

УДК 681.586

К.К. Лыу, И.П. Ефимов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ANSYS

Лыу Конг Кiem, окончил магистратуру Ульяновского государственного технического университета по направлению «Приборостроение», аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ. Имеет статьи, изобретения в области зондовых средств восприятия давлений аэрометрических систем летательных аппаратов. [e-mail: luucongkiem@gmail.com].

Ефимов Иван Петрович, кандидат технических наук, окончил факультет информационных систем и технологий УлГТУ, доцент кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ. Имеет статьи, изобретения в области зондовых средств восприятия давлений аэрометрических систем летательных аппаратов. [e-mail: eip@ulstu.ru].

Аннотация

В статье представлены результаты моделирования проточного приемника воздушных давлений (ПВД) при разных режимах турбулентности в программе ANSYS. По результатам исследования установлено, что при моделировании ПВД необходимо задавать турбулентный характер течения, выбирать модель турбулентности k-epsilon, шаг сетки 0,025 мм при вычислении с двойной точностью. Получена зависимость коэффициента сходимости данных моделирования и испытаний проточных ПВД k от скорости воздушного потока, геометрических параметров приемника и интенсивности турбулентности ε . Приведено сравнение результатов аэродинамического испытания проточного приемника статического давления в аэродинамической трубе ОАО «УКБП» и его моделирования в программе ANSYS с учетом коэффициента сходимости.

Ключевые слова: ANSYS, k-epsilon, статическое давление, скорость воздушного потока, модель турбулентности, модель ламинарного течения газа, расчетная сетка, коэффициент диафрагмы, коэффициент давления, интенсивность турбулентности, проточный ПВД, математическое моделирование.

doi: 10.35752/1991-2927-2019-4-58-97-104

FLOW-TYPE STATIC PRESSURE PROBE SIMULATION USING ANSYS

Cong Kiem Lyu, graduated from Ulyanovsk State Technical University with a Master's degree in Instrument Engineering; Postgraduate Student at the Department of Measuring and Computing Systems of UISTU; an author of articles in the field of air pressure probes of aircraft aerometric systems. e-mail: luucongkiem@gmail.com.

Ivan Petrovich Efimov, Candidate of Science in Engineering; graduated from the Faculty of Information Systems and Technologies at UISTU; Associated Professor at the Department of Measuring and Computing Systems of UISTU; an author of articles and inventions in the field of air pressure probes of aircraft aerometric systems. e-mail: eip@ulstu.ru.

Abstract

The article deals with the results of the flow-type air pressure probe simulation during various turbulent conditions using the ANSYS software. Based on the findings, conclusions were drawn up that when simulating air pressure probes, it is required to set turbulent flow characteristics, to select k-epsilon turbulence model, mesh size of 0.025 mm in the calculation with double precision. The dependence of convergence coefficient k of data after simulating and testing flow-type air pressure probes on turbulence intensity parameters ε is calculated. The results of aerodynamic tests of a flow-type static-pressure tube in the wind tunnel of Ulyanovsk Instrument Manufacturing Design Bureau, JSC, and its simulating in the ANSYS software are compared taking into consideration the convergence coefficient.

Key words: ANSYS, k-epsilon, static pressure, air flow velocity, turbulence model, streamlined gas flow model, computational mesh, orifice coefficient, pressure coefficient, turbulence intensity, flow-type air pressure probe, mathematical modeling.

ВВЕДЕНИЕ

При контроле и автоматизации технологии процессов в ряде случаев возникает необходимость измерения аэрометрических параметров воздушного потока. Наибольшую трудность при этом вызывает восприятие неискаженного статического давления потока. Аналогичным образом для информационного обеспечения систем автоматического и автоматизированного управления летательными аппаратами (ЛА) требуется восприятие неискаженного давления набегающего воздушного потока. Восприятие статического давления осуществляется с помощью приемников воздушных давлений (ПВД) [1–4]. Проектирование ПВД – достаточно сложный процесс, предполагающий разработку, изготовление и испытания опытных макетов. Повышение эффективности процесса проектирования ПВД может быть достигнуто за счет использования математического моделирования ПВД. В статье рассматривается вопрос моделирования ПВД в программе ANSYS. Моделирование ПВД в ANSYS практически не отражено в научных статьях и технической литературе. Специфика объекта моделирования заключается в том, что ПВД выносятся свободный воздушный поток, вокруг него формируется трубка тока сложной формы, не имеющая строгой фиксированной наружной границы с потенциальным (невозмущенным) потоком [5–7].

Целью работы является моделирование в ANSYS проточных приемников статического давления, скоростные характеристики которых были предварительно получены авторами в результате их испытаний в аэро-

динамической лаборатории ОАО «УКБП» (г. Ульяновск), и получение рекомендаций по моделированию ПВД в программе ANSYS [8].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММЕ ANSYS

Авторами были изготовлены и исследованы в аэродинамической трубе ОАО «УКБП» восемь макетов ПВД (рис. 1), геометрические параметры которых приведены в таблице 1.

В таблице 2 приведены экспериментально полученные значения разности давлений свободного потока P_0 и отбираемого из узкой части приемника P_y : $\Delta P = P_0 - P_y$ для макетов ПВД (табл. 1).

Таблица 1

Геометрические параметры исследуемых проточных ПВД

№ ПВД	$\alpha_k, ^\circ$	$\alpha_d, ^\circ$	m
1	40	8	0,2
2	60	8	0,2
3	40	12	0,2
4	60	12	0,2
5	40	8	0,4
6	60	8	0,4
7	40	12	0,4
8	60	12	0,4

Таблица 2

Скоростные характеристики исследуемых ПВД, полученные экспериментально

$V_0, \text{м/с}$	5,56	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44
№ ПВД	$\Delta P = P_0 - P_y, \text{Па}$					
1	116	819	3408	7845	14387	23250
2	119	786	3219	7632	14216	22833
3	87	641	2878	7258	13150	20445
4	95	652	2840	6724	12465	19699
5	85	544	2244	5379	9782	15520
6	91	561	2367	5604	10561	16714
7	74	520	2305	5444	10276	16804
8	72	496	2291	5657	10467	16804

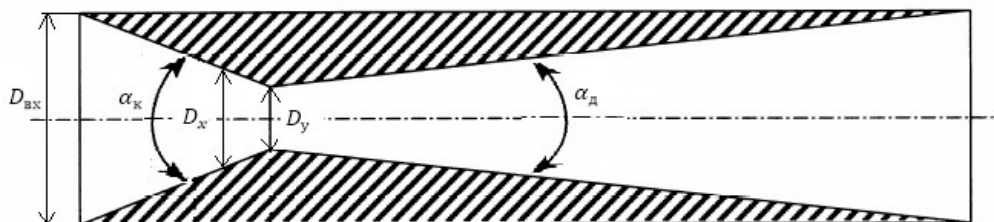


Рис. 1. Проточный ПВД: α_k – угол сужения конфузора; α_d – угол раскрытия диффузора; $D_{вх}, D_{x'}, D_y$ – диаметры входной части, сечения отбора давления и узкой части соответственно

При моделировании обтекания тел в ANSYS должен быть задан характер течения: ламинарный или турбулентный [9]. Для турбулентного течения задаются: вид модели турбулентности и степень турбулентности. При этом рекомендаций по выбору модели течения для ПВД проточного типа, находящихся в свободном потоке, в специальной и научной литературе не приводится.

При моделировании использовался решатель SIMPLE метода ПАТАНКАРА [9]. Шаг сетки принимался равным 0,025 мм при вычислении с двойной точностью. Дальнейшее уменьшение конечного элемента (до 0,01 мм и менее), по мнению авторов и исходя из результатов моделирования аналогичных объектов, полученных другими исследователями, нецелесообразно

вследствие значительного увеличения времени моделирования при небольшом приросте точности (на уровне 1%).

В таблицах 3 и 4 приведены результаты моделирования приемника № 1 (табл. 1), полученные при разных характерах течения воздуха.

Коэффициент сходимости k определялся по формуле:

$$k = \frac{\Delta P_{\text{анс}}}{\Delta P_{\text{исп}}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{исп}}$ – экспериментальное значение разности давлений; $\Delta P_{\text{анс}}$ – значение разности давлений, полученное в результате моделирования.

Таблица 3

Результаты моделирования ПВД № 1
при различных характерах потока и значениях интенсивности турбулентности ε

Разность давления, Па $\Delta P = P_0 - P_y$		Скорость набегающего воздушного потока V_0 , м/с					
		5,56	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44
Испытание		116	819	3408	7845	14387	23250
Ламинарный		179	1239	5161	11772,4	21060,8	33025,6
Турбулентный k-epsilon	$\varepsilon = 1\%$	136	860	3623,8	8555,8	15384,4	24209,1
	$\varepsilon = 5\%$	109	847	3506,4	7965,6	14344,7	22368,8
	$\varepsilon = 10\%$	101	791	3310,4	7548,3	13548,6	21304,2
Турбулентный k-omega	$\varepsilon = 1\%$	146	938	3806	8620,2	15387,9	24106,9
	$\varepsilon = 5\%$	136	877	3567,1	8081,7	14448,3	22628,3
	$\varepsilon = 10\%$	124	805	3281,5	7457,2	13316,6	20857,2
Турбулентный k-omegaSST	$\varepsilon = 1\%$	148	950	3851,5	8719,2	15558,8	24363,9
	$\varepsilon = 5\%$	146	929	3782,4	8579,5	15402,4	24179,2
	$\varepsilon = 10\%$	131	860	3531,5	8061,5	14214,1	22324,2

Таблица 4

Значения коэффициента сходимости k для ПВД № 1
при различных характерах потока и значениях интенсивности турбулентности ε

Коэффициент сходимости, k		Скорость набегающего воздушного потока V_0 , м/с					
		5,56	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44
Ламинарный		1,543	1,513	1,514	1,501	1,464	1,420
Турбулентный k-epsilon	$\varepsilon = 1\%$	1,172	1,050	1,063	1,091	1,069	1,041
	$\varepsilon = 5\%$	0,940	1,034	1,029	1,015	0,997	0,962
	$\varepsilon = 10\%$	0,871	0,966	0,971	0,962	0,942	0,916
Турбулентный k-omega	$\varepsilon = 1\%$	1,259	1,145	1,117	1,099	1,070	1,037
	$\varepsilon = 5\%$	1,172	1,071	1,047	1,030	1,004	0,973
	$\varepsilon = 10\%$	1,069	0,983	0,963	0,951	0,926	0,897
Турбулентный k-omegaSST	$\varepsilon = 1\%$	1,276	1,160	1,130	1,111	1,081	1,048
	$\varepsilon = 5\%$	1,259	1,134	1,110	1,094	1,071	1,040
	$\varepsilon = 10\%$	1,129	1,050	1,036	1,028	0,988	0,960

На рисунке 2 приведены зависимости коэффициента сходимости k для разных характеристик течения воздуха от скорости свободного потока.

По результатам, приведенным в таблице 3 и на рисунке 2, видно, что модель турбулентности k-epsilon дала наиболее близкие результаты к эксперименту. В таблицах 5 и 6 приведены результаты исследования остальных ПВД (табл. 1) при использовании модели турбулентности k-epsilon.

В таблице 6 приведены значения коэффициента сходимости k для ПВД (табл. 1), с учетом данных их моделирования (табл. 5).

Результаты моделирования, приведенные в таблицах 5 и 6, показали, что коэффициент сходимости k зависит не только от скорости набегающего воздушного потока и геометрии ПВД, но и от интенсивности турбулентности ϵ . На основании полученных данных можно сделать вывод, что моделирование ПВД в ANSYS при их проектировании даст существенно лучшие результаты при использовании полученных значений коэффициента сходимости k .

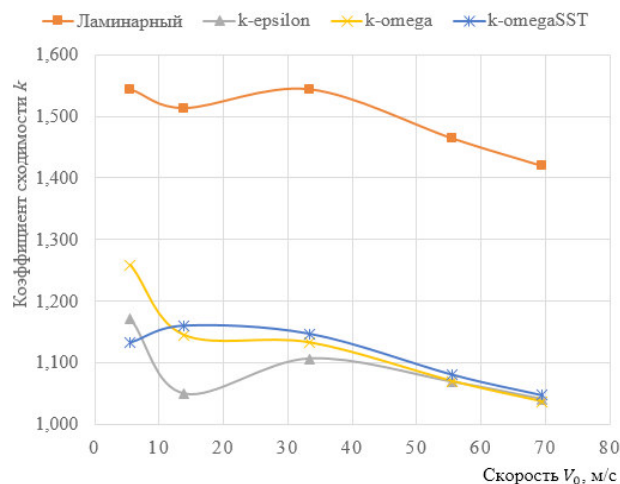


Рис. 2. Скоростные характеристики для коэффициента сходимости k при значении интенсивности турбулентности $\epsilon = 1\%$

Таблица 5

Результаты моделирования ПВД (модель турбулентности k-epsilon) при различных значениях интенсивности турбулентности ϵ

№ ПВД	Разность давления, Па	Скорость набегающего воздушного потока V_0 , м/с					
		5,56	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44
2	Испытание	119	786	3219	7632	14216	22833
	$\epsilon = 1\%$	192	1272	5075,1	11277,2	20052,8	32596,5
	$\epsilon = 5\%$	162	1226	4717,1	10688	19077,6	29823,2
	$\epsilon = 10\%$	152	1130	4496,1	10205,2	18271,9	28671,1
3	Испытание	87	641	2878	7258	13150	20445
	$\epsilon = 1\%$	145	919	3838,1	8971,1	16144,4	25379
	$\epsilon = 5\%$	126	901	3718,2	8448,5	15064,7	23543
	$\epsilon = 10\%$	116	852	3538,8	8040,5	14401,7	22628,7
4	Испытание	95	652	2840	6724	12465	19699
	$\epsilon = 1\%$	202	1337,8	5250,9	11798	21025,7	32570,1
	$\epsilon = 5\%$	179	1288	4939,2	11129,7	19923,2	31193,4
	$\epsilon = 10\%$	169	1195	4731,2	10738,7	19234,1	30127,4
5	Испытание	85	544	2244	5379	9782	15520
	$\epsilon = 1\%$	72	453	1908,7	4230,5	7380,8	11489,1
	$\epsilon = 5\%$	59	429	1703,4	3853,3	6848,7	10701,8
	$\epsilon = 10\%$	50	370	1498	3416,4	6114,1	9620,5
6	Испытание	91	561	2367	5604	10561	16714
	$\epsilon = 1\%$	114	692	2534,8	5513,5	9614,6	15337
	$\epsilon = 5\%$	95	651	2416	5542,2	9849,5	15404,4
	$\epsilon = 10\%$	84	571	2292	5239,1	9349,9	14636,9

Продолжение табл. 5

№ ПВД	Разность давления, Па	Скорость набегающего воздушного потока V_0 , м/с					
		5,56	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44
7	Испытание	74	520	2305	5444	10276	16804
	$\varepsilon = 1\%$	78	484	2016,2	4457,6	7790,2	12131,5
	$\varepsilon = 5\%$	65	456	1794,2	4062,8	7218	11292,8
	$\varepsilon = 10\%$	57	396	1608,3	3675,7	6590,5	10317,7
8	Испытание	72	496	2291	5657	10467	16804
	$\varepsilon = 1\%$	119	728	2657,2	5793,5	10088,1	15891,4
	$\varepsilon = 5\%$	102	680	2516,8	5753	10244,9	16053,6
	$\varepsilon = 10\%$	91	600	2416,8	5514,6	9920,7	15514,8

Таблица 6

Значения коэффициента сходимости k для моделируемых ПВД (модель турбулентности k-epsilon) при различных значениях интенсивности турбулентности ε

№ ПВД	Разность давления, Па	Скорость набегающего воздушного потока V_0 , м/с					
		5,56	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44
2	$\varepsilon = 1\%$	1,613	1,618	1,577	1,478	1,411	1,428
	$\varepsilon = 5\%$	1,361	1,560	1,465	1,400	1,342	1,306
	$\varepsilon = 10\%$	1,277	1,438	1,397	1,337	1,285	1,256
3	$\varepsilon = 1\%$	1,667	1,434	1,334	1,236	1,228	1,241
	$\varepsilon = 5\%$	1,448	1,406	1,292	1,164	1,146	1,152
	$\varepsilon = 10\%$	1,333	1,329	1,230	1,108	1,095	1,107
4	$\varepsilon = 1\%$	2,126	2,052	1,849	1,755	1,687	1,653
	$\varepsilon = 5\%$	1,884	1,975	1,739	1,655	1,598	1,584
	$\varepsilon = 10\%$	1,779	1,833	1,666	1,597	1,543	1,529
5	$\varepsilon = 1\%$	0,847	0,833	0,851	0,786	0,755	0,740
	$\varepsilon = 5\%$	0,694	0,789	0,759	0,716	0,700	0,690
	$\varepsilon = 10\%$	0,588	0,680	0,668	0,635	0,625	0,620
6	$\varepsilon = 1\%$	1,253	1,234	1,071	0,984	0,910	0,918
	$\varepsilon = 5\%$	1,044	1,160	1,021	0,989	0,933	0,922
	$\varepsilon = 10\%$	0,923	1,018	0,968	0,935	0,885	0,876
7	$\varepsilon = 1\%$	1,054	0,931	0,975	0,819	0,758	0,722
	$\varepsilon = 5\%$	0,878	0,877	0,778	0,746	0,702	0,672
	$\varepsilon = 10\%$	0,770	0,762	0,698	0,675	0,641	0,614
8	$\varepsilon = 1\%$	1,653	1,468	1,160	1,024	0,964	0,946
	$\varepsilon = 5\%$	1,417	1,371	1,099	1,017	0,979	0,955
	$\varepsilon = 10\%$	1,264	1,210	1,055	0,975	0,948	0,923

Для достижения наилучшего результата была разработана математическая модель, связывающая коэффициент сходимости k с коэффициентом диафрагмы ПВД (m), равным отношению площади узкого сечения к площади входного сечения приемника, скоростью набегающего воздушного потока (V_0) и интенсивностью турбулентности (ε):

$$k = \varphi(m, V_0, \varepsilon). \quad (2)$$

В развернутом виде модель (2) имеет вид:

$$k = b_0 + b_1 m^* + b_2 V_0^* + b_{12} m^* V_0^* + b_3 \varepsilon^* + b_{13} m^* \varepsilon^* + b_{23} m^* V_0^* \varepsilon^* + b_{123} m^* V_0^* \varepsilon^*, \quad (3)$$

$$\text{где } m^* = \frac{m - 0,3}{0,1}, \quad (4)$$

Матрица планирования для обработки

№ эксперимента	Изучаемые факторы			Результаты опытов				Среднее результатов
	m	$V_0, \text{ м/с}$	$\varepsilon, \%$	k_1	k_2	k_3	k_4	
1	0,2	5,56	1	1,172	1,613	1,667	2,126	1,645
2	0,4	5,56	1	0,847	1,253	1,054	1,653	1,202
3	0,2	69,44	1	1,041	1,428	1,241	1,653	1,341
4	0,4	69,44	1	0,740	0,918	0,722	0,946	0,832
5	0,2	5,56	10	0,871	1,277	1,333	1,779	1,315
6	0,4	5,56	10	0,588	0,923	0,770	1,264	0,886
7	0,2	69,44	10	0,916	1,256	1,107	1,529	1,202
8	0,4	69,44	10	0,620	0,876	0,614	0,923	0,758

$$V_0^* = \frac{V_0 - 37,5}{31,94}, \quad (5)$$

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon - 5,5}{4,5}. \quad (6)$$

Модель (3) является уравнением регрессии, соответствующим полному трехфакторному эксперименту.

Расчет коэффициентов регрессионного уравнения (3) производился для независимых переменных (факторов) m, V_0, ε , значения которых представлены в таблице 7.

Математическая модель (3) с учетом рассчитанных по таблице 7 коэффициентов имеет вид:

$$k = 1,1476 - 0,2281m^* - 0,1144V_0^* - 0,0101m^*V_0^* - 0,1074\varepsilon^* + 0,0099m^*\varepsilon^* + 0,0541V_0^*\varepsilon^* + 0,0064m^*V_0^*\varepsilon^*. \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что наиболее сильное влияние на коэффициент сходимости k оказывает коэффициент диафрагмы m , так как коэффициент b_2 имеет наибольшее значение. Скорость воздушного потока и интенсивность турбулентности примерно одинаково влияют на значение коэффициента сходимости k .

В качестве примера использования полученного корректирующего уравнения (7) проводилось сравнение результатов испытания проточного приемника статического давления в аэродинамической трубе ОАО «УКБП» и его моделирования в ANSYS с учетом коэффициента сходимости, рассчитанного по уравнению (7). Отбор статического давления в приемнике ($D_{\text{вх}} = 30 \text{ мм}, D_y = 16 \text{ мм}, D_x = 24,5 \text{ мм}, \alpha_k = 50^\circ, \alpha_d = 10^\circ$) производился на конфузормом участке, а не из узкого сечения, как у приемников (табл. 1). Результаты сравнения скоростных характеристик ПВД приведены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8

Сравнение результатов моделирования и испытаний для ПВД ($D_{\text{вх}} = 30 \text{ мм}, D_y = 16 \text{ мм}, D_x = 24,5 \text{ мм}, \alpha_k = 50^\circ, \alpha_d = 10^\circ$) при различных значениях интенсивности турбулентности ε

Коэффициент давления \bar{p}	Скорость набегающего воздушного потока $V_0, \text{ м/с}$				
	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44
Испытание	0,4138	0,3618	0,2894	0,2528	0,2390
$\varepsilon = 1\%$	0,0618	0,0257	-0,0149	-0,0408	-0,0520
$\varepsilon = 5\%$	0,1470	0,1552	0,1114	0,0806	0,0789
$\varepsilon = 10\%$	0,3993	0,3290	0,2955	0,2718	0,2661

Таблица 9

Относительная погрешность коэффициента давления \bar{p} при различных значениях интенсивности турбулентности ε

Относительная погрешность $\bar{p}, \%$	Скорость набегающего воздушного потока $V_0, \text{ м/с}$				
	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44
$\varepsilon = 1\%$	85,07	92,90	105,14	116,14	121,77
$\varepsilon = 5\%$	64,48	57,12	61,53	68,10	66,97
$\varepsilon = 10\%$	3,51	9,07	2,11	7,51	11,31

Как следует из представленных данных, результаты моделирования отличаются от данных аэродинамического испытания контрольного ПВД на 2...11%, что считается вполне приемлемым для моделирования процессов обтекания тел потоком в программе ANSYS и ей подобных. При этом следует отметить, что относительная погрешность определения коэффициента давления в аэродинамической трубе находится на уровне 5...8% и определяется в основном: точностью осевого позиционирования приемника (1...3°); случайными местными скосами потока (до ±3...8°); точностью измерения скорости потока (указатель скорости УС-350 и датчик скорости ДС-250) [5] и статического давления, отбираемого из ПВД (жидкостной наклонный микроманометр ММН-240 и вибрационный датчик давления ДДГ-1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных авторами исследований позволяют сделать вывод о возможности моделирования проточных приемников статического давления в программе ANSYS при использовании корректирующего уравнения (7), модели турбулентности k - ϵ ($\epsilon = 10\%$) и следующих ограничениях:

- скорость набегающего воздушного потока от 20 до 250 км/ч;
- коэффициент диафрагмы ПВД от 0,2 до 0,4;
- угол сужения конфузторного участка ПВД от 40 до 60°;
- угол раскрытия диффузорного участка ПВД от 8 до 12°.

Данные ограничения соответствуют проточным ПВД, предназначенным для установки на вертолеты (приемник ПДС-В1), малоразмерным и беспилотным ЛА. Типовое значение входного диаметра приемников $D_{вх}$ находится в интервале от 20 до 30 мм, что обусловлено требованием минимального возмущения набегающего воздушного потока, с одной стороны, с другой стороны – конструктивными особенностями (размещение электрического нагревательного элемента, защищающего ПВД от образования льда и выполнение системы забора и отвода статического давления).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 182 с.
2. Дубинина М.М., Сорокин М.Ю. Математическая модель распределения давления по поперечному сечению приемника воздушных давлений // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 4 (42). – С. 96–100.
3. Моисеев В.Н., Ефимов И.П., Сорокин М.Ю. Разработка математической модели проточных приемников статического давления // Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы : сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. ИВК-2013 / под. ред. В.В. Родинова. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – С. 93–100.

4. Измерение аэродинамических параметров летательных аппаратов : учеб. пособие / Г. И. Ключев [и др.] ; под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 509 с.

5. Математическая модель приемника воздушных давлений / В.Н. Моисеев [и др.] // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 1 (35). – С. 61–65.

6. Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока (приемники давления и скоростного напора). – М. : Машиностроение, 1972. – 332 с.

7. Шивринский В.Н. Исследование проточных приемников воздушных давлений. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 132 с.

8. Сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных исследований приемника воздушного давления ПВД-КЗ-1 / В.Н. Моисеев [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королёва. – 2012. – № 5 (36), Ч. 2. – С. 229–235.

9. Официальный сайт программы ANSYS. – URL: <https://www.ansys.com> (дата обращения: 21.10.2019).

REFERENCES

1. GOST 4401-81. Atmosfera standartnaia. Parametry [National Standard. Standard Atmosphere. Parameters]. Moscow, Izd-vo Standartov Publ., 1982. 182 p.

2. Dubinina M.M., Sorokin M.Iu. Matematicheskaia model raspredeleniia davleniia po poperechnomu secheniiu priemnika vozdushnykh davlenii [A Mathematical Model of Pressure Traverse of a Pitot-Static System Cross Section]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2015, no. 4 (42), pp. 96–100.

3. Moiseev V.N., Efimov I.P., Sorokin M.Iu. Razrabotka matematicheskoi modeli protochnykh priemnikov staticheskogo davleniia [Development of Mathematical Model for Flow-through Static Pressure Head]. *Aviatsionnye pribory i izmeritelno-vychislitelnye komplekсы. Sb. nauch. tr. Vseros. nauch.-tekhn. konf. IVK-2013 pod. red. V.V. Rodionova* [Aircraft Instruments and Measuring and Computer Systems. Proc. of Russian Sci.-Tech. Conf. IVK-2013 eds. V.V. Rodionov]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2013, pp. 93–100.

4. Kliuev G.I. et al. *Izmerenie aerodinamicheskikh parametrov letatelnykh apparatov. Ucheb. posobie pod red. V.A. Mishina* [Measuring Aerodynamics Characteristics of Aircrafts. Tutorial, eds. V.A. Mishin]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2005. 509 p.

5. Moiseev V.N. et al. Matematicheskaia model priemnika vozdushnykh davlenii [Mathematical Model for Pitot-Static Probe]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2014, no. 1 (35), pp. 61–65.

6. Petunin A.N. *Metody i tekhnika izmerenii parametrov gazovogo potoka (priemniki davleniia i skorostnogo napora)* [Method and Procedures of Measuring the Gas-Flow Parameters (Pressure Air-Flow Probes)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 332 p.

7. Shivrinskii V.N. *Issledovanie protochnykh priemnikov vozdushnykh davlenii* [Analysis of Air Flow Sensors]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2013. 132 p.

8. Moiseev V.N. et al. *Sravnenie rezultatov matematicheskogo modelirovaniia i eksperimentalnykh issledovaniia priemnika vozdušnogo davleniia PVD-K3-1* [Comparison of Mathematical Simulation Results and Experimental Research of PVD-K3-1 Air Pressure Probe].

Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. S.P. Koroleva [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2012, no. 5 (36), Part 2, pp. 229–235.

9. *Ofitsialnyi sait programmy ANSYS* [ANSYS Official Website]. Available at: <https://www.ansys.com> (accessed: 21.10.2019).