

УДК 621.396.9

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-88-97

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ РАДИОЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ

Э.А. БОЛЕЛОВ¹, Ю.М. ЕРМОШЕНКО², М.Б. ФРИДЗОН¹, Ю.Н. КОРАБЛЕВ³

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²ООО «Аэроприбор», г. Москва, Россия

³Концерн «Международные аэронавигационные системы», г. Москва, Россия

Радиозондирование атмосферы является важнейшим компонентом, составляющим базу для деятельности авиационных прогностических органов. Данные радиозондирования являются основой для составления карт барической топографии, используемых при разработке авиационных метеопрогнозов. В настоящее время особую популярность получили численные методы прогноза погоды. Это вполне оправдано, так как они методы позволяют повысить точность метеопрогнозов и за этими методами будущее. Однако эра «численных прогнозов погоды» наступит нескоро. Это прежде всего обусловлено несовершенством численных моделей прогноза, которые не обеспечивают требуемую для авиации своевременность и оправдываемость метеопрогнозов. Вместе с тем качество метеорологического обеспечения полетов воздушных судов во многом определяется своевременностью и оправдываемостью авиационных прогнозов погоды. В связи с этим, функции сетевого радиозондирования требуют изложения теоретических основ и предоставления потребителям нормированных метрологических характеристик измерительной системы радиозондирования, методики выполнения измерений и обоснованной оценки достоверности результатов зондирования. Ряд из этих задач к настоящему времени решены, однако до сих пор практически не решена задача оценки динамических погрешностей измерений при радиозондировании. Требуют детальных исследований метрологические характеристики и динамические погрешности измерений температуры с помощью новых датчиков температуры зарубежного производства (NTC MFB-5000-3220), с недавних пор используемых в российских радиозондах.

Настоящая статья посвящена исследованию одного из важнейших видов погрешностей радиозондирования – динамических погрешностей измерений, а именно динамических погрешностей измерения температуры. В статье решается задача определения величины динамических погрешностей радиозондов, а также исследуется роль этого вида погрешностей при оценке достоверности результатов радиозондирования атмосферы.

Ключевые слова: датчик температуры, профиль температуры, метрологические характеристики, динамическая погрешность, параметры атмосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Информация, получаемая при сетевом аэрологическом зондировании атмосферы, является важнейшим компонентом, составляющим базу для деятельности авиационных прогностических органов (АМСГ, АМЦ) и метеорологического обеспечения полётов воздушных судов (ВС) [1]. Данная информация поступает в отечественные и международные центры зональных прогнозов. Эти жизненно важные функции сетевого радиозондирования требуют четкого публичного изложения теоретических основ и предоставления всем заинтересованным потребителям нормированных метрологических характеристик (МХ) измерительной системы сетевого радиозондирования, методики выполнения измерений и обоснованной оценки достоверности результатов зондирования. Ряд из этих задач к настоящему времени можно считать выполненными (в основном в девяностых – нулевых годах) на достаточном для практического применения уровне. В [2] обобщены результаты метрологических исследований отечественной системы радиозондирования, построены физические и математические модели процессов измерения температуры и влажности при радиозондировании, получены вероятностные оценки точности измерений. Полученные оценки достоверности измерений подтверждены результатами уникальных натурных экспериментов. Радиозонды прошли испытания с целью утверждения типа

средства измерения (СИ), и при серийном производстве проходят поверку в аккредитованных Росстандартом органах. В 2007 г. было разработано и утверждено Росгидрометом «Положение о метрологическом обеспечении аэрологических наблюдений».

В то же время ряд важных задач метрологического обеспечения сетевого радиозондирования до настоящего времени не решен. В частности, остались незамеченными оценки динамических погрешностей измерений при радиозондировании. Требуют детальных исследований МХ и динамические погрешности измерений температуры с помощью новых датчиков температуры (типа NTC MFB-5000-3220), с недавних пор используемых в отечественных радиозондах взамен архаичных и практически давно вышедших из употребления терморезисторов ММТ-1.

Вместе с тем за десятки лет использования старых датчиков накопилось огромное количество данных о вертикальном распределении температуры в атмосфере, методология и технические средства исследования МХ ММТ-1 и погрешностей измерений вертикальных профилей температуры не утратили своей ценности и актуальности. Именно эта методология и результаты метрологических исследований могут быть использованы в настоящее время не только для анализа накопленных радиозондовых данных, но и для оценки достоверности измерений радиозондами с современными датчиками.

Настоящая статья посвящена исследованию одного из важнейших видов погрешностей радиозондирования – динамических погрешностей измерений, в частности, динамических погрешностей измерения температуры.

Динамические погрешности результатов измерений температуры при радиозондировании атмосферы обсуждались в ряде работ, основные из которых [2, 3, 10, 11, 12]. В этих работах, как правило, по образцу введения «радиационных» поправок ставилась задача определить величины и способы введения динамических поправок в результаты конкретного зондирования. Задача оказалась неразрешимой вследствие неупорядоченности толщин слоёв в атмосфере между так называемыми «особыми точками», стандартными изобарическими поверхностями. В данной статье авторами ставится иная задача – определение величины динамических погрешностей радиозондов как типа СИ, а также роли этого вида погрешностей при оценке достоверности результатов сетевого радиозондирования.

УРАВНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ РАДИОЗОНДИРОВАНИИ

Измерение температуры в атмосфере при радиозондировании производится в динамическом режиме, то есть при движении датчиков с переменной скоростью в среде с изменяющейся плотностью, температурой и влажностью. В этих условиях для описания процессов взаимодействия датчиков радиозонда со средой, в первую очередь, необходимо построить физические модели таких процессов, которые учитывали бы взаимосвязанный теплообмен в пограничном слое при обтекании датчиков атмосферным воздухом.

В [2, 3] на основе рассмотрения формирования энергетического и материального балансов на поверхности движущегося в атмосфере так называемого «тонкого» тела [4] и с учетом теплообмена в бинарной смеси диффундирующих друг в друга компонентов влажного воздуха в пограничном слое получена следующая система уравнений, связывающая температуру и давление водяного пара на поверхности датчика с действительными параметрами атмосферы:

$$\frac{C_d}{S_d} \frac{dT_s}{dt} = D_s L_s \frac{\rho_{п.с}}{e_s} \frac{P}{P_A} \frac{1}{J_e} \sqrt{\frac{V}{v_s \ell}} (\overline{e_B} - e_s) + \lambda_s \frac{1}{J_T} \sqrt{\frac{V}{v_s \ell}} (\overline{T_B} - T_s) + \overline{B} + \frac{U_d^2}{S_d R_d} - \frac{2\pi k}{S_d} \sqrt{2\lambda_1 r_1 (\alpha_1 + 4\gamma_1 \sigma_0 T_B^3)} \left((T_s - T_B) - \frac{Q_{P,1}}{\pi (\alpha_1 + 4\gamma_1 \sigma_0 T_B^3)} \right), \quad (1)$$

$$m \frac{d\bar{e}_s}{dt} = D_s \frac{\varepsilon}{R_A T_s} \frac{P}{P_A} \frac{1}{J_e} \sqrt{\frac{V}{v_s \ell}} (\bar{e}_B - e_s), \quad (2)$$

где T_B, T_s – температура воздуха в невозмущенном потоке и температура поверхности датчика соответственно; m – масса водяного пара, поглощаемая единицей поверхности тела при изменении давления водяного пара e_s на его поверхности на единицу (кг/н), определяемая по изотерме сорбции; D_s – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе, отнесенный к температуре T_s ; $\varepsilon = 0,622$ – отношение плотности водяного пара к плотности сухого воздуха; R_A – газовая постоянная сухого воздуха; P/P_A – поправка на Стефанов поток [5]; P – давление воздуха; P_A – парциальное давление сухого воздуха; ρ_{II} – плотность водяного пара; $\rho_{II,s}$ – плотность водяного пара на поверхности тела; C_d – полная теплоемкость тела; S_d – площадь поверхности тела; λ_s – коэффициент теплопроводности воздуха, отнесенный к температуре T_s ; L_s – удельная теплота фазового превращения воды, отнесенная к температуре T_s ; V – скорость невозмущенного потока; γ – коэффициент излучения поверхности датчика; σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана; U_d – падение напряжения на датчике; R_d – электрическое сопротивление датчика; $\lambda_1, r_1, \alpha_1, \gamma_1$ – радиус, коэффициенты теплопроводности, конвективного теплообмена и излучения токоподвода терморезистора соответственно; $(e_s - e_B)$ – разность давлений водяного пара на поверхности датчика и в атмосфере; B – радиационный баланс датчика в значимом спектральном интервале; $J_T = 1,695, J_e = 1,802$ – числовые коэффициенты в выражении для значений вертикальных градиентов температуры и парциального давления водяного пара в пограничном слое [6]; ℓ – длина чувствительного элемента датчика.

Величина m , как уже указывалось, определяется из решения статической задачи по изотерме сорбции датчика. Согласно [5], масса водяного пара, адсорбированного поверхностью датчика, может быть выражена следующим образом:

$$m = \left(1 - \left(1 - \theta \frac{2r}{R_{II}} \right) \right)^2 V_{сл} \Pi \rho_{ж}. \quad (3)$$

В выражении (3) величина $\theta = \frac{\delta}{\delta_0}$ представляет собой степень заполнения поверхности адсорбента. Из уравнения адсорбции Хилла [6], учитывающей практически все взаимодействия в системе адсорбент – адсорбат и распространяющейся на весь диапазон относительных давлений, θ равно

$$\theta = \frac{\lg K_2 + \lg y - \lg U}{0,4343 K_1}. \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4): $K_1 = \frac{2a\delta_0}{RT}$ – коэффициент, учитывающий взаимное влияние молекул адсорбата; $K_2 = \frac{\delta_0 \sqrt{MT}}{3,52 \cdot 10^{22} \cdot E \tau_0} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$ – коэффициент, учитывающий энергию взаи-

модействия между молекулами адсорбата и атомами решетки поверхности адсорбента;
 $y = \frac{\theta(1-U)^2}{1-\theta+\theta U} \exp\left[\frac{\theta(1-U)^2}{1-\theta+\theta U}\right]$ – величина, определяющая характер изотермы сорбции; a – константа уравнения Ван-дер-Ваальса для двумерного газа; R – универсальная газовая постоянная для адсорбата; M – молекулярная масса адсорбата; $\tau_0 = 4,75 \cdot 10^{-13} \sqrt{\frac{M_1 V_1^{2/3}}{T_{II}}}$ – период вынужденных колебаний адсорбированной молекулы на поверхности адсорбента, определяемый свойствами атомов решетки адсорбента; M_1 – молекулярный вес адсорбента, отнесенный к числу атомов в его молекуле; V_1 – молекулярный объем адсорбента, отнесенный к тому же числу атомов; T_{II} – температура плавления адсорбента; Q – теплота адсорбции молекул адсорбата на данной поверхности; E – давление насыщения водяных паров при данной температуре; $r = 1,445 \cdot 10^{-10}$ – эффективный радиус адсорбированных молекул воды; r_{II} – радиус поры; Π – показатель пористости; $\rho_{ж}$ – плотность воды в капиллярах; δ – общее число адсорбированных молекул на единицу поверхности; δ_0 – число молекул, адсорбированных на единицу поверхности; $V_{сш}$ – объем деятельного слоя датчика, отнесенный к единице его поверхности; $U = \frac{e}{E}$ – относительная влажность. Для упрощения вычислений θ в работе [3] построена специальная номограмма (для $0,1 < \theta < 6,0$ и $0 < \frac{e}{E} < 0,7$).

Аналитическое решение системы уравнений (1)–(2) является достаточно сложной задачей. Для получения приемлемого аналитического решения положим, что разность давлений водяного пара на поверхности датчика и в атмосфере ($e_s - e_B$), радиационный баланс датчика B , джоулево тепло и концевой поток тепла в процессе измерения не меняются, что вполне справедливо для достаточно тонких слоев атмосферы. Изменения температуры и упругости пара по высоте в этих же слоях будем считать линейными, т. е.:

$$\begin{cases} T_B = T_{B,0} + ht, \\ e_B = e_{B,0} + \gamma_B t, \end{cases} \quad (5)$$

где $h = \frac{dT_B}{dt} = const$ и $\gamma_B = \frac{de_B}{dt} = const$ – соответственно скорости изменения температуры и упругости пара при подъеме радиозонда. Учтём также, что для тел, форма которых отличается от плоской пластины, выражения

$$\lambda_s \frac{1}{J_T} \sqrt{\frac{V}{v_s \ell}} \text{ и } D_s \frac{1}{J_e} \sqrt{\frac{V}{v_s \ell}} \quad (6)$$

в (1)–(2) должны быть заменены коэффициентами конвективного теплообмена α и массообмена β соответственно из [7, 8].

Тогда, интегрируя уравнения (1)–(2) по времени от 0 до t , по температуре от $(T_{S,0} - T_{B,0})$ до $(T_S - T_B)$ и по влажности от $(e_{S,0} - e_{B,0})$ до $(e_S - e_B)$, получим

$$\begin{cases} T_S - T_B = \left((T_{S,O} - T_{B,O}) - \frac{\beta}{\alpha} L_S \frac{\rho_{\Pi,S}}{e_S} \frac{P}{P_A} (e_S - e_B) - \frac{\bar{B}}{\alpha} - \frac{U_D^2}{R_D S_D \alpha} + \frac{\bar{Q}_D}{\alpha} + h\tau \right) \times \\ \times \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - h\tau + \frac{\beta}{\alpha} L_S \frac{\rho_{\Pi,S}}{e_S} \frac{P}{P_A} (e_S - e_B) + \frac{\bar{B}}{\alpha} + \frac{U_D^2}{R_D S_D \alpha} - \frac{\bar{Q}_D}{\alpha}, \\ e_S - e_B = ((e_{S,O} - e_{B,O}) + \gamma_B \lambda) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \gamma_B \lambda, \end{cases} \quad (7)$$

где τ – показатель термической инерции (постоянная времени) датчика температуры; λ – показатель массовой инерции (постоянная времени) датчика влажности.

Величины τ и λ определяются выражениями, которые с учетом массообменного критерия Нуссельта $Nu_{m,s} = \frac{\beta_e \ell}{D_S}$ [8] имеют вид

$$\tau = \frac{C_D}{S_D \alpha}, \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{4V_{\text{сл}} \Pi \rho_{\text{ж}}}{D_S \frac{P}{P_A} \rho_{\Pi,S} Nu_{m,s}} \left\{ \left[1 - \frac{2r}{\left(1 + k \frac{e_S}{E_S}\right) R_{\Pi,0}} \left(\frac{1}{1 - \frac{e_S}{E_S}} \right) \right] \frac{r}{\left(1 + k \frac{e_S}{E_S}\right) R_{\Pi,0}} \left(\frac{\frac{e_S}{E_S}}{1 - \left(\frac{e_S}{E_S}\right)^2} \cdot \ell \right) \right\}. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет производить расчёты величины λ в широком диапазоне изменений влияющих факторов и неинформативных параметров, используя выражения для массообменного критерия Нуссельта, полученные из решения сопряженной задачи массообмена [2, 3]:

$$Nu_{m,s} = 0,664 Re_{\infty}^{1/2} Sc^{1/3} \quad (10)$$

или экспериментальные критериальные уравнения, как, например, приведенные в [2, 3, 7] для продольно обтекаемых пористых пластин:

$$Nu_{m,s} = 2 \cdot 10^{-4} Re^{0,8} \Pi_D^{-0,5} \varepsilon_{\Pi}^{-0,5}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_{\Pi} = \frac{e_B}{P}$; $\Pi_D = \frac{e_S - e_B}{P}$; $Re = \frac{V \ell}{P}$ – число Рейнольдса.

Система уравнений (7) описывает взаимосвязанный тепломассообмен датчиков радиозонда с учетом различных факторов окружающей среды, влияющих на эти процессы. Первые два члена правой части первого уравнения системы (7) выражают динамические погрешности измерений, следующий член – влияние влажности среды и смачивания датчика, члены $\frac{\bar{B}}{\alpha}$ и

$\frac{U_D^2}{R_D S_D \alpha}$ описывают влияние радиации и рабочего тока на измерение температуры. Последний член правой части этого выражения отражает влияние на точность измерения конструктивного

исполнения датчика. Первый член правой части второго уравнения системы (7) выражает погрешность измерения абсолютной влажности, вызванную неравенством температуры датчика и среды. Последующие два члена выражают динамические погрешности измерений, причем в выражение для постоянной времени датчика (9) входит относительная влажность, а также конструктивные параметры датчика и различные внешние влияющие величины.

С метрологической точки зрения система уравнений (7) является физической моделью процесса измерений температуры и влажности при радиозондировании атмосферы, в соответствии с которой могут быть выбраны МХ датчиков радиозондов. Как показывает метрологический анализ процессов измерений температуры и влажности атмосферы датчиками радиозондов (выражения (8) и (9)), метрологические характеристики датчиков можно разделить на три группы:

– МХ, описывающие основную погрешность датчиков, т. е. погрешность в нормальных условиях;

– МХ, характеризующие дополнительные погрешности, возникающие при отличии условий эксплуатации датчика от нормальных и выражаемые через функции влияния или пределы допускаемых отклонений МХ датчиков за счёт внешних влияющих величин или неинформативных параметров;

– МХ, позволяющие определить динамические погрешности датчиков.

В рамках настоящей статьи рассматриваются МХ, позволяющие определить динамические погрешности датчиков температуры.

Для конкретного описания динамических погрешностей измерения температуры при радиозондировании необходимо ввести и исследовать динамические характеристики датчика как динамического звена измерительной цепи. Применительно к аэрологическим датчикам наиболее просто реализуется ступенчатое изменение входного сигнала. Поэтому динамические характеристики датчиков температуры можно нормировать в виде их переходной характеристики. Опираясь на [2, 3], можно считать датчик температуры линейным динамическим звеном первого порядка. Тогда переходная характеристика будет иметь вид

$$H(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (12)$$

где τ (или λ) – показатель термической (массовой) инерции.

Показатель термической (массовой) инерции τ (λ) является частной динамической характеристикой, весьма удобной при оценках динамических погрешностей измерений и сравнениях различных датчиков между собой. Ввиду ограниченного объёма научной публикации, в рамках данной статьи мы рассмотрим динамические погрешности только датчиков температуры. Результаты исследования динамических погрешностей датчиков влажности будут представлены в последующих работах.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

Как известно, терморезистор относится к линейным аналоговым средствам измерений с сосредоточенными параметрами. Отсюда основным уравнением связи между значениями выходного и входного сигналов во временной области является дифференциальное уравнение вида

$$\sum_{i=1}^n a_i H^{(i)}(t) = \sum_{k=1}^m b_k x^{(k)}(t), \quad (13)$$

где a_i и b_k – постоянные коэффициенты, характеризующие динамические свойства средства измерения; x и H – значения входного и выходного сигналов соответственно.

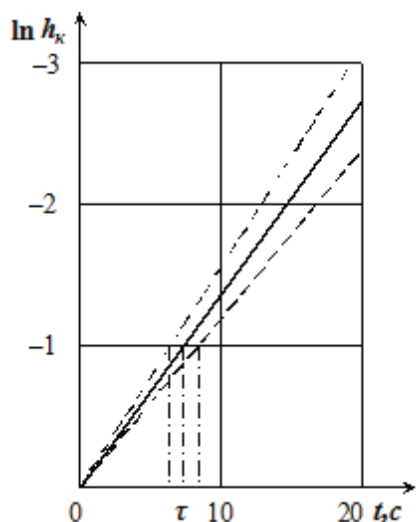


Рис. 1. Переходная характеристика датчика температуры
Fig. 1. Temperature sensor transient response

Для терморезистора переходная характеристика записывается в виде (12). На рис. 1 представлены экспериментальные данные, подтверждающие указанный вид переходной характеристики терморезисторов (ММТ-1 и NTC MFB-5000-3220) [9].

Величина коэффициента термической инерции определяется из графика зависимости $\ln h_k = f(t)$ как время, соответствующее точке пересечения графика ординатой $\ln h_k = -1$. Из данных, представленных на рис. 1, следует, что коэффициент термической инерции обоих типов датчиков в нормальных условиях составляет $\tau = 7,5 \pm 0,4$ с. Примерное равенство коэффициентов термической инерции обоих типов терморезисторов, несмотря на разницу в их массах, объясняется тем, что основную роль в формировании теплового баланса терморезисторов играют их токоподводы, а не собственно тело их чувствительных элементов.

Величина τ_B для тех же условий по данным натуральных экспериментов [9] составляет $\tau_B = 7,5 \pm 0,4$, что очевидным образом перекрывает интервал определения τ и подтверждает возможность нормировать величину τ в нормальных условиях в виде эмпирической формулы

$$\tau = 17,9(\rho V)^{-0,46}, \quad (14)$$

где ρ и V – средние значения плотности и скорости на соответствующей высоте в атмосфере.

Доверительный интервал определения τ по данной модели при $p = 0,95$ составляет

$$\delta(\tau) = \pm(0,3 + 0,05\tau). \quad (15)$$

Формулы (14) и (15) представляют собой также аналитическое выражение метрологической характеристики – функции влияния массовой скорости G на величину коэффициента термической инерции τ , $\Psi_\tau(G = \rho V)$.

Расчёт динамических погрешностей датчиков температуры радиозондов в случае единичных измерений производится по формуле, полученной из (7):

$$(T_S - T_B)_d = \Delta T_d = ((T_{S,0} - T_{B,0}) + \eta\tau) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \eta\tau, \quad (19)$$

где $\eta = \frac{dT_B}{dH} \cdot \frac{dH}{dt} = \beta V$ – скорость изменения температуры с высотой подъёма радиозонда.

Результаты экспериментов по определению динамических погрешностей датчиков температуры ММТ-1, приведенные в [9], показывают, что экспериментальные данные хорошо согласуются с данными, полученными в ходе расчетов по (19) (рис. 2).

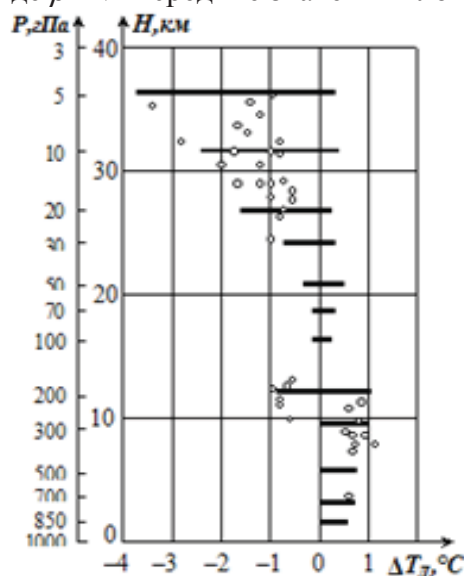


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные значения динамической погрешности датчика температуры ММТ-1
Fig. 2. The calculated and experimental values of the dynamic error of MMT-1 temperature sensor

Несколько большие ошибки на уровне 200 гПа вызваны резкими изменениями градиента температуры в районе тропопаузы и самого уровня тропопаузы. На высотах 12–24 км выявить динамические погрешности экспериментальным путём не удастся вследствие малых температурных градиентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены расчетные соотношения, позволяющие оценить значение динамических погрешностей датчиков температуры по высотам зондирования, а также определить слои атмосферы, проходимые радиозондом за время полного установления показаний датчика. Внедрение в практику радиозондирования новых датчиков температуры типа NTC MFB-5000-3220 требует проведения детальных исследований в целях оценки значений их динамических погрешностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богаткин О.Г.** Авиационные прогнозы погоды. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 288 с.
2. **Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П.** Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и использования радиозондовых измерительных средств. Екатеринбург: Научное издание НИСО УрО РАН, 2004. 590 с.
3. **Фридзон М.Б.** Метрология радиозондирования атмосферы (Методология и достоверность результатов радиозондирования атмосферы). Берлин: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 288 с.
4. **Дульнев Г.Н., Терновский Н.Н.** Тепловые режимы электронной аппаратуры. Л.: Энергия, 1971. 248 с.
5. **Бур Я.** Динамический характер адсорбции. М.: Иностран. лит., 1962. 290 с.
6. **Розеншток Ю.Л.** Применение методов теории пограничного слоя к решению задач взаимосвязанного тепло- и массопереноса // Труды ИФТ. 1965. Т. 8. № 6. С. 707-711.
7. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. М.: Энергия, 1995. 436 с.
8. **Кафаров В.В.** Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1972. 495 с.
9. Динамические погрешности аэрологического зондирования атмосферы / М.Б. Фридзон, Б.П. Зайчиков, А.М. Балагуров, А.Р. Дозорцев // Метрология. 1987. № 1. С. 57–62.
10. **Новицкий П.В., Зограф И.А.** Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
11. **Осипов Ю.Г., Герасимова Н.В., Дядюра А.В.** Устройство и принцип действия аэрологической информационно-измерительной системы «Улыбка». СПб.: РГГМУ, 2009. 60 с.
12. **Юрчук В.А.** Термометры для аэрологических измерений // Труды НИИ гидрометеорологического приборостроения. 1975. Вып. 32. С.50–55.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Болелов Эдуард Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, e.bolelov@mstuca.aero.

Ермошенко Юлия Марковна, заместитель генерального директора по технике и юридическому сопровождению производства ООО «Аэроприбор», meteoru@yandex.ru.

Фридзон Марк Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, markfr.36@mail.ru.

Кораблев Юрий Николаевич, заместитель главного конструктора АО «Концерн «Международные аэронавигационные системы», korablevyury@yandex.ru.

DYNAMIC ERROR OF THE TEMPERATURE SENSORS WITH THE SOUNDING OF THE ATMOSPHERE

Eduard A. Bolelov¹, Yulia M. Ermoshenko², Mark B. Fridzon¹, Yuri N. Korablev³

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

²LMD «Aeroprivor», Moscow, Russia

³PC «International Aeronavigation Systems», Moscow, Russia

ABSTRACT

Radiosounding of the atmosphere is an essential component constituting the base for prognostic aviation authorities. GPR scanning data are the basis for the mapping of baric topography used in the development of aviation weather forecasts. Currently, numerical methods of weather forecast have become especially popular. This is quite justified, as these methods allow to increase the accuracy of weather forecasts and these techniques represent the future. However, the era of "numerical weather prediction" will not come soon. This is primarily due to imperfect numerical forecast models, which do not provide for timeliness and reliability of weather forecasting required for aviation. However, the quality of meteorological support of aircraft flights is largely determined by the timeliness and predictability of the aviation weather forecasts. In this regard, the network of radiosounding functions require the presentation of the theoretical foundations and providing consumers with normalized metrological characteristics of the measuring system of radio sounding, methods of measurement and a reasonable assessment of the reliability of the results of sensing. A number of these problems have been resolved nowadays, however, so far the problem of estimating dynamic measurement errors in the sounding is not solved. The metrological characteristics and the dynamic error of measurement of temperature with the new temperature sensors of foreign production (NTC MFB-5000-3220), recently used in the Russian radiosondes still require the detailed studies.

This article is devoted to one of the most important types of errors of radio sounding – the dynamic errors of measurement, to be precise, the dynamic error of the temperature measurement. In the article the problem of determining the value of dynamic errors of radiosondes is being solved alongside with the investigation of the role of this kind of errors when assessing the reliability of the results of the atmosphere radio sounding.

Key words: temperature sensor, temperature profile, metrological characteristics, dynamic error, atmospheric parameters.

REFERENCES

1. **Bogatkin O.G.** *Aviatsionnye prognozy pogody* [Aviation weather forecasts]. SPb., BHV-Petersburg, 2010, 288 p. (in Russian)
2. **Ivanov V.E., Fridzon M.B., Essack S.P.** *Radiozondirovanie atmosfery. Tekhnicheskie i metrologicheskie aspekty razrabotki i ispol'zovaniya radiozondovykh izmeritel'nykh sredstv* [Sounding of the atmosphere. Technical and metrological aspects of the development and application of radio-sonde measuring means]. Ed. by V.E. Ivanov. Ekaterinburg, 2004. (in Russian)
3. **Fridzon M. B.** *Metrologiya radiozondirovaniya atmosfery (Metodologiya i dostovernost' rezul'tatov radiozondirovaniya atmosfery)* [Metrology of radio sounding of atmosphere (Methodology and reliability of results of radio sounding of atmosphere)]. Ed. LAP LAMBERT Academic Publishing, Berlin, 2011, 288 p. (in Russian)
4. **Dul'nev G.N., Ternovskiy N.N.** *Teplovye rezhimy elektronnoy apparatury* [Thermal modes of electronic equipment]. L., Energy, 1971, 248 p. (in Russian)
5. **Boer J.** *Dinamicheskiy kharakter adsorbtsii* [The Dynamic character of adsorption]. Moscow, Inostr. lit., 1962, 290 p. (in Russian)
6. **Rosenstock J.L.** *Primenenie metodov teorii pogranchnogo sloya k resheniyu zadach vzaimosvyazannogo teplo i massa perenosa* [Application of methods of boundary layer theory to solving problems of interrelated heat and mass transfer]. Proceedings of IFT, 1965, Vol. 8, No. 6, pp. 707–711. (in Russian)
7. **Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.** *Teploperedacha* [Heat Transfer]. M., Energy, 1995, 436 p. (in Russian)

8. Kafarov V.V. *Osnovy massoperedachi* [Fundamentals of mass transfer]. M., Higher school, 1972, 495 p. (in Russian)

9. Fridzon M.B., Bunnies B.P., Balagurov A.M. Dozortsev A.R. *Dinamicheskie pogreshnosti aerologicheskogo zondirovaniya atmosfery* [Dynamic error of upper-air sounding of the atmosphere]. Metrology, 1987, no. 1, pp. 57–62. (in Russian)

10. Novitskiy P.V., Zograf, I.A. *Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy* [Estimation of errors of measurement results]. L., Energoatomizdat, 1985, 248 p. (in Russian)

11. Osipov Yu., Gerasimova N.In. Dyadyura V.A. *Ustroystvo i printsip deystviya aerologicheskoy informatsionno-izmeritel'noy sistemy «Ulybka»* [Device and principle of operation of upper-air information-measuring system "Smile"]. SPb., RSHU, 2009, 60 p. (in Russian)

12. Yurchuk V.A. *Termometry dlya aerologicheskikh izmereniy* [Thermometers for upper-air measurements]. Proceedings of the research Institute of hydrometeorological instrument-making. 1975, Vol. 32, pp. 50–55. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Eduard A. Bolelov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Avionic Equipment Technical Maintenance Chair of Moscow State Technical University of Civil Aviation, edbolelov@mail.ru.

Yulia M. Ermoshenko, Deputy General Director for Engineering and Legal Support of Production of LMD "Aeropribor", meteoru@yandex.ru.

Mark B. Fridzon, Doctor of Technical Sciences, Professor of Moscow State Technical University of Civil Aviation, markfr.36@mail.ru.

Yuri N. Korablev, Deputy Chief Designer of PC "International Aeronavigation Systems", korablevyury@yandex.ru.

Поступила в редакцию 28.02.2017
Принята в печать 20.09.2017

Received 28.02.2017
Accepted for publication 20.09.2017