

**ОЦЕНКА РАЗБРОСА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА ВОЗДУШНОГО ДАВЛЕНИЯ**

А. А. ПАВЛОВСКИЙ, В. В. СОЛДАТКИН*, В. М. СОЛДАТКИН

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ,
Казань, Россия
*w-soldatkin@mail.ru

Аннотация. Обоснована перспективность применения одного (интегрированного) многофункционального приемника воздушного давления (ПВД), обеспечивающего восприятие всех параметров набегающего воздушного потока, необходимых для определения высотно-скоростных характеристик движения самолета. Обоснованы требования к погрешностям восприятия воздушного давления, регламентируемым Нормами летной годности самолетов. Рассматриваются причины технологического разброса аэродинамических характеристик каналов восприятия воздушного давления при производстве многофункционального приемника. Для количественной оценки влияния технологического разброса на аэродинамические характеристики многофункционального ПВД и погрешности измерения высотно-скоростных параметров в аэродинамической трубе проведены исследования партии осесимметричных ПВД, изготовленных по одной конструкторской документации, по единой технологии на одном оборудовании и прошедших приемку ОТК по геометрическим параметрам. По результатам исследования на аттестованной аэродинамической установке, прошедшей очередную поверку, определены и построены графики изменения аэродинамических коэффициентов полного (динамического) и статического давления ПВД при скорости воздушного потока 150 км/ч и изменении угла скоса набегающего воздушного потока в диапазоне от 0 до 30°. Полученные результаты создают предпосылки для выявления требований к нормированию характеристик и обеспечению взаимозаменяемости осесимметричных многофункциональных ПВД в аэродинамических системах измерения высотно-скоростных параметров самолета и других объектов авиационной техники.

Ключевые слова: аэроматрические системы, многофункциональный приемник, технологический разброс, аэродинамические характеристики

Ссылка для цитирования: Павловский А. А., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М. Оценка разброса аэродинамических характеристик многофункционального приемника воздушного давления // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 398—405. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-398-405.

**ESTIMATION OF THE SPREAD OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS
IN MULTIFUNCTIONAL AIR PRESSURE RECEIVER**

A.A. Pavlovskiy, V. V. Soldatkin*, V. M. Soldatkin

A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University,
Kazan, Russia
*w-soldatkin@mail.ru

Abstract. The prospects of using a single (integrated) multifunctional air pressure receiver (APR), providing the perception of all the parameters of the incoming air flow necessary to determine the altitude and speed characteristics of the aircraft movement, are substantiated. The requirements for the air pressure perception errors regulated by the aircraft Airworthiness Standards, are justified. The reasons for the technological dispersion of the aerodynamic characteristics of the channels for the perception of air pressure in manufacturing a multifunctional receiver are considered. To quantify the effect of technological dispersion on the aerodynamic characteristics of a multifunctional APR and the measurement errors of altitude and speed parameters in the wind tunnel, studies of a batch of axisymmetric APR manufactured according to the same design documentation and the same technology on the same equipment and passed the acceptance of the QC department according to geometric parameters are carried out. According to results of the study on a certified aerodynamic installation that has passed the next verification, graphs of the change in the aerodynamic coefficients of the total (dynamic) and static pressure of the APR at the air flow velocity of 150 km/h and the change in the angle of bevel of the incoming airflow in the range from 0 to 30° are determined and constructed. The obtained results create prerequisites for identifying requirements for normalization of characteristics and ensuring the interchangeability of axisymmetric multifunctional APR in aerodynamic systems for measuring the altitude and speed parameters of aircraft and other objects of aviation equipment.

Keywords: aerometric systems, multifunctional receiver, technological spread, aerodynamic characteristics

For citation: Pavlovskiy A. A., Soldatkin V. V., Soldatkin V. M. Estimation of the spread of aerodynamic characteristics in multifunctional air pressure receiver. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 6. P. 398—405 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-398-405.

Введение. Полеты широкого класса авиационной техники, в частности самолета, осуществляются в пределах атмосферы, и для их выполнения в штурвальном и автоматическом режимах необходима информация о высотно-скоростных параметрах движения относительно окружающей воздушной среды [1, 2].

В качестве первичной информации аэрометрических систем измерения высотно-скоростных параметров используются характеристики набегающего воздушного потока — полное и статическое давление, углы направления потока в азимутальной и ортогональной ей плоскостях [3]. В традиционных аэрометрических системах измерения высотно-скоростных параметров движения самолета для восприятия первичной информации набегающего воздушного потока используются устанавливаемые на правом и левом борту и распределенные по фюзеляжу приемники полного и статического воздушного давления (ПВД), флюгерные или другие датчики аэродинамических углов (ДАУ) — углов атаки и скольжения, выходные сигналы которых по кабелям связи и пневмопроводам связаны с расположенным за фюзеляжем бортовым вычислителем [4]. При этом множество автономных приемников и датчиков первичной информации, пневмопроводов и кабелей связи усложняют конструкцию, увеличивают массу и стоимость таких аэрометрических систем, ограничивают область их применения на объектах авиационной техники, определяют актуальность разработки интегрированных многофункциональных приемников первичной информации аэрометрических систем [5, 6].

Разрабатываются многофункциональные ПВД, функции традиционных (классических) приемников в которых совмещаются с восприятием дополнительной информации об аэродинамических углах атаки и скольжения. При этом одним из перспективных вариантов является осесимметричный многофункциональный ПВД [7, 8].

Оценка разброса аэродинамических характеристик каналов полного и статического давления при производстве многофункциональных ПВД. Важным требованием, предъявляемым к многофункциональному ПВД, является обеспечение идентичности аэродинамических характеристик каналов восприятия полного P_n и статического P_H давления при производстве ПВД и их стабильность при изменении углов скоса набегающего воздушного потока.

В соответствии с Нормами летной годности самолетов [9], погрешность ΔP_H восприятия статического давления P_H на высоте полета H каждого ПВД, в том числе многофункционального, не должна превышать 5 % от скоростного напора q набегающего воздушного потока. Следовательно, аэродинамический коэффициент статического давления \bar{P} многофункционального ПВД должен удовлетворять условию

$$\bar{P} = \frac{P_x - P_H}{q} \leq \pm 0,05,$$

где P_x — статическое давление на выходе многофункционального ПВД; P_H — статическое давление набегающего воздушного потока на высоте полета H ; $q = \frac{\rho_H V^2}{2}$ — скоростной напор набегающего воздушного потока, имеющий скорость V ; ρ_H — плотность воздуха на высоте H .

Погрешность восприятия полного давления P_n классических (традиционных) и многофункционального ПВД не должна превышать ± 1 % от скоростного напора. Следовательно, аэродинамический коэффициент полного давления многофункционального ПВД должен соответствовать требованию

$$\bar{P}_\Pi = \frac{P_\Pi - P_H}{q} = \frac{P_{\text{дин}}}{q} = \bar{P}_{\text{дин}} \leq \pm 0,01,$$

где $P_{\text{дин}} = P_\Pi - P_H$ — динамическое давление набегающего воздушного потока; $\bar{P}_{\text{дин}} = \bar{P}_\Pi$ — аэродинамический коэффициент динамического давления многофункционального ПВД.

Как показано в работах [10, 11], технологический разброс геометрических параметров от номинальных значений, качество изготовления отверстий для восприятия входного давления и другие факторы являются причиной изменения воспринимаемых давлений P_Π , $P_{\text{дин}}$, P_H и неидентичности аэродинамических характеристик каналов восприятия полного (динамического) и статического давления классических (традиционных) и многофункционального ПВД [10, 11]. На угловые характеристики канала восприятия полного давления влияют тип воспринимающей части и соотношение размера внутреннего и внешнего диаметров приемника полного давления, а также параметры формы приемной части приемника, диаметр и число дренажных отверстий.

С отклонениями диаметров цилиндрической части приемника и отверстий для забора статического давления связано изменение последнего, а также с отклонениями удаления отверстий от начала цилиндрической части и ее длины, отклонениями от вертикали углового положения отверстий, а кроме того, с шероховатостью обтекаемой поверхности. Кроме того, аэродинамические коэффициенты \bar{P}_Π , $\bar{P}_{\text{дин}}$, \bar{P}_H зависят от скорости V набегающего воздушного потока, что затрудняет их расчет.

Для оценки разброса аэродинамических характеристик каналов полного и статического давления при производстве многофункциональных ПВД исследованы характеристики традиционных ПВД в аэродинамической трубе. Объектом исследования являлась партия из десяти ПВД, изготовленных по одной конструкторской документации по единой технологии, на одном оборудовании и прошедших приемку ОТК по геометрическим параметрам. Приемники размещались в рабочей части установки измерительной аэродинамической типа ЭМС-0,1/60, прошедшей очередную поверку. Исследовались угловые характеристики каждого приемника данной партии. Средняя скорость воздушного потока задавалась равной 41,7 м/с (150 км/ч). Коэффициенты статического \bar{P} и полного (динамического) давления $\bar{P}_{\text{дин}} = \bar{P}_\Pi$ рассчитывались после замеров для каждого исследуемого образца с помощью приборов.

На рис. 1 приведены графики, иллюстрирующие разброс коэффициентов полного (динамического) давления серии ПВД при изменении угла скоса φ набегающего потока в диапазоне от 0 до 30°.

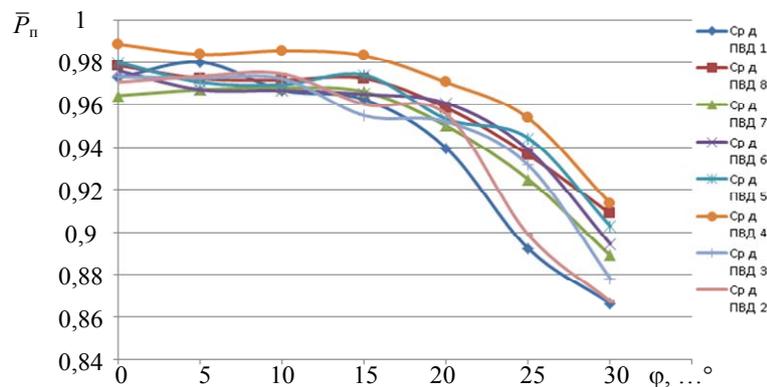


Рис. 1

Как видно из рис. 1, разброс значений коэффициента полного (динамического) давления исследуемой партии ПВД при изменении угла скоса потока от 0 до 20° находится в пределах $0,03q$, для $\varphi = 20\text{—}25^\circ$ — увеличивается до $0,07q$.

Если в качестве эталонного принять ПВД 1, то относительный разброс отклонений коэффи-

циентов полного (динамического) давления остальных приемников (в процентах) можно проиллюстрировать с помощью рис. 2.

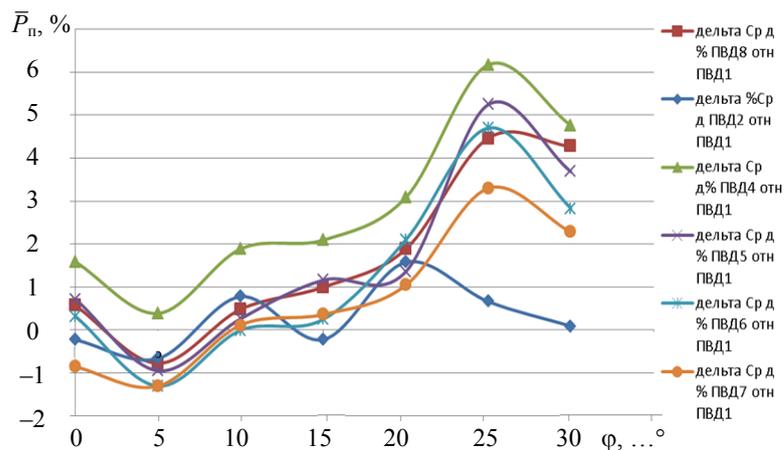


Рис. 2

Как видно из рис. 2, разброс коэффициентов полного (динамического) давления исследуемой партии находится в интервале от $\pm 1,5$ % при $\varphi = 0$ и до 6 % при $\varphi = 25$ °.

На рис. 3 иллюстрируется различие в определении воздушной скорости V_B исследуемой партии приемников относительно эталонного ПВД 1, обусловленное неидентичностью коэффициентов полного (динамического) давления ПВД.

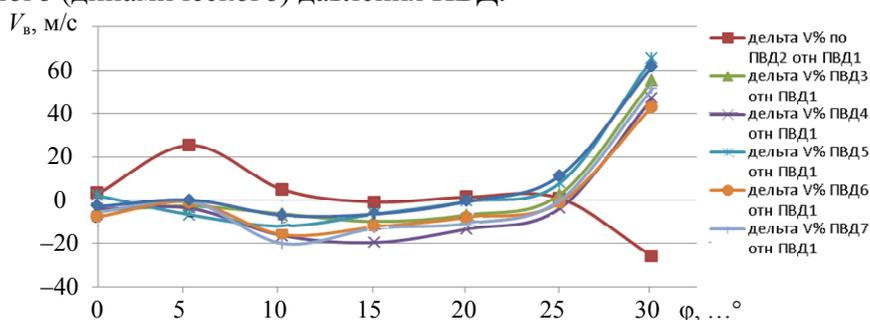


Рис. 3

Как видно из рис. 3, разброс в определяемых значениях воздушной скорости исследуемых приемников относительно эталонного ПВД 1 при $\varphi = 0$ составляет 8 %, в диапазоне $\varphi \leq 25$ ° увеличивается до 20–25 %.

На рис. 4 иллюстрируются изменения коэффициента статического давления исследуемой партии приемников при изменении угла скоса набегающего воздушного потока.

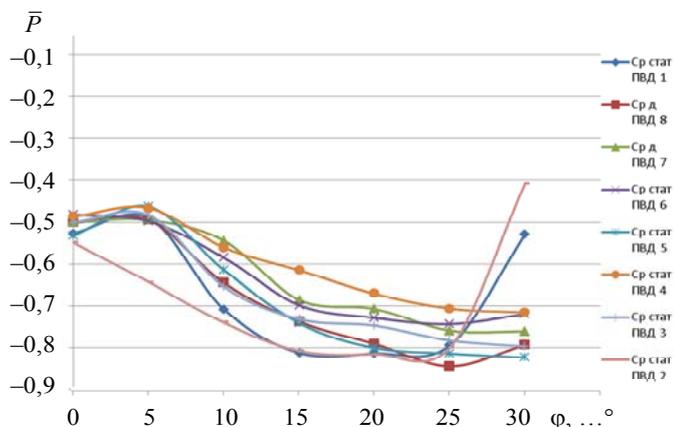


Рис. 4

Как видно из рис. 4, разброс значений коэффициента статического давления исследуемой партии ПВД изменяется от 0,05 — при $\varphi = 0$; 0,2 при $\varphi = 15$ ° и 0,15 при $\varphi = 25$ °.

На рис. 5 приводятся графики процентного отклонения δH в определении погрешности ΔH барометрической высоты H партии приемников относительно эталонного ПВД 1. Как видно из рис. 5, разброс δH исследуемой партии ПВД 5 % (0,05) $\varphi = 0$, в диапазоне $\varphi = 0—25^\circ$ возрастает до 12 % (0,12).

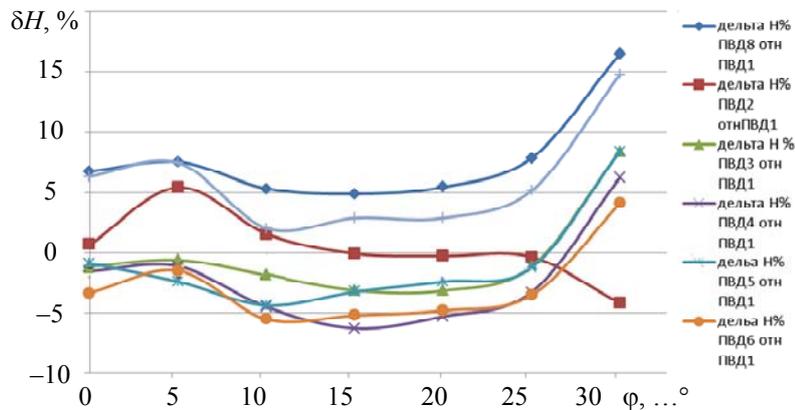


Рис. 5

Таким образом, экспериментальные исследования партии ПВД свидетельствуют о существенном разбросе их аэродинамических характеристик по каналам статического и полного (динамического) давления. Это определяет необходимость индивидуальной калибровки и паспортизации каждого приемника, по результатам которой определяются индивидуальные аэродинамические характеристики каналов полного (динамического) и статического давления каждого ПВД, проводится их отбраковка и паспортизация.

Оценка влияния качества изготовления канала на разброс характеристик многофункциональных ПВД по аэродинамическим углам. Как показано выше, для получения информации по измеряемому аэродинамическому углу, например углу атаки α , на передней обтекаемой поверхности осесимметричного многофункционального ПВД ортогонально поверхности устанавливаются отверстия для восприятия давлений $P_{\alpha 1}$ и $P_{\alpha 2}$ [8]:

$$P_{\alpha 1} = P_H + \frac{\rho_H V^2}{2} [1 - K_\phi \sin^2(\theta_0 + \alpha)] = P_H + q[1 - \sin^2(\theta_0 + \alpha)]; \quad (1)$$

$$P_{\alpha 2} = P_H + \frac{\rho_H V^2}{2} [1 - K_\phi \sin^2(\theta_0 - \alpha)] = P_H + q[1 - \sin^2(\theta_0 - \alpha)],$$

где θ_0 — угол между касательными к поверхности приемника в симметричных точках расположения отверстий; $K_\phi = 1$ — коэффициент формы в точке расположения отверстий.

На аэродинамические характеристики и качество канала восприятия аэродинамического угла многофункционального ПВД влияют конструктивные параметры входных кромок и форма отверстий для восприятия давлений в точках обтекаемой поверхности и углы θ_{01} , θ_{02} касательных к точкам расположения отверстий.

Информативный перепад значений давления канала восприятия аэродинамического угла, определяющий величину и знак изменения аэродинамического угла, составляет

$$\Delta P_\alpha = P_{\alpha 1} - P_{\alpha 2} + \frac{\rho_H V^2}{2} [\sin^2(\theta_{01} + \alpha) - \sin^2(\theta_{02} + \alpha)]. \quad (2)$$

Следовательно, разброс характеристик по каналу аэродинамического угла осесимметричного многофункционального ПВД будет определяться качеством отверстий восприятия статического давления P_H и разбросом $\Delta\theta_0$ значений угла θ_0 установки отверстий для восприятия давлений P_{H1} , P_{H2} на поверхности осесимметричного многофункционального ПВД.

Информативный перепад значений давления идеального канала восприятия аэродинамического угла многофункционального ПВД равен

$$\Delta P_\alpha = \frac{\rho_H V^2}{2} \sin 2\theta_0 \sin 2\alpha. \quad (3)$$

Алгоритм определения аэродинамического угла имеет вид

$$\sin 2\alpha = \frac{1}{\sin 2\theta_0} \frac{\Delta P_\alpha}{q} = \frac{1}{\sin 2\theta_0} \Delta \bar{P}_\alpha, \quad (4)$$

где $\Delta \bar{P}_\alpha$ — аэродинамический коэффициент канала восприятия информативного перепада значений давления по аэродинамическому углу α осесимметричного многофункционального ПВД.

Тогда разброс $\Delta \alpha_p$ значений измеряемого аэродинамического угла, обусловленный качеством изготовления элементов канала восприятия аэродинамического угла осесимметричного многофункционального ПВД, можно оценить соотношением

$$\Delta \alpha_p = \frac{\cos \theta_0}{\cos 2\alpha \sin^2 2\theta_0} \Delta \theta + \frac{1}{2 \cos 2\alpha \sin 2\theta_0} \Delta (\Delta \bar{P}_\alpha). \quad (5)$$

При $\theta_0 = 45^\circ$ получим

$$\Delta \alpha_p = \frac{\sqrt{2}}{2 \cos 2\alpha} \Delta \theta + \frac{1}{2 \cos 2\alpha} \Delta (\Delta \bar{P}_\alpha). \quad (6)$$

Следовательно, разброс аэродинамических характеристик осесимметричных многофункциональных ПВД по аэродинамическому углу будет определяться разбросом $\Delta \theta_0$ угла θ_0 установки отверстий для восприятия давлений $P_{\alpha 1}$, $P_{\alpha 2}$ и разбросом аэродинамических коэффициентов канала восприятия $\Delta \bar{P}_\alpha$. Величина разброса $\Delta \alpha_p$ зависит от измеряемого угла α и принимает наибольшее значение на границах диапазона измерения аэродинамического угла. При $\alpha = \pm 25^\circ$, $\cos 2\alpha = 0,64$, и выражение (5) принимает вид

$$\Delta \alpha_{p_{\max}} = 1,1 \Delta \theta_0 + 0,78 \Delta (\Delta \bar{P}_\alpha). \quad (7)$$

Первая составляющая определяется технологическими допусками на форму рабочей поверхности, местом расположения и угловым положением отверстий для восприятия $P_{\alpha 1}$, $P_{\alpha 2}$. Ее можно оценить удвоенным значением допуска $\Delta \theta_{1,2}$ на угловое положение отверстий.

Условия обтекания отверстий для восприятия давлений $P_{\alpha 1}$, $P_{\alpha 2}$ близки к условиям обтекания отверстий для восприятия статического давления P_H классического (традиционного) ПВД. Поэтому значение разброса $\Delta (\Delta \bar{P}_\alpha)$ можно принять близким к значению разброса $\Delta \bar{P}_H$ канала восприятия статического давления, т.е. $\Delta (\Delta \bar{P}_\alpha) \approx \Delta \bar{P}_H$. Как показали результаты исследования разброса $\Delta \bar{P}_H$ аэродинамических коэффициентов статического давления \bar{P}_H партии традиционных ПВД, в диапазоне изменения аэродинамического угла $\alpha = \pm 25^\circ$ $\Delta \bar{P}_H$ не превышает 0,2. Тогда если допуск $\Delta \theta_{1,2}$ на угловое положение отверстий для восприятия давлений $P_{\alpha 1}$, $P_{\alpha 2}$ определяется значением $\Delta \theta_{1,2} = 0,05^\circ$, величину разброса $\Delta \alpha_{p_{\max}}$ можно оценить значением $\Delta \alpha_{p_{\max}} = 1,1 \cdot 2 \cdot 0,05 + 0,78 \cdot 0,2 = 0,28^\circ$.

Рассмотренный подход создает предпосылки для выявления требований к технологическому допуску и разбросу аэродинамических характеристик канала восприятия давлений по аэродинамическим углам осесимметричного многофункционального ПВД при заданных требованиях к точности определения измеряемого аэродинамического угла, например, угла атаки.

Заключение. Таким образом, контроль качества исполнения каналов восприятия полного и статического давления и давлений, характеризующих аэродинамические углы атаки и скольжения, не обеспечивает требований, регламентируемых Нормами летной годности самолетов для аэродинамических характеристик многофункциональных ПВД, а также их взаимозаменяемость в аэрометрических системах. Это определяет необходимость индивидуальной калибровки и паспортизации многофункциональных ПВД по результатам исследования в аэродинамической трубе,

определения индивидуальных аэродинамических характеристик, отбраковки и паспортизации каждого приемника по аэродинамическим характеристикам. Полученные результаты создают предпосылки для выявления требований к нормированию аэродинамических характеристик и обеспечению взаимозаменяемости осесимметричных многофункциональных приемников воздушного давления в аэрометрических системах измерения высотно-скоростных параметров с учетом особенностей объекта авиационной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практическая аэродинамика маневренных самолетов / Под общ. ред. Н. М. Лысенко. М.: Воениздат, 1977. 439 с.
2. Боднер В. А. Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1973. 504 с.
3. Воробьев В. Г., Глухов В. В. Авиационные приборы и измерительные системы. М.: Транспорт, 1981. 391 с.
4. Клюев Г. И., Макаров Н. Н., Солдаткин В. М., Ефимов И. П. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов: учеб. пос. / Под ред. В. А. Мишина. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2005. 509 с.
5. Макаров Н. Н. Теоретические основы построения интегрированной системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса самолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2007. № 4. С. 48—52.
6. Крылов Д. Л., Солдаткина Е. С. Система воздушных сигналов самолета с неподвижным приемником потока // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 94—104.
7. Ефремова Е. С. Модели сигналов, алгоритмов и погрешностей измерительных каналов системы воздушных сигналов на основе вихревого метода // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 3. С. 97—103.
8. Солдаткин В. В., Солдаткин В. М., Деревянкин В. П. Модели сигналов, характеристик и погрешностей осесимметричного многофункционального приемника воздушных давлений аэрометрических систем самолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 1. С. 98—103.
9. Авиационные правила. Ч. 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. М.: Авиаиздат, 2011. 266 с.
10. Деревянкин В. П., Павлинов В. А., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М. Влияние конструктивных параметров приемников воздушных давлений на их аэродинамических характеристиках // Вестн. КГТУ им. А.Н. Туполева. 2018. № 4. С. 88—93.
11. Берг А. Г., Деревянкин В. П., Павлинов В. А., Павловский А. А., Солдаткин В. М. Взаимозаменяемость, калибровка и паспортизация приемников давлений по аэродинамическим характеристикам // Вестн. КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. Т. 75, № 3. С. 113—120.

Сведения об авторах

- Александр Андреевич Павловский** — АО „Ульяновское конструкторское бюро приборостроения“; лаборатория аэродинамики; начальник лаборатории;
E-mail: w-soldatkin@mail.ru
- Вячеслав Владимирович Солдаткин** — д-р техн. наук, профессор; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества;
E-mail: w-soldatkin@mail.ru
- Владимир Михайлович Солдаткин** — д-р техн. наук, профессор; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества;
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Поступила в редакцию 02.02.22; одобрена после рецензирования 28.03.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Lysenko N.M., ed., *Prakticheskaya aerodinamika manevrennykh samoletov* (Practical Aerodynamics of Maneuverable Aircraft), Moscow, 1977, 439 p. (in Russ.)
2. Bodner V.A. *Sistemy upravleniya letatel'nyimi apparatami* (Aircraft Control Systems), Moscow, 1973, 504 p. (in Russ.)

3. Vorob'yev V.G., Glukhov V.V. *Aviatsionnyye pribory i izmeritel'nyye sistemy* (Aviation Instruments and Measuring Systems), Moscow, 1981, 391 p. (in Russ.)
4. Klyuev G.I., Makarov N.N., Soldatkin V.M., Efimov I.P. *Izmeriteli aerodinamicheskikh parametrov letatel'nykh apparatov* (Aircraft Aerodynamic Parameters Meters), Ulyanovsk, 2005, 509 p. (in Russ.)
5. Makarov N.N. *Russian Aeronautics*, 2007, no. 4, pp. 48–52. (in Russ.)
6. Krylov D.L. and Soldatkina E.S. *Russian Aeronautics*, 2015, no. 4, pp. 94–104. (in Russ.)
7. Efremova E.S. and Soldatkin V.M. *Russian Aeronautics*, 2020, no. 3, pp. 97–103. (in Russ.)
8. Soldatkin V.V., Soldatkin V.M., and Derevyankin V.P. *Russian Aeronautics*, 2021, no. 1, pp. 98–103. (in Russ.)
9. *Aviatsionnyye pravila. Chast' 25. Normy letnoy godnosti samoletov transportnoy kategorii* (Aviation Rules. Part 25. Airworthiness Standards for Transport Category Aircraft), Moscow, 2011, 266 p. (in Russ.)
10. Derevyankin V.P., Pavlinov V.A., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. *Bulletin of the Kazan State Technical University A.N. Tupolev*, 2018, no. 4, pp. 88–93. (in Russ.)
11. Berg A.G., Derevyankin V.P., Pavlinov V.A. Pavlovsky A.A., Soldatkin V.M. *Bulletin of the Kazan State Technical University A.N. Tupolev*, 2019, no. 3(75), pp. 113–120. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander A. Pavlovskiy** — JSC Ulyanovsk Instrument Manufacturing Design Bureau; Head of the Aerodynamics laboratory; E-mail: w-soldatkin@mail.ru
- Vyacheslav V. Soldatkin** — Dr. Sci., Professor; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrument Making and Quality Management; E-mail: w-soldatkin@mail.ru
- Vladimir M. Soldatkin** — Dr. Sci., Professor; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrument Making and Quality Management; E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Received 02.02.22; approved after reviewing 28.03.22; accepted for publication 25.04.22.