

НАЗНАЧЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОТОЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Важной задачей, имеющей место при разработке новых приемников статического давления (ПСД), является назначение допустимых отклонений геометрических параметров от их номинальных значений, при которых девиация коэффициента давления проектируемого приемника не превышает заданного значения. Для решения данной задачи можно использовать два метода: метод наихудшего случая и метод статистических испытаний [1, 2]. При этом проектировщикам приходится искать некоторые компромиссные решения, в частности, определение допустимых отклонений геометрических параметров приемника, исходя из противоречивых требований: обеспечения минимального значения девиации коэффициента давления и обеспечения приемлемой стоимости изделия.

При этом использование математической модели проточного приемника статического давления существенно увеличивает эффективность процесса проектирования. Задание допусков в случае применения метода наихудшего случая почти всегда приводит к неоправданному завышению требований по точности изготовления ПСД и, соответственно, росту его стоимости. Использование же метода статистических испытаний (статистического моделирования) в большинстве случаев позволяет приходиться к отмеченным выше компромиссным решениям.

Рассмотрим использование метода статистических испытаний (метода статистического моделирования с помощью генерации случайных чисел) для решения данной задачи. Схема исследуемых приемников и их геометрические параметры показаны на рисунке.1

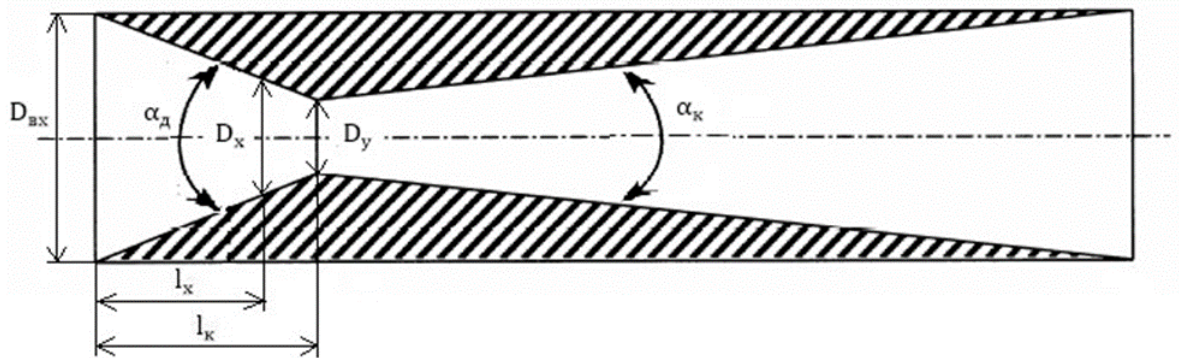


Рисунок 1 – Принципиальная схема проточного ПВД: α_k – угол сужение конфузора; α_d – угол раскрытия диффузора; $D_{вх}$, D_x , D_y – диаметры входной части, сечения отбора давления и узкой части соответственно; l_k , l_x – длина конфузора и удаление сечения отбора давления P_x от начала конфузора

Базой для генерирования таких чисел являются случайная выборка из ряда равномерно распределенных случайных чисел в диапазонах допусков на возможные отклонения геометрических параметров проточных приемников статического давления. Очевидно, что с использованием метода статистических испытаний можно определить вероятность получения того или иного интервального значения отклонения девиации коэффициента давления приемника при заданных допусках на выдерживание его геометрических параметров в процессе изготовления.

В качестве примера рассмотрим статистическое моделирование некоторого вариационного ряда проточных приемников статического давления [1].

Ниже приводится пример статистического моделирования ПВД проточного типа. При решении задачи назначения допусков на геометрические параметры приемников с использованием метода статистических испытаний были приняты следующие ограничения:

- допуск на углы сужения конфузороного участка α_k и раскрытия диффузорного участка α_d ПВД от 0,1 до 3,5°;
- допуск на диаметры входной и узкой частей $D_{вх}$, D_y и сечения отбора давления $D_{от}$ от 0,005 до 1,5 мм.

Максимальные значения девиации коэффициента давления моделируемых приемников при различных допусках на геометрические параметры ПСД, полученные в процессе реализации вычислительных экспериментов (метод статистических испытаний), приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Максимальные значения девиации коэффициента давления при различных диапазонах изменения допусков на геометрические параметры ПСД

№ эксперимента		$\alpha_k, ^\circ$	$\alpha_d, ^\circ$	$D_{вх}, мм$	$D_y, мм$	$D_{от}, мм$	$\Delta \bar{p}_{\max}^*$
1	Максимальное значение	40,05	9,05	25,0025	20,0025	23,0025	0,0030
	Номинальное значение	40	9	25	20	23	
	Минимальное значение	39,95	8,95	24,9975	19,9975	22,9975	
2	Максимальное значение	40,25	9,25	25,005	20,005	23,005	0,011
	Номинальное значение	40	9	25	20	23	
	Минимальное значение	39,75	8,75	24,995	19,995	22,995	
3	Максимальное значение	40,25	9,25	25,01	20,01	23,01	0,014
	Номинальное значение	40	9	25	20	23	
	Минимальное значение	39,75	8,75	24,99	19,99	22,99	
4	Максимальное значение	40,25	9,25	25,05	20,05	23,05	0,036
	Номинальное значение	40	9	25	20	23	
	Минимальное значение	39,75	8,75	24,95	19,95	22,95	
5	Максимальное значение	40,5	9,5	25,075	20,075	23,075	0,063
	Номинальное значение	40	9	25	20	23	
	Минимальное значение	39,5	8,5	24,925	19,925	22,925	
6	Максимальное значение	40,5	9,5	25,1	20,1	23,1	0,076
	Номинальное значение	40	9	25	20	23	
	Минимальное значение	39,5	8,5	24,9	19,9	22,9	
7	Максимальное значение	40,5	9,5	25,3	20,3	23,3	0,202
	Номинальное значение	40	9	25	20	23	
	Минимальное значение	39,5	8,5	24,7	19,7	22,7	
8	Максимальное значение	40,5	9,5	25,5	20,5	23,5	0,416
	Номинальное значение	40	9	25	20	23	
	Минимальное значение	39,5	8,5	24,5	19,5	22,5	
9	Максимальное значение	40,5	9,5	25,7	20,7	23,7	0,533
	Номинальное значение	40	9	25	20	23	
	Минимальное значение	39,5	8,5	24,3	19,3	22,3	
10	Максимальное значение	41,75	10,75	25,75	20,75	23,75	0,678
	Номинальное значение	40	9	25	20	23	
	Минимальное значение	38,25	7,25	24,25	19,25	22,25	

По результатам проведенного моделирования (таблица 1) можно сделать **ВЫВОДЫ:**

- максимальное значение девиации коэффициента давления проточного приемника увеличивается с увеличением допустимого отклонения его геометрических параметров;

- при выше приведенных исходных ограничениях на значения допусков на геометрические параметры ПСД максимальное девиации коэффициента давления составляет 0,0030...0,6780;

- при достаточно малых допусках на изменение диаметров входной части, узкой части и сечения отбора давления от 0,005 до 0,15 мм максимальное значение девиации коэффициента давления составляет 0,0030...0,063.

Для нахождения распределения вероятности тех или иных значений девиации коэффициента давления приемника было принято: число испытаний равное 3000; число разбиения равное 10. Распределения вероятности отклонений девиации коэффициента давления приемников в экспериментах (таблица 1) представлены на рисунках 2 -11.

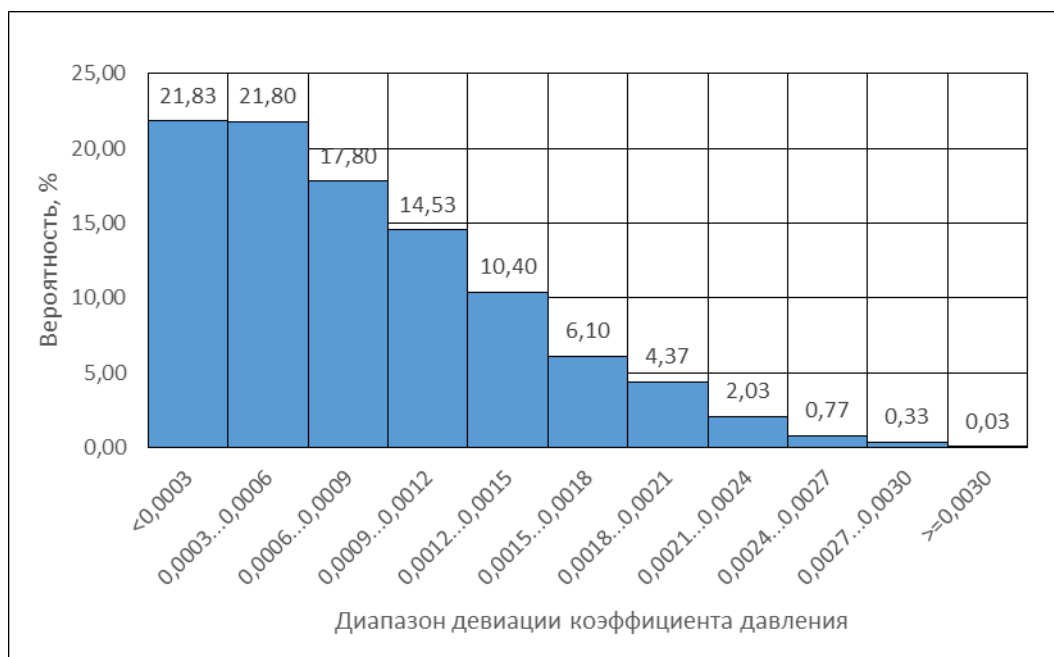


Рисунок 2 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент 1)



Рисунок 3 – Распределение вероятностей вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент 2)

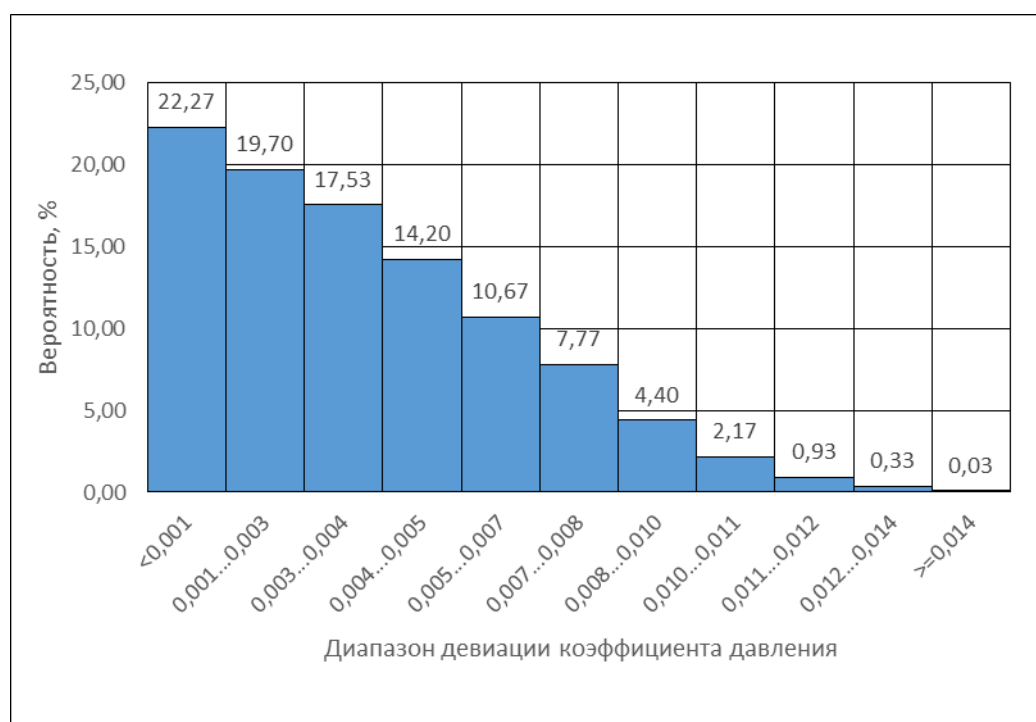


Рисунок 4 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент 3)

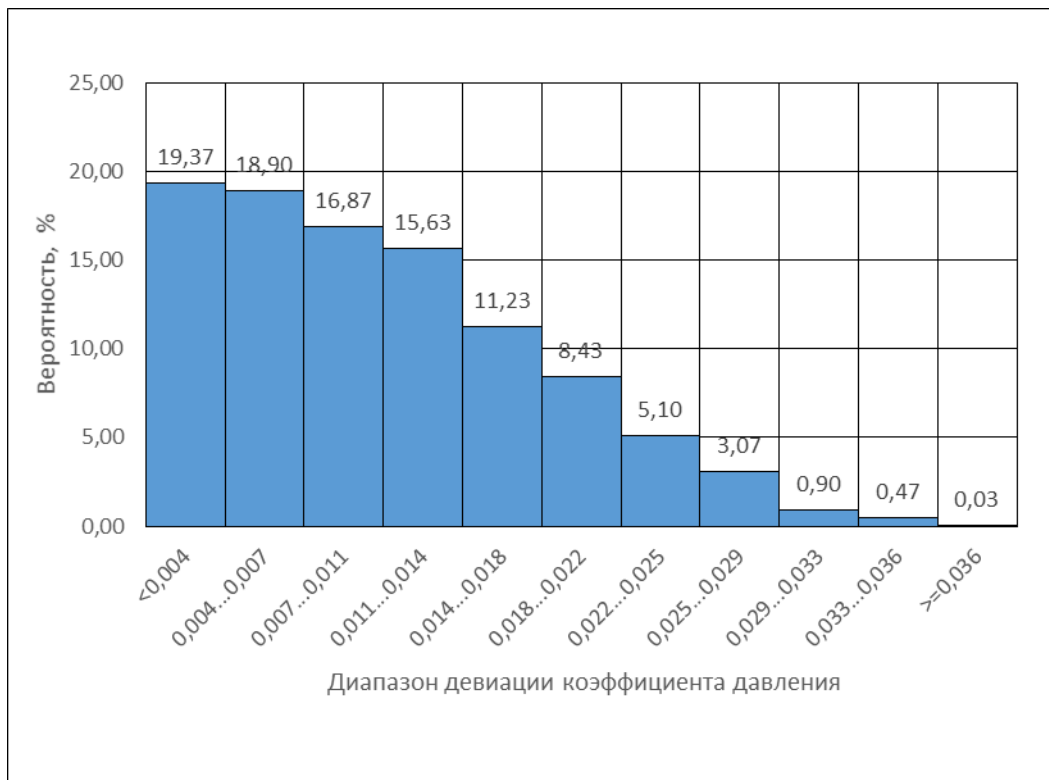


Рисунок 5 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент 4)

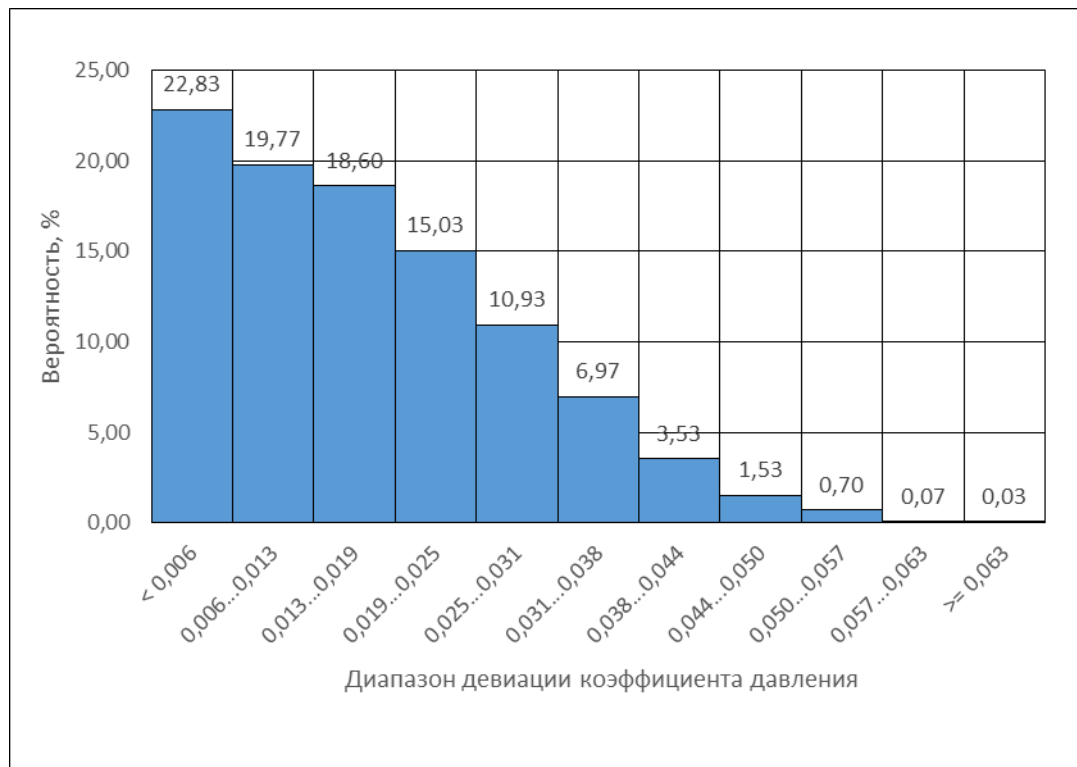


Рисунок 6 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент 5)



Рисунок 7 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент 6)



Рисунок 8 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент 7)



Рисунок 9 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент 8)



Рисунок 10 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент 9)

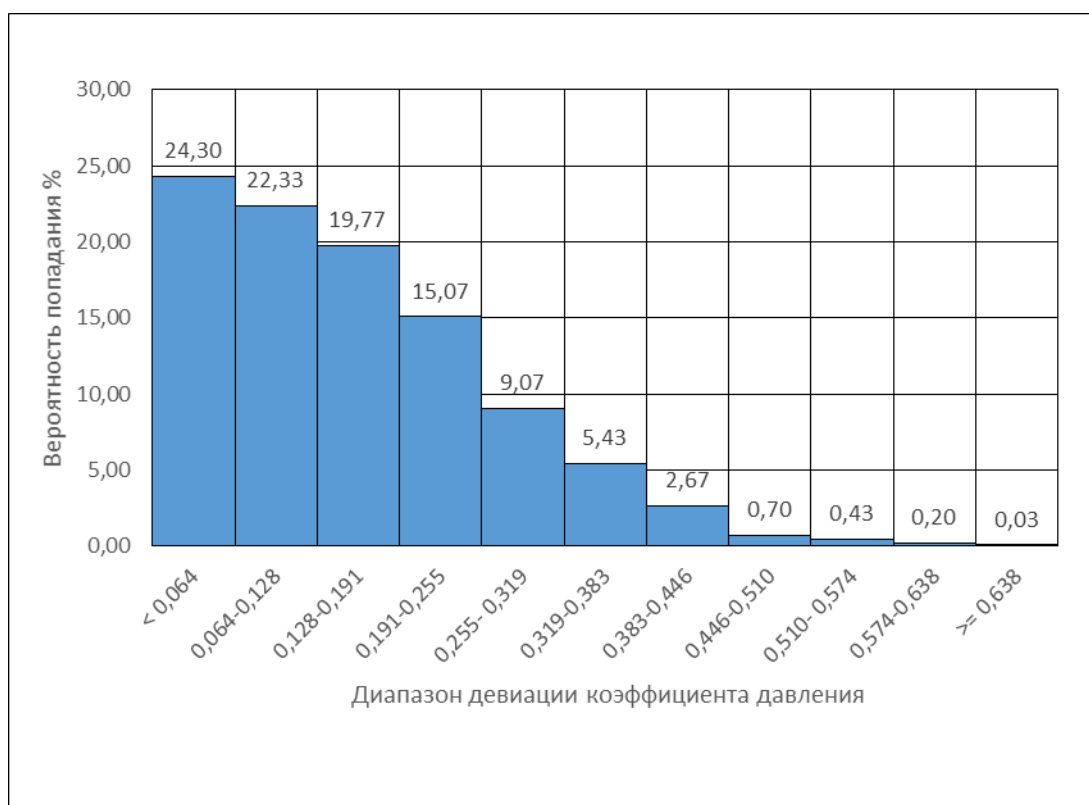


Рисунок 11 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент 10)

Как следует из представленного выше исследования, распределение вероятностей значений девиации коэффициента давления проточных приемников статического давления подчиняется закону экспоненциального распределения. Очевидно, вероятность того, что при изготовлении приемника с допусками, табл. 1, значение девиации коэффициента давления будет меньше половины ее максимального значения составляет более 90%.

Использование данных (таблица 1 и рисунки 2-11) позволит разработчикам проточных ПСД назначать допуски на отклонения геометрических параметров проточных приемников от их номинальных значений в процессе их проектирования. Исходя из конкретных значений отклонений геометрических параметров приемников и соответствующего этим отклонениям распределения вероятностей значений девиации коэффициента давления можно находить компромисс между стоимостью изделия и заданной техническим заданием точностью измерения высотно-скоростных параметров. Ужесточение допусков на геометрические параметры

уменьшает девиацию коэффициента давления, но повышает требования к выдерживанию линейных и угловых размеров изделия, что неизбежно повышает стоимость приемника. Имея полученные распределения вероятностей можно снизить стоимость ПСД за счет расширения допусков на его геометрические параметры. Например, если вероятность того, что при заданных допусках девиации коэффициента давления не превысит заданной величины равна 0,9, то, всего скорее, только один из десяти изготовленных ПСД будет забракован.

Полученные результаты статистического моделирования ПСД, с учетом связи между девиацией коэффициента давления и погрешности в определении высотно-скоростных параметров, позволяют сделать вывод, что при проектировании проточных приемников статического давления вполне приемлемыми быть следующие требования к допускам на отклонение геометрических параметров ПСД:

1. Допуск на углы сужения конфузора α_k и раскрытия диффузора α_d ПВД от 0,5 до 3,5°;
2. Допуск на диаметры входной, узкой частей $D_{вх}$, D_y и сечения отбора давления $D_{от}$ от 0,05 до 1,5 мм.

При допустимом значении девиации коэффициента давления от 0,105 до 0,295.

Соблюдение данных требований позволит обеспечить минимальное значение девиации коэффициента давления приемника и уменьшить стоимость готового изделия, обеспечить допустимые погрешности в определении высоты и скорости полета, заданной в техническом задании на разработку бортовой авиационной системы высотно-скоростных параметров.

Конкретные величины допустимых погрешностей в определении высоты и скорости полета ЛА при формировании требований технического задания на разработку систем измерения высотно-скоростных параметров и систем автоматического и автоматизированного управления полетом

приводятся в соответствующих нормативных документах, например, в нормах летной годности самолетов и вертолетов.

Найти величины допусков на отклонение геометрических параметров ПСД, при которых все 100% приемников будут соответствовать заданным требованиям можно используя для анализа метод наихудшего случая, суть которого заключается в том, что все отклонения геометрических параметров приемника задаются таким образом, чтобы значение девиации коэффициента давления было максимальным. Следовательно, используя метод наихудшего случая при проектировании ПСД, можно со стопроцентной вероятностью гарантировать, что изготовленный приемник не будет забракован вследствие недопустимой величины девиации его коэффициента давления [2].

Рассмотрим применение метода наихудшего случая для управления девиацией коэффициента давления, которая возникает вследствие отклонений его геометрических параметров от их номинальных значений применительно к проточным приемникам 1, 2, 3 и 4 (таблица 2).

Таблица 2 – Геометрические параметры моделируемых проточных ПСД

№ ПСД	α_k°	α_d°	$D_{вх} \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$D_x \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$D_y \cdot 10^{-3} \text{ м}$
1	50	10	30,0	24,5	16,0
2	50	10	25,0	16,5	12,5
3	40	12	25,0	15,5	12,5
4	50	10	30,0	26,0	17,0

В таблице 3 представлены, полученные в результате моделирования, максимальные значения девиации коэффициента давления $\Delta \bar{r}_{\text{макс}}$ и погрешность в определении скорости и высоты полета для выдерживания размеров $D_{вх}$, D_x , D_y в соответствии с различными качествами уровня относительной геометрической точности диаметров и углов α_k , α_d , [3, 4].

Таблица 3 – Максимальные значения $\Delta\bar{p}_{\text{мак}}$ и погрешности в определении скорости и высоты полета ($V_0=41,67$ м/с, $H_0=1000$ м)

Квалитет/уровень точности	№ ПСД	$\Delta\bar{p}_{\text{мак}}$	δV (%)	δH (%)
4В/2	1	0,0014	0,070	0,006
	2	0,0013	0,065	0,005
	3	0,0013	0,065	0,005
	4	0,0015	0,075	0,007
12В/6	1	0,0496	2,512	0,433
	2	0,0474	2,399	0,413
	3	0,0431	2,179	0,375
	4	0,0528	2,676	0,461

Полученные результаты (таблица 3) показали, что при изготовлении ПСД возможно использовать квалитет 12В, уровень точности 6, при этом погрешность в определении высотно-скоростных параметров не превышает допустимого уровня. Изготовления ПСД в соответствии с более высоким классом точности приводит к увеличению затрат на их производство [5, 6].

При решении задачи назначения допусков на геометрические параметры приемников с использованием метода статистических испытаний были приняты следующие ограничения:

- допуск на углы сужения конфузорного участка α_k и раскрытия диффузорного участка α_d ПСД от 0,1 до 3,5 °;
- допуск на диаметры входной и узкой частей $D_{вх}, D_y$ и сечения отбора давления D_x от 0,005 до 1,5 мм.
- Число испытаний 3000;
- Число разбиений 10;
- Высота полета для вычисления ее погрешности равна 1000 м;
- Скорость полета для вычисления ее погрешности равна 69,44 м/с.
- Угол скоса набегающего воздушного потока от 5 до 30 градусов.

При этом в таблице 4 приведены различные диапазоны изменения допусков на геометрические параметры проточных приемников.

Таблица 4 – Диапазоны изменения допусков на геометрические параметры проточных ПСД

№ эксперимента		$\alpha_k, ^\circ$	$\alpha_d, ^\circ$	$D_{вх}, \text{мм}$	$D_y, \text{мм}$	$D_x, \text{мм}$
1	Максимальное значение	40,05	9,05	25,0025	20,0025	22,0025
	Номинальное значение	40	9	25	20	22
	Минимальное значение	39,95	8,95	24,9975	19,9975	21,9975
2	Максимальное значение	40,25	9,25	25,005	20,005	22,005
	Номинальное значение	40	9	25	20	22
	Минимальное значение	39,75	8,75	24,995	19,995	21,995
3	Максимальное значение	40,25	9,25	25,01	20,01	22,01
	Номинальное значение	40	9	25	20	22
	Минимальное значение	39,75	8,75	24,99	19,99	21,99
4	Максимальное значение	40,25	9,25	25,05	20,05	22,05
	Номинальное значение	40	9	25	20	22
	Минимальное значение	39,75	8,75	24,95	19,95	21,95
5	Максимальное значение	40,5	9,5	25,075	20,075	22,075
	Номинальное значение	40	9	25	20	22
	Минимальное значение	39,5	8,5	24,925	19,925	21,925
6	Максимальное значение	40,5	9,5	25,1	20,1	22,1
	Номинальное значение	40	9	25	20	22
	Минимальное значение	39,5	8,5	24,9	19,9	21,9
7	Максимальное значение	40,5	9,5	25,3	20,3	22,3
	Номинальное значение	40	9	25	20	22
	Минимальное значение	39,5	8,5	24,7	19,7	21,7
8	Максимальное значение	40,5	9,5	25,5	20,5	22,5
	Номинальное значение	40	9	25	20	22
	Минимальное значение	39,5	8,5	24,5	19,5	21,5
9	Максимальное значение	40,5	9,5	25,7	20,7	22,7
	Номинальное значение	40	9	25	20	22
	Минимальное значение	39,5	8,5	24,3	19,3	21,3
10	Максимальное значение	41,75	10,75	25,75	20,75	22,75
	Номинальное значение	40	9	25	20	22
	Минимальное значение	38,25	7,25	24,25	19,25	21,25

Максимальные значения девиации коэффициента давления моделируемых приемников при различных допусках на геометрические параметры ПСД и значениях угла скоса набегающего воздушного потока, полученные в процессе реализации вычислительных экспериментов (метод

статистических испытаний), приедены в таблице 5 Здесь под девиацией понимается отклонение значения коэффициента давления приемника, обусловленное скосом набегающего воздушного потока.

Таблица 5 – Максимальные значения девиации коэффициента давления $\Delta\bar{p}_{\text{мак}}^*$ при различных диапазонах изменения допусков на геометрические параметры ПСД ($\cdot 10^{-3}$)

№ Эксперимента	Угол скоса набегающего воздушного потока $\alpha_c, ^\circ$											
	5	6	8	10	12	15	17	20	22	25	27	30
1	0,6	0,4	0,2	0,3	0,6	1,0	1,3	1,7	2,0	2,5	2,7	3,1
2	2,7	2,1	0,7	1,4	2,4	4,5	5,9	7,8	9,5	11,4	12,8	14,7
3	2,7	2,0	0,8	1,5	2,7	4,8	6,3	8,1	10,1	12,3	14,1	15,5
4	3,3	2,6	2,1	3,4	5,2	8,6	10,9	14,0	16,1	19,7	20,1	23,0
5	6,4	5,1	3,4	5,7	8,7	14,5	18,2	23,2	29,8	33,6	38,3	42,6
6	6,6	5,6	4,4	6,6	11,2	18,3	20,5	28,4	33,8	39,3	42,7	48,9
7	10,4	10,4	11,9	18,3	24,7	34,0	45,4	60,4	66,2	84,0	85,6	96,9
8	14,4	15,9	21,2	28,3	44,8	61,6	75,8	94,9	107,1	135,0	150,5	162,8
9	18,9	21,5	32,7	44,3	61,3	85,3	111,2	141,1	146,3	171,1	194,6	220,4
10	36,6	36,9	39,3	68,6	89,0	144,4	157,6	224,0	254,5	323,0	361,8	363,8

Зависимость максимальных значений девиации коэффициента давления $\Delta\bar{p}_{\text{мак}}^*$ от угла скоса потока α_c проточных ПСД представлена на рисунке 12.

По данным, приведенным в таблице 5, и графикам (рисунок 12) видно, что девиация коэффициента давления проточных ПСД нелинейно зависит от угла скоса набегающего воздушного потока. При достаточно малых значениях угла скоса потока (до 8 градусов), девиация коэффициента давления уменьшается с увеличением угла скоса потока.

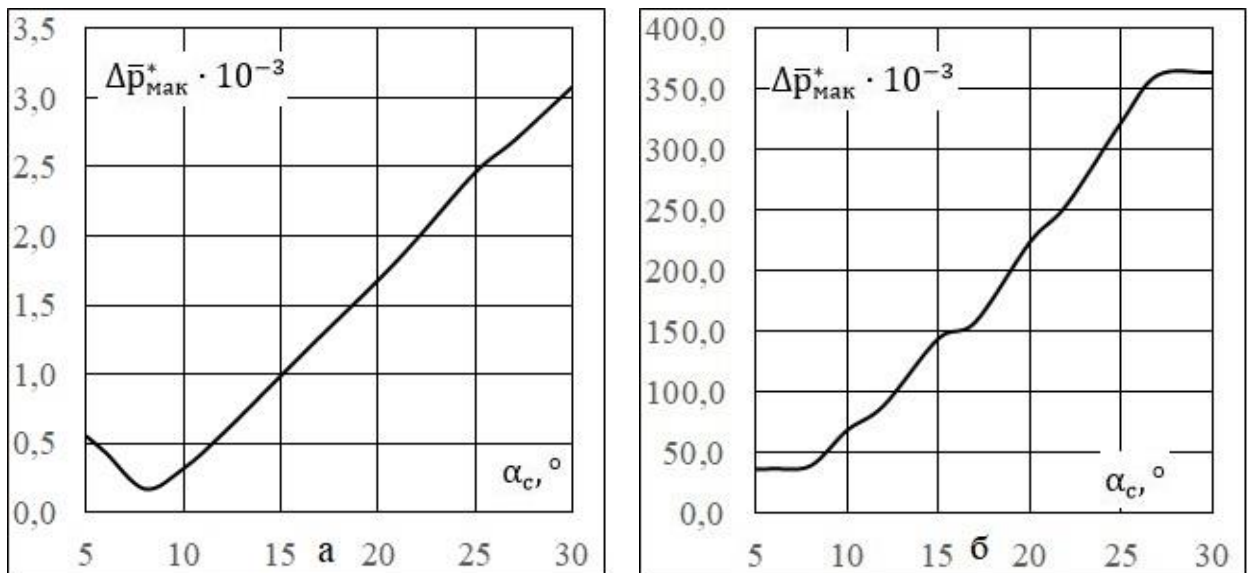


Рисунок 12 – Зависимость максимальных значений девиации коэффициента давления $\Delta \bar{p}_{\text{max}}^*$ от угла скоса потока α_c : а – эксперимент № 1; б – эксперимент № 10

По результатам проведенных исследований проточных ПСД, в части влияния углов скоса набегающего воздушного потока на девиацию коэффициента давления приемников можно сделать следующие основные выводы:

1. Влияние скоса потока на девиацию коэффициента давления ПСД в значительной степени определяется геометрическими параметрами приемника, что хорошо согласуется с результатами исследований угловых характеристик приемников полного давления (влияние геометрии входной части канала полного давления), представленными в монографии [7].

2. Уменьшение девиации коэффициента давления проточного приемника, обусловленной скосами набегающего воздушного потока, может быть достигнуто с помощью выбора, прежде всего, таких геометрических параметров ПСД, как коэффициент диафрагмы и относительное удаление сечения отбора давления, так как именно эти параметры и оказывают максимальное влияние на коэффициент давления приемника, а, следовательно, и на его девиацию.

Представленные в работе результаты могут быть использованы при проектировании ПСД с внутренней профилированной поверхностью

(проточных приемников) в части их параметрического синтеза на начальном этапе разработки и назначении допустимых отклонений их геометрических параметров от номинальных значений на этапе разработки конструкторской документации.

Представленные материалы позволили авторам сформировать методику и разработать программное обеспечение автоматизированного параметрического синтеза проточных приемников статического давления [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыу Конг Кием. Назначение допусков на геометрические параметры проточных приемников воздушных давлений с применением метода статистических испытаний / Лыу Конг Кием, И.П. Ефимов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 7. – С. 17-23.

2. Лыу Конг Кием. К вопросу выбора геометрических параметров проточных приемников воздушных давлений, девиация коэффициента давления которых не превышает заданного значения / Лыу Конг Кием, И.П. Ефимов // Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов XII Международной молодежной научной конференции. – Ульяновск : УИГА, 2020. – С. 26-28.

3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 656 с.

4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.

5. Лыу Конг Кием. К вопросу о связи точности изготовления проточного приемника статического давления с погрешностью в определении высотно-скоростных параметров / Лыу Конг Кием, И.П. Ефимов // Информатика и вычислительная техника: сб. науч. тр. XIII Всероссийской.

науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых ИВТ-2021/ под общей ред. В.Н. Негоды. – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 185-191.

6. Лыу Конг Киём. К вопросу уменьшения погрешности при измерении высотно-скоростных параметров ЛА / Лыу Конг Киём, И.П. Ефимов // Вузовская наука в современных условиях: сб. матер. 55-й науч. -техн. конф. в 3 ч. Ч. 2. – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 91-94.

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

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667764. Программа функционального синтеза приемников статического давления // Лыу Конг Киём, И. П. Ефимов; правообладатель: ФГБОУ ВО «УлГТУ»; заявл. 15.10.2021; зарегистр. 02.11.2021. – М.: Роспатент, 2021.