

УДК 004.9:629.7.05

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЕМНИКА ВОЗДУШНОГО ДАВЛЕНИЯ ПВД-КЗ-1

© 2012 В. Н. Моисеев, М. М. Дубинина, А. А. Павловский, М. Ю. Сорокин

ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»

В статье представлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования приемника воздушных давлений и дается обоснование использования математического моделирования при дальнейшей разработке аналогичных приемников воздушного давления. Получена оценка применимости программы OpenFOAM для моделирования приемников воздушных давлений. Приведена оценка воздействия схода воздушного потока на погрешность измерения воздушного давления.

Математическое моделирование, приемник воздушных давлений, модель турбулентности.

Приемники воздушного давления (ПВД) служат для восприятия воздушного давления в полете летательного аппарата (ЛА), которое необходимо для измерения и вычисления аэродинамических параметров пилотирования и управления полетом, таких как: приборная (индикаторная) скорость, истинная скорость, число M , вертикальная скорость, производные перечисленных параметров. Совмещением приемников полного и статического давления достигают: уменьшения габаритов и массы, улучшения аэродинамики ЛА за счет сокращения числа

приборов за пределами его обшивки, удобства в эксплуатации и уменьшения погрешностей восприятия давлений за счет вынесения ПВД в невозмущенное пространство с помощью штанги.

Проведено математическое моделирование приемника воздушного давления ПВД-КЗ-1, а также предложена новая форма приемника с улучшенными метрологическими характеристиками. Общий вид приемника представлен на рисунке 1.

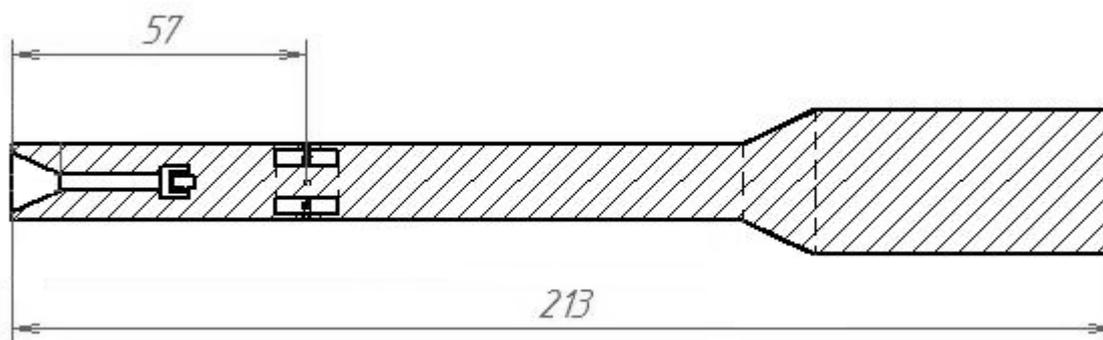


Рис. 1. Геометрические размеры приемника ПВД-КЗ-1

Расчетные данные сравнивались с результатами экспериментальных исследований, проведенных в ФГУП «ЦАГИ».

Режимы моделирования:

- скорость потока 50 км/ч, углы схода потока от 0° до 90° с шагом 10° ;
- скорость потока 250 км/ч, углы схода потока от 0° до 30° с шагом 10° .

Моделирование проводилось с помощью программы OpenFOAM. Использовался решатель simpleFoam – стационарная программа решения для турбулентного течения неньютоновой жидкости.

Динамическое давление P_0 определялось в канале полного давления после камеры торможения. Избыточное давление по отношению к статике

невозмущенного потока $P_{ст}$ (абсолютное значение статического давления) определялось в камере отбора статического давления.

Коэффициенты динамического \bar{p}_δ и статического $\bar{p}_{ст}$ давления определялись по формуле:

$$\bar{p} = \frac{P}{0,5 \cdot 1,225 \cdot V^2},$$

где P – давление, Па,

V – скорость набегающего потока,

м/с.

Приборная скорость вычислялась по формуле

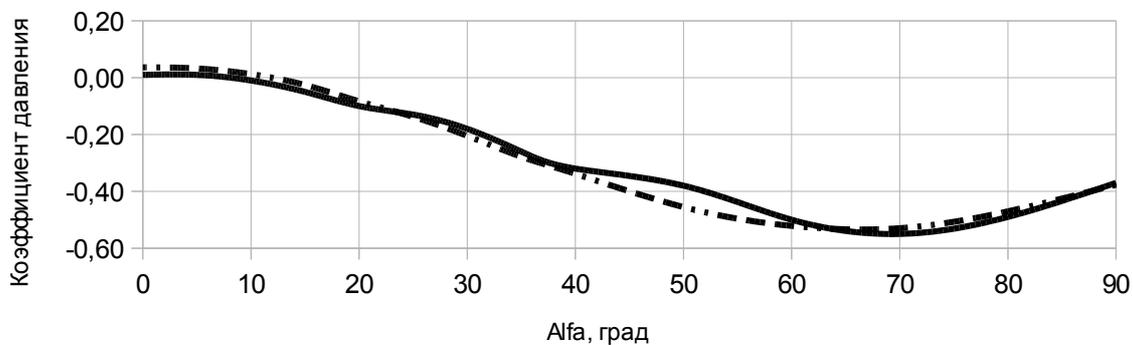
$$V_{np} = 760,92125 \cdot$$

$$\sqrt{(1 + (P_\delta - P_{ст})/101325,2)^{\frac{1}{3,5}} - 1}, [\text{км/ч}].$$

Результаты сравнения расчетных значений и экспериментальных исследований приведены в таблице 1 и на рисунках 2–5.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований и математического моделирования приемника ПВД-КЗ-1

$V, \text{км/ч}$	alfa, град	Расчетные значения					Эксперимент ЦАГИ				
		$P_\delta, \text{Па}$	\bar{p}_δ	$P_{ст}, \text{Па}$	$\bar{p}_{ст}$	$V_{np}, \text{км/ч}$	$P_\delta, \text{Па}$	\bar{p}_δ	$P_{ст}, \text{Па}$	$\bar{p}_{ст}$	$V_{np}, \text{км/ч}$
50	0	123,34	0,98	1,48	0,01	50,77	127,49	1,01	4,61	0,04	50,87
	10	124,36	0,98	-0,98	-0,01	51,49	127,49	1,01	1,57	0,01	51,37
	20	122,32	0,97	-12,50	-0,10	53,40	127,49	1,01	-10,49	-0,08	53,10
	30	115,64	0,91	-23,39	-0,18	54,22	117,68	0,92	-26,09	-0,20	54,54
	40	97,21	0,75	-42,04	-0,32	54,27	98,07	0,76	-43,93	-0,34	53,82
	50	65,73	0,50	-50,13	-0,38	49,50	58,84	0,45	-60,02	-0,46	50,04
	60	19,42	0,15	-65,84	-0,50	42,47	9,81	0,07	-69,23	-0,52	41,54
	70	-34,50	-0,26	-73,08	-0,55	28,57	-39,23	-0,29	-70,80	-0,53	24,95
	80	-93,48	-0,69	-66,26	-0,49		-98,07	-0,72	-63,74	-0,47	
	90	-132,64	-0,96	-51,07	-0,37		-137,29	-1,00	-51,78	-0,38	
250	0	2757,21	0,98	47,32	0,02	238,33	2853,74	1,02	74,14	0,03	241,02
	10	2834,67	0,98	-4,25	0,00	243,88	2863,54	0,99	-10,10	0,00	247,43
	20	2830,45	0,97	-288,93	-0,10	255,52	2824,32	0,97	-285,47	-0,10	257,58
	30	2712,20	0,92	-488,81	-0,17	258,80	2618,38	0,89	-548,78	-0,19	259,96
	35	2537,76	0,85	-770,28	-0,26	263,05	2422,24	0,82	-548,68	-0,18	252,07



— Расчетные значения ··· Эксперимент ЦАГИ

Рис. 2. Зависимость коэффициента статического давления от угла скаса потока, скорость набегающего потока 50 км/ч

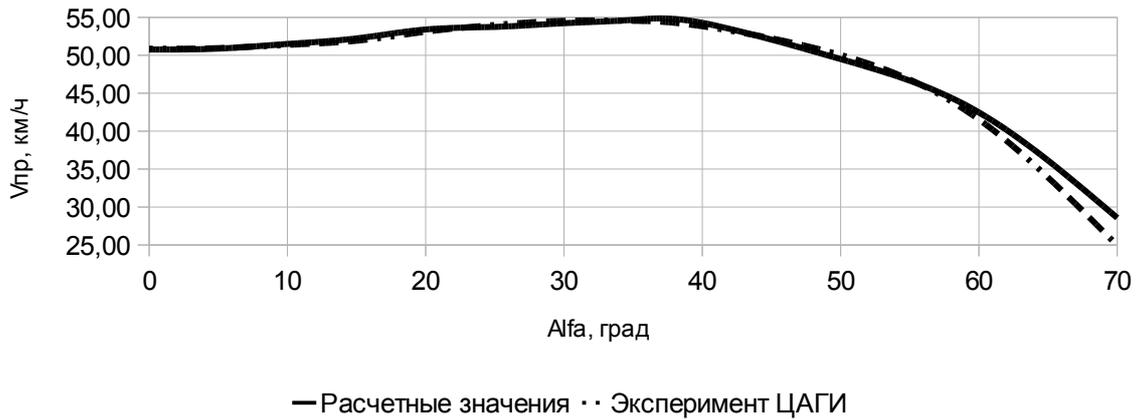


Рис. 3. Зависимость приборной скорости от угла скоса потока, скорость набегающего потока 50 км/ч

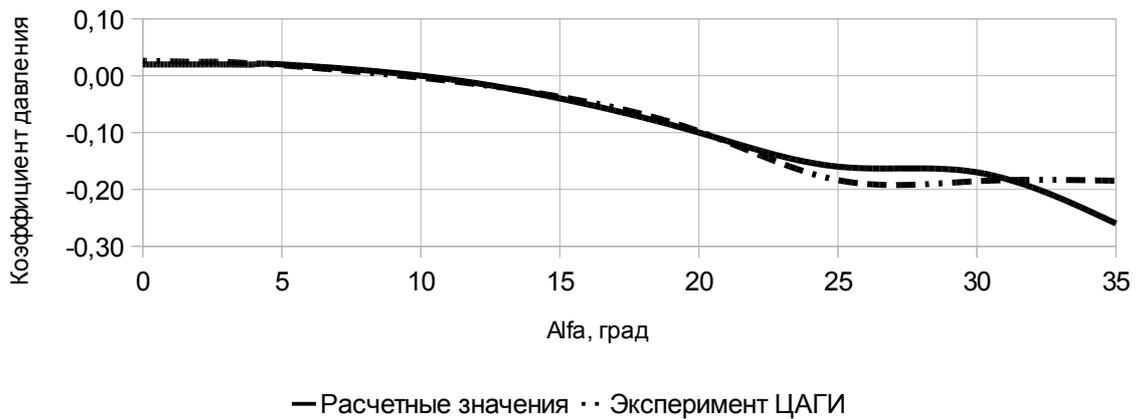


Рис. 4. Зависимость коэффициента статического давления от угла скоса потока, скорость набегающего потока 250 км/ч

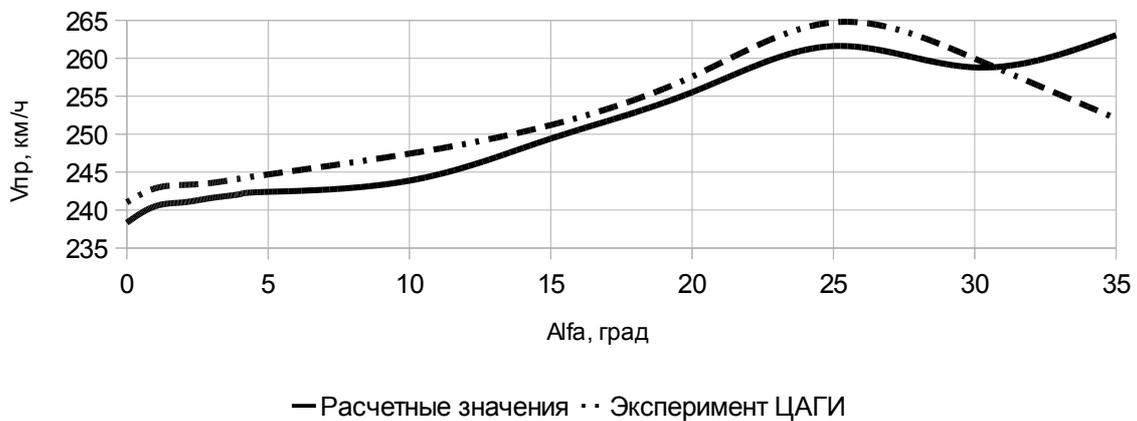


Рис. 5. Зависимость приборной скорости от угла скоса потока, скорость набегающего потока 250 км/ч

На основе полученных результатов был сделан вывод о совпадении расчетных и экспериментальных данных с относительной погрешностью до 10%, а также было сделано заключение о возможности использования результатов математического моделирования в дальнейшем при разработке новой конструкции приемника воздушного давления.

Форма воспринимающей части приемников существенно влияет на величину статического давления. Для восприятия статического давления наиболее подходящей является оживальная форма воспринимающей части, однако такая форма является более чувствительной для измерения полного давления при увеличении угла скоса потока [2].

Для улучшения метрологических характеристик по статическому давлению приемника ПВД-КЗ-1 была предложена оживальная воспринимающая часть приемника, а также другой диаметр отверстий отбора статического давления (1,5 мм вместо 1 мм). Моделирование цилиндрического приемника проводилось с отверстиями отбора статического давления диаметром 1,5 мм. Сечение приемника с оживальной воспринимающей частью приведено на рисунке ба и с цилиндрической - на рисунке бб.

Горизонтальная скорость V_x вычислялась по формуле:

$$V_x = V \cdot \cos(\alpha), \text{ [км/ч].}$$

Погрешность вычисления скорости определялась по формуле

$$\Delta V_{np} = V_{np} - V_x, \text{ [км/ч].}$$

На высоте $H=5000$ м давление $P=54019,8079$ Па, на высоте $H=5020$ м давление $P=53875,5535$ Па. При изменении высоты на $\Delta H=20$ м изменение давления составляет $\Delta P=144,2544$ Па.

Погрешность измерения высоты приемником определялась по формуле:

$$\Delta H = \frac{20 \cdot P_{cm}}{\Delta P} = \frac{20 \cdot P_{cm}}{144,2544}, \text{ [м].}$$

Результаты сравнения моделирования приемников с различными воспринимающими частями приведены в таблицах 2,3 и на рисунках 7–10.

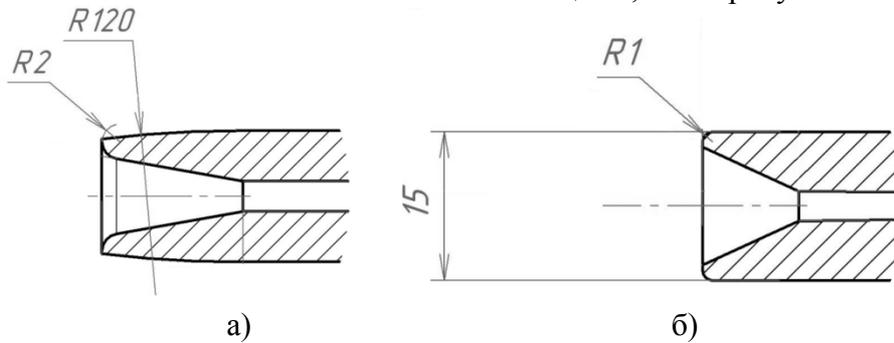


Рис. 6. ПВД с оживальной(а) и цилиндрической(б) воспринимающей частью.

Таблица 2 – Результаты математического моделирования приемника с цилиндрической формой воспринимающей части

Alfa, град	V , км/ч	V_x , км/ч	P_{∂} , Па	\bar{p}_{∂}	P_{cm} , Па	\bar{p}_{cm}	V_{np} , км/ч	ΔV_{np} , км/ч	ΔH , м
0	50	50,00	116,36	0,98	1,46	0,01	49,30	-0,70	0,20
10	50	49,24	115,89	0,98	-1,11	-0,01	49,75	0,50	-0,15
20	50	46,99	114,75	0,97	-12,03	-0,10	51,78	4,80	-1,67
30	50	43,30	107,04	0,91	-22,36	-0,19	52,31	9,01	-3,10
40	50	38,30	87,91	0,74	-36,81	-0,31	51,36	13,06	-5,10
50	50	32,14	58,37	0,49	-48,25	-0,41	47,49	15,35	-6,69
60	50	25,00	19,80	0,17	-56,50	-0,48	40,17	15,17	-7,83
70	50	17,11	-22,21	-0,19	-68,00	-0,58	31,12	14,02	-9,43
80	50	8,69	-75,48	-0,64	-60,21	-0,51			-8,35
90	50	0,00	-113,41	-0,96	-43,14	-0,37			-5,98
0	250	250,00	2936,55	0,99	43,79	0,01	246,16	-3,84	6,07
10	250	246,20	2922,09	0,99	-7,99	0,00	247,73	1,52	-1,11
20	250	234,93	2889,69	0,98	-276,45	-0,09	257,41	22,48	-38,33
30	250	216,51	2700,62	0,91	-612,39	-0,21	263,24	46,73	-84,90

Таблица 3 – Результаты математического моделирования приемника с оживальной формой

воспринимающей части

Alfa, град	V , км/ч	V_x , км/ч	P_∂ , Па	\bar{p}_∂	P_{cm} , Па	\bar{p}_{cm}	V_{np} , км/ч	ΔV_{np} , км/ч	ΔH , м
0	50	50,00	118,86	1,01	1,48	0,01	49,83	-0,17	0,21
10	50	49,24	119,28	1,01	-1,00	-0,01	50,44	1,20	-0,14
20	50	46,99	117,59	1,00	-12,31	-0,10	52,41	5,43	-1,71
30	50	43,30	110,27	0,93	-22,45	-0,19	52,98	9,68	-3,11
40	50	38,30	94,29	0,80	-37,30	-0,32	52,75	14,45	-5,17
50	50	32,14	64,85	0,55	-48,25	-0,41	48,91	16,77	-6,69
60	50	25,00	19,04	0,16	-54,87	-0,46	39,54	14,54	-7,61
70	50	17,11	-40,41	-0,34	-71,33	-0,60	25,58	8,47	-9,89
80	50	8,69	-93,35	-0,79	-61,67	-0,52			-8,55
90	50	0,00	-130,30	-1,10	-42,85	-0,36			-5,94
0	250	250,00	2955,70	1,00	47,33	0,02	246,82	-3,18	6,56
10	250	246,20	2957,04	1,00	-5,39	0,00	249,08	2,87	-0,75
20	250	234,93	2919,76	0,99	-279,25	-0,09	258,72	23,80	-38,72
30	250	216,51	2753,40	0,93	-492,81	-0,17	260,60	44,09	-68,32

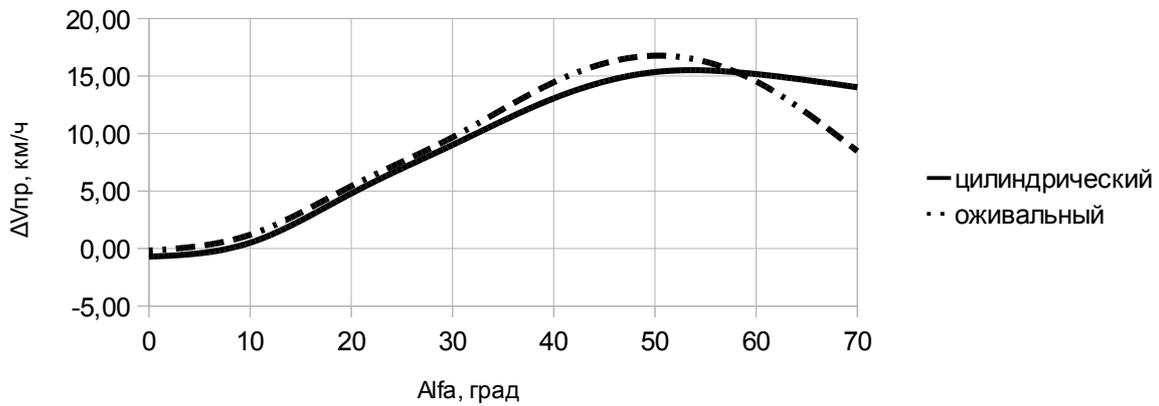


Рис. 7. Зависимость погрешности измерения приборной скорости от угла скоса потока, скорость набегающего потока 50 км/ч

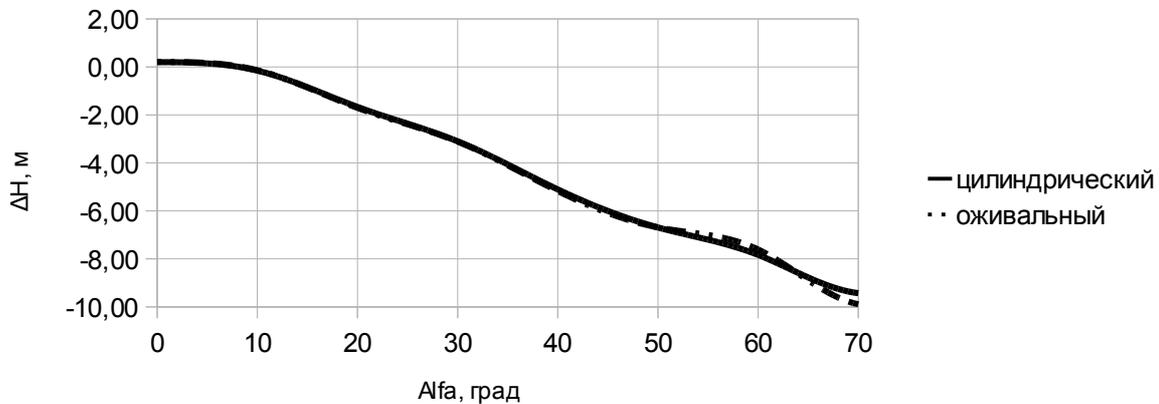


Рис. 8. Зависимость погрешности измерения высоты от угла скоса потока, скорость набегающего потока 50 км/ч

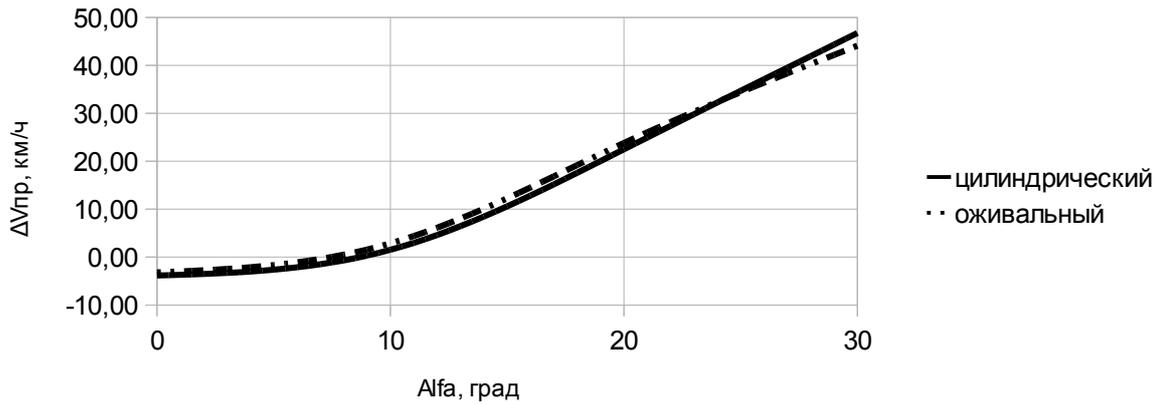


Рис.9. Зависимость погрешности измерения приборной скорости от угла скоса потока, скорость набегающего потока 250 км/ч

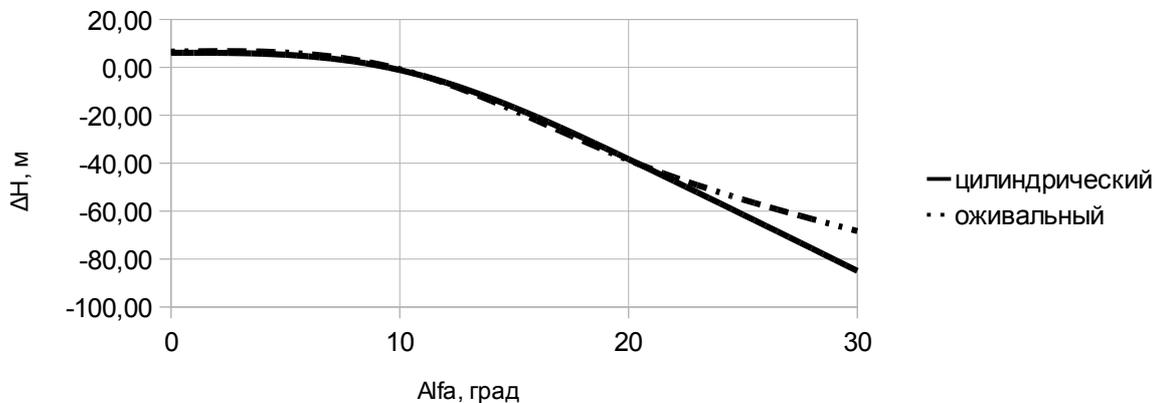


Рис.10. Зависимость погрешности измерения высоты от угла скоса потока, скорость набегающего потока 250 км/ч

В результате удалось получить приемник воздушного давления оживальной формы с лучшими характеристиками по измерению высоты и несколько худшими характеристиками по определению скорости по сравнению с приемником цилиндрической формы.

Приемник с оживальной воспринимающей частью позволяет измерять статическое давление с меньшей величиной погрешности, чем ПВД с цилиндрической частью, особенно при углах скоса потока от 30 до 60 градусов. При угле скоса потока 50 градусов погрешность измерения приборной скорости у приемника с оживальной формой воспринимающей части больше на 1,9 км/ч, чем у приемника с цилиндрической формой воспринимающей части. Полученные расчетные данные подтверждаются результатами многочисленных экспериментальных

исследований, описанных в зарубежной и отечественной литературе [1,2].

Дальнейшая конструкторская работа будет направлена на исследование приемников оживальной формы с носиком, скругленным полиномами, и изменение диаметра, взаимного расположения, количества отверстий отбора статического давления.

Библиографический список

1. NASA Technical Report 1303 "Wind-tunnel investigation of a number of total-pressure tubes at high angles of attack subsonic, transonic and supersonic speeds" by William Gracey, 1956.
2. Клюев, Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов: учебное пособие[Текст] / Г.И. Клюев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов; под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 509 с.

COMPARISON OF MATHEMATICAL SIMULATION RESULTS AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF PVD-K3-1 AIR PRESSURE PROBE

© 2012 V. N. Moiseev, M. M. Dubinina, A. A. Pavlovsky, M. Y. Sorokin

Ulyanovsk instrument manufacturing design bureau

The paper presents the test results and mathematical modeling data of air pressure probes and gives justification of using mathematical modeling in further design of similar air pressure probes, as well as provides estimate of applicability of OpenFOAM program for modeling air pressure probe. The paper also gives impact of air stream wash on measurement error of air pressure.

Mathematical modeling, air pressure probe, turbulence model.

Информация об авторах

Моисеев Владимир Николаевич, инженер расчетно-теоретического отдела, ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения». E-mail: v.n.moiseev@mail.ru. Область научных интересов: зондовые средства восприятия давлений аэрометрических систем летательных аппаратов.

Дубинина Мария Михайловна, инженер-конструктор расчетно-теоретического отдела, ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения». E-mail: masha_dubinina.73@mail.ru. Область научных интересов: зондовые средства восприятия давлений аэрометрических систем летательных аппаратов.

Павловский Александр Андреевич, начальник бригады, ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения». E-mail: rto@ukbp.ru. Область научных интересов: зондовые средства восприятия давлений аэрометрических систем летательных аппаратов.

Сорокин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, начальник отдела, ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения». E-mail: rto@ukbp.ru. Область научных интересов: зондовые средства восприятия давлений аэрометрических систем летательных аппаратов.

Moiseev Vladimir Nikolaevich, engineer of department of JSC «Ulyanovsk instrument manufacturing design bureau». E-mail: v.n.moiseev@mail.ru. Area of research: primary pressure sensors of aircraft airdata measuring systems.

Dubinina Mariya Mikhailovna, engineer of department of JSC «Ulyanovsk instrument manufacturing design bureau». E-mail: masha_dubinina.73@mail.ru. Area of research: primary pressure sensors of aircraft airdata measuring systems.

Pavlovsky Alexander Andreevich, head of crew of JSC «Ulyanovsk instrument manufacturing design bureau». E-mail: rto@ukbp.ru. Area of research: primary pressure sensors of aircraft airdata measuring systems.

Sorokin Mikhail Yuryevich, candidate of engineering sciences, head of department of JSC «Ulyanovsk instrument manufacturing design bureau». E-mail: rto@ukbp.ru. Area of research: primary pressure sensors of aircraft airdata measuring systems.