperature (at the level of the plane of the altitude reference). **Conclusion.** The developed algorithms can be used to improve the algorithmic support of the SHS.

Keywords: barometric altitude, air signal system, mechanical altimeter, difference in readings, calibration dependence.

References

1. Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Efremova E.S., Miftakhov B.I. [System engineering development and error analysis of the airborne signal system of an aircraft with a fixed non-protruding flow receiver]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya TulGU. Technical science], 2019, iss. 8, pp. 232–244. (in Russ.)
2. Krylov D.L., Soldatkin V.M. [Functional diagram, information processing algorithms and errors of the aircraft's air signal system with fixed, non-protruding flow receivers]. *Novyye tekhnologii, materialy i oborudovaniye Rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli: sb. dokl. Vseros. nauch.-prakt. konf.* [New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry: Sat. report All-Russian scientific and practical conf.]. Kazan, Publishing house of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2016, pp. 570–574. (in Russ.)
3. Efremova E.S. *Informatsionno-izmeritel'naya sistema vozdukhnykh signalov dozvukovogo letatel'nogo apparata na osnove vikhrevoogo metoda: dis. kand. tekhn. nauk* [Information-measuring system

of air signals of a subsonic aircraft based on the vortex method. Cand. sci. diss.]. Kazan, KNRTU-KAI, 2020. 207 p.

4. Kozitsin V.K. *Sistema vozdushnykh signalov vertoleta na osnove svobodno oriyentirovannogo priyemnika davleniy: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Helicopter air signal system based on freely oriented pressure receiver. Abstract of cand. diss.]. Kazan, Publishing house of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, 2006. 23 p.

5. Soldatkin V.V. [Algorithms for the formation and processing of information of a helicopter air signal system based on a stationary multifunctional aerometric receiver]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2013, no. 3 (299), pp. 110–120. (in Russ.)

6. Soldatkin V.V., Mingazov I.F., Mustafin A.R., Nurutdinova D.N. [Algorithmic support of the air signal system of a single-rotor helicopter with a fixed aerometric receiver in typical operating modes]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii"* [Proceedings of the International Science and Technology Conference "Advanced Information Technologies"]. Samara, Publishing house of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2018, pp. 881–885. (in Russ.)

7. Efremova E.S. [Algorithmic support of the vortex system of air signals of a subsonic aircraft]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii"* [Proceedings of the International Science and Technology Conference "Advanced Information Technologies"]. Samara, Publishing house of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2018, pp. 812–816. (in Russ.)

8. Soldatkin V.V. [Automatic tuning of the measuring channels of the helicopter air signal system]. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva* [Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev], 2004, no. 2, pp. 26–29. (in Russ.)

9. Dzhangirov M.V. [Errors of barometric altimeters based on micromechanical atmospheric pressure sensors]. *Visnik KDFU imeni Mikhayla Ostrogradskogo* [Bulletin of Kremenichuk State Polytechnic University named after Mykhailo Ostrogradsky], 2008, iss. 4 (51), part 2, pp. 115–119. (in Russ.)

10. Almazov V.V., Makarov N.N., Sorokin M.Yu. [Assessment of characteristics of aerometric systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, vol. 19, no. 1 (2), pp. 385–390. (in Russ.)

11. Oleinik A.I. [Algorithmic support of the information complex of the high-altitude-speed parameters of the aircraft flight]. *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye* [Aerospace Instrumentation], 2014, no. 10, pp. 22–27. (in Russ.)

12. Nikitin A.V., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. [Improving the noise immunity of measuring altitude and speed parameters on board a helicopter]. *Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika* [Izv. universities. Aviation technology], 2016, no. 4, pp. 131–137. (in Russ.)

13. Babich O.A. [Measurement of flight altitude above sea level (QNH mode) using signals from onboard sensors]. *Navigatsiya i upravleniye letatel'nyimi apparatami* [Navigation and control of aircraft], 2014, no. 9, pp. 2–13. (in Russ.)

14. Iskenderov I.A., Murad R.Yu. [Features of modern barometric sensors and the possibility of their use on aircraft]. *World science* [World Science], 2016, vol. 1, no. 5 (9), pp. 55–59. (in Russ.)

15. Krylov D.L., Soldatkin V.M. [Construction and algorithms for information processing of an aircraft air signal system with a fixed non-protruding flow receiver]. *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy internet-konferentsii* [Information systems and technologies: Proceedings of the III International Scientific and Technical Internet Conference]. Orel, Sterkh LLC Publishing House], 2015, pp. 1–6. (in Russ.)

16. Oleinik A.I. [Method of expanding the range of measurement of aerodynamic parameters of a maneuverable aircraft flight]. *Vestnik SibGAU im. M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev], 2012, no. 1 (41), pp. 100–103. (in Russ.)

17. Balashov M.P., Belov I.F., Buyko D.P., Kobzev V.I., Petunin A.N., Ponomarev L.F. [Research on the development of a system for determining the altitude and speed parameters of an aerospace aircraft]. *Uchenyye zapiski TsAGI* [Scientific notes of TsAGI], 2002, vol. XXXIII, no. 1-2, pp. 120–128. (in Russ.)

18. Sudakov A.I., Gerashchenko V.V., Kotlyarov S.A. [Analysis of the problem of measuring the altitude and speed parameters of a helicopter]. *Reshetnevskiy chteniya: Materialy XXI Mezhdunarodnoy nauchn.-prakt. konf.* [Reshetnev readings: Materials of the XXI International scientific-practical. conf.]. Krasnoyarsk: SibGU im. M.F. Reshetneva [Krasnoyarsk: Siberian State University named after M.F. Reshetnev], 2017, part 1, pp. 470–471. (in Russ.)

19. Panferov V. I., Trenin N. A., Hayutin A. M. *Aviatsionnyye pribory i pilotazhno-navigatsionnyye komplekсы: ucheb. posobiye: v 3 ch.* [Aircraft instruments and flight-navigation complexes: A manual in 3 parts]. Chelyabinsk, Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, 2018, part I. 145 p.

20. Klyuev G.I., Makarov N.N., Soldatkin V.M., Efimov I.P. *Izmeriteli aerodinamicheskikh parametrov letatel'nykh apparatov* [Meters of aerodynamic parameters of aircraft]. Ulyanovsk, UISTU, 2005. 510 p.

21. Efimov I.P. *Aviatsionnyye pribory: uchebnoye posobiye* [Aviation devices: textbook]. Ulyanovsk, UISTU, 2018. 255 p.

Received 21 September 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

К вопросу об определении барометрической высоты механическим альтиметром и системой воздушных сигналов / В.И. Панферов, С.В. Панферов, А.М. Хаютин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 92–102. DOI: 10.14529/ctcr210408

FOR CITATION

Panferov V.I., Panferov S.V., Hayutin A.M., Trenin N.A., Yatsuk K.V. To the Question of Determining the Barometric Height by a Mechanical Altimeter and Air Signal System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 92–102. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210408