

НАЗНАЧЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИЕМНИКОВ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ С НАРУЖНОЙ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

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. 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

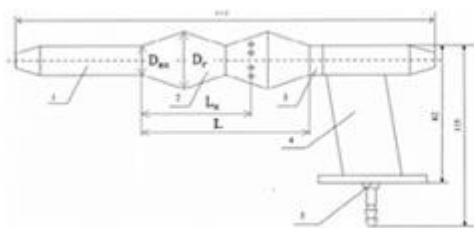


Рисунок 1 - Геометрические параметры ПСД

1 – входной цилиндрический участок, 2 – профилированный участок, 3 – контрольная гайка, 4 – крепежный кронштейн, 5 – штуцер отбора «статика»; $l = L_x/L$ – координата сечения отбора давления; $\delta = D_{вх} - D_г$ – амплитуда гофров

В качестве примера рассмотрим статистическое моделирование некоторого вариационного ряда приемников статического давления с наружной профилированной поверхностью и двумя контурами компенсации аэродинамической погрешности, рисунок 1. Расчеты коэффициента давления (моделирование) приемников производилось с использованием [1].

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

- допуск на диаметры входного участка ($D_{вх}$), гофров ($D_г$) от 0,0025 до 1,5 мм;
- допуск на длину профилированного участка (L) и удаление сечения отбора давления от начала профилированного участка (L_x) от 0,0025 до 1,5 мм;
- Число испытаний 3000;
- Число разбиений 10;
- Высота полета для вычисления ее погрешности равна 1000 м;
- Скорости полета для вычисления ее погрешности равна 15 м/с.
- Угол скоса воздушного потока равен 0° .

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

давления приемника, обусловленное изменением скорости набегающего воздушного потока в диапазоне от 13,89 до 69,44 м/с.

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

ПСД

№ эксперимента		$D_{вх}$	$D_{г}$	L	L_x	$\Delta \bar{p}_{\max}^*$
1	Максимальное значение	13,0025	18,0025	70,0025	38,5025	0,0002
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	12,9975	17,9975	69,9975	38,4975	
2	Максимальное значение	13,0075	18,0075	70,0075	38,5075	0,00062
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	12,9925	17,9925	69,9925	38,4925	
3	Максимальное значение	13,015	18,015	70,015	38,515	0,00121
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	12,985	17,985	69,985	38,485	
4	Максимальное значение	13,050	18,050	70,050	38,550	0,00406
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	12,950	17,950	69,950	38,450	
5	Максимальное значение	13,150	18,150	70,150	38,650	0,01225
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	12,850	17,850	69,850	38,350	
6	Максимальное значение	13,200	18,200	70,200	38,700	0,01622
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	12,800	17,800	69,800	38,300	
7	Максимальное значение	13,400	18,400	70,400	38,900	0,03196
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	12,600	17,600	69,600	38,100	
8	Максимальное значение	13,600	18,600	70,600	39,100	0,04995
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	12,400	7,400	69,400	37,900	
9	Максимальное значение	13,800	18,800	70,800	39,300	0,12392
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	12,200	17,200	69,200	37,700	
10	Максимальное значение	14,000	19,000	71,000	39,500	0,26991
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	12,000	17,000	69,000	37,500	
11	Максимальное значение	14,100	19,100	71,100	39,600	0,32208
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	11,900	16,900	68,900	37,400	

№ эксперимента		$D_{вх}$	$D_{г}$	L	L_x	$\Delta\bar{p}_{\text{мак}}^*$
12	Максимальное значение	14,200	19,200	71,200	39,700	0,39603
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	11,800	16,800	68,800	37,300	
13	Максимальное значение	14,300	19,300	71,300	39,800	0,45287
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	11,700	16,700	68,700	37,200	
14	Максимальное значение	14,400	19,400	71,400	39,900	0,49223
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	11,600	16,600	68,600	37,100	
15	Максимальное значение	14,500	19,500	71,500	40,000	0,59034
	Номинальное значение	13,000	18,000	70,000	38,500	
	Минимальное значение	11,500	16,500	68,500	37,000	

При проектировании приемников, в части решения задачи назначения допусков на их геометрические параметры, можно приблизительно ориентироваться на данные (таблица 1), при этом следует иметь в виду, что в ней представлены предельные значения $\Delta\bar{p}$, вероятность достижения которых мала, особенно учитывая тот факт, что изготовление приемников относится к мелкосерийному производству.

По результатам проведенного моделирования (таблица 1) можно сделать выводы:

- максимальное значение девиации коэффициента давления приемника с профилированной поверхностью 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 0,00020...0,59034;

- при достаточно малых допусках на изменение диаметров входной части, узкой части и сечения отбора давления от 0,0025 до 0,200 мм максимальное значение девиации коэффициента давления составляет 0,00020...0,01622, при этом реально возможные отклонения значений данных

параметров, обусловленные технологией изготовления ПСД, могут составлять 0,100...0,500 мм.

Распределения вероятности девиации коэффициента давления приемников в экспериментах (таблица 1) представлены на рисунках 2-16.

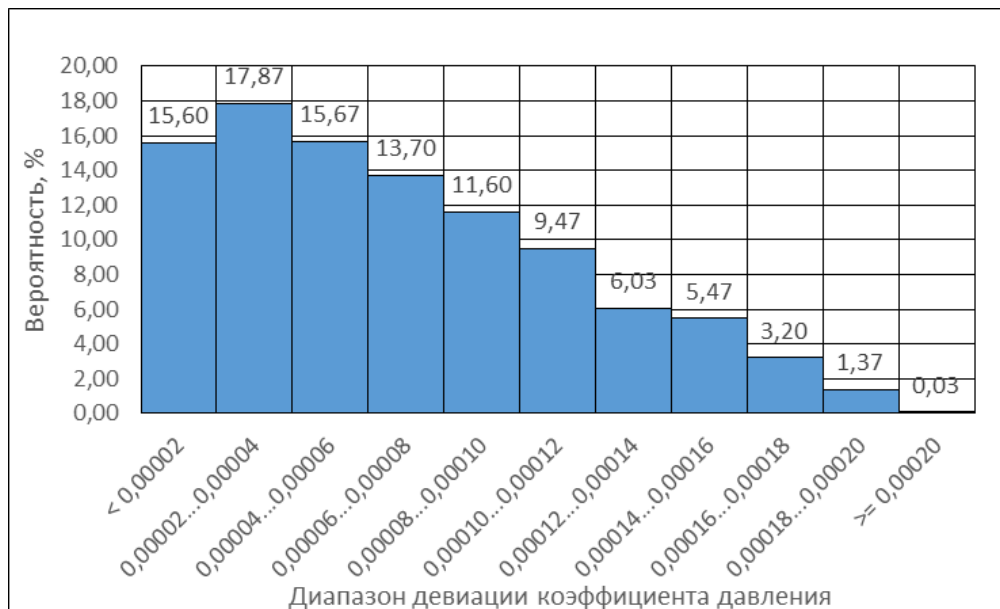


Рисунок 2 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 1)

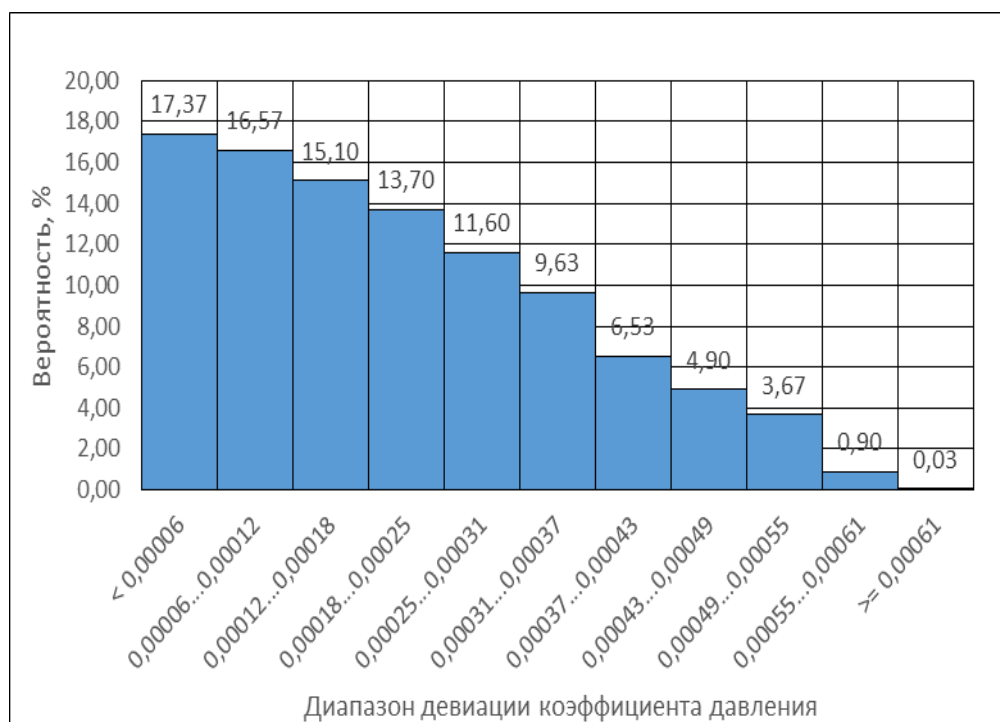


Рисунок 3 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 2)

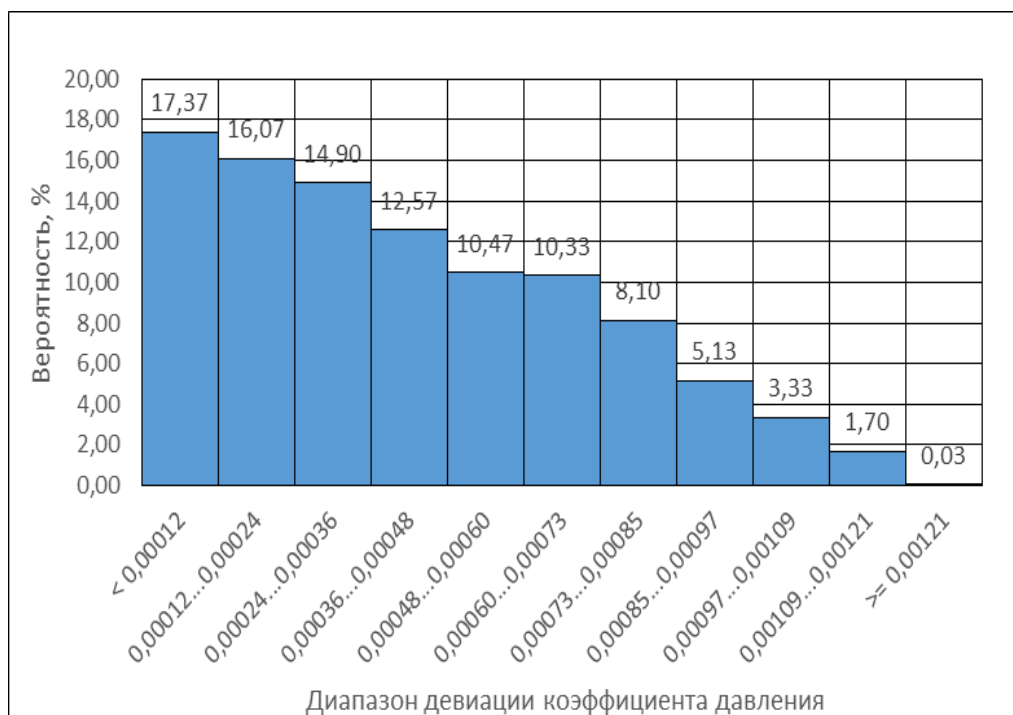


Рисунок 4 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 3)

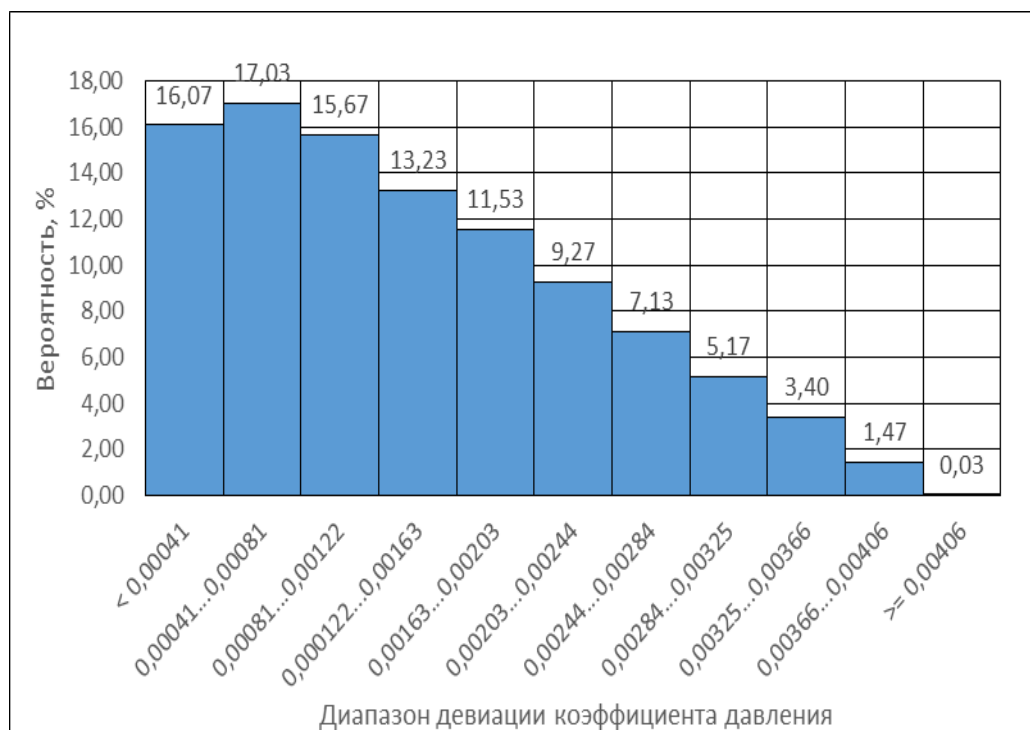


Рисунок 5. – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 4)

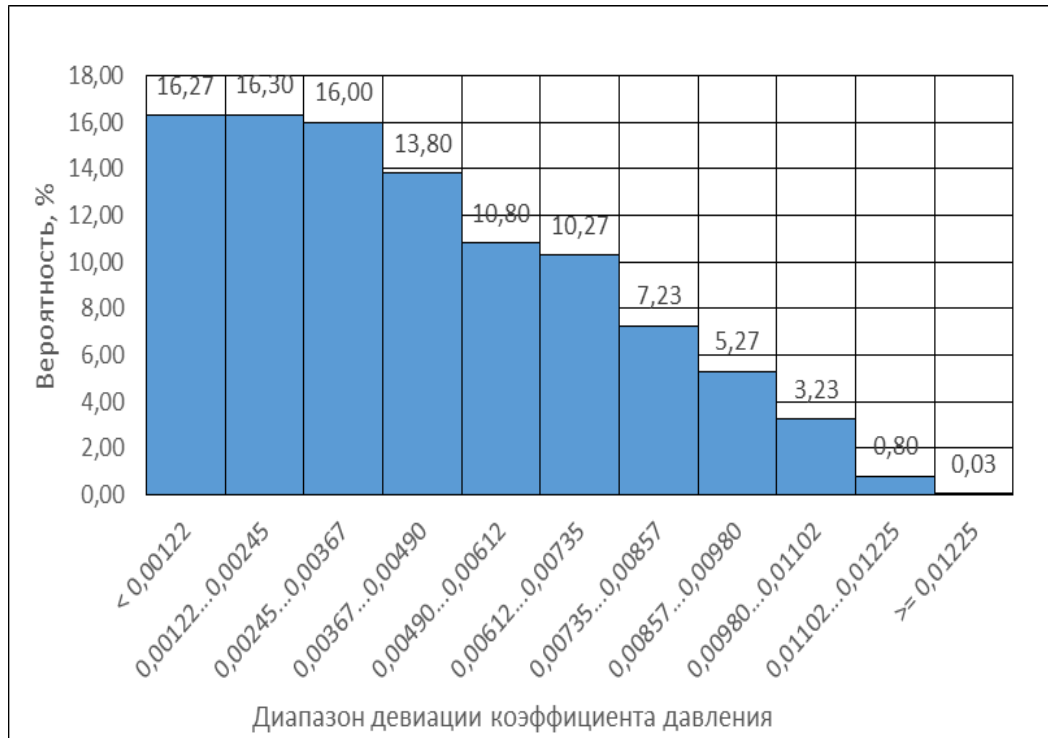


Рисунок 6 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 5)

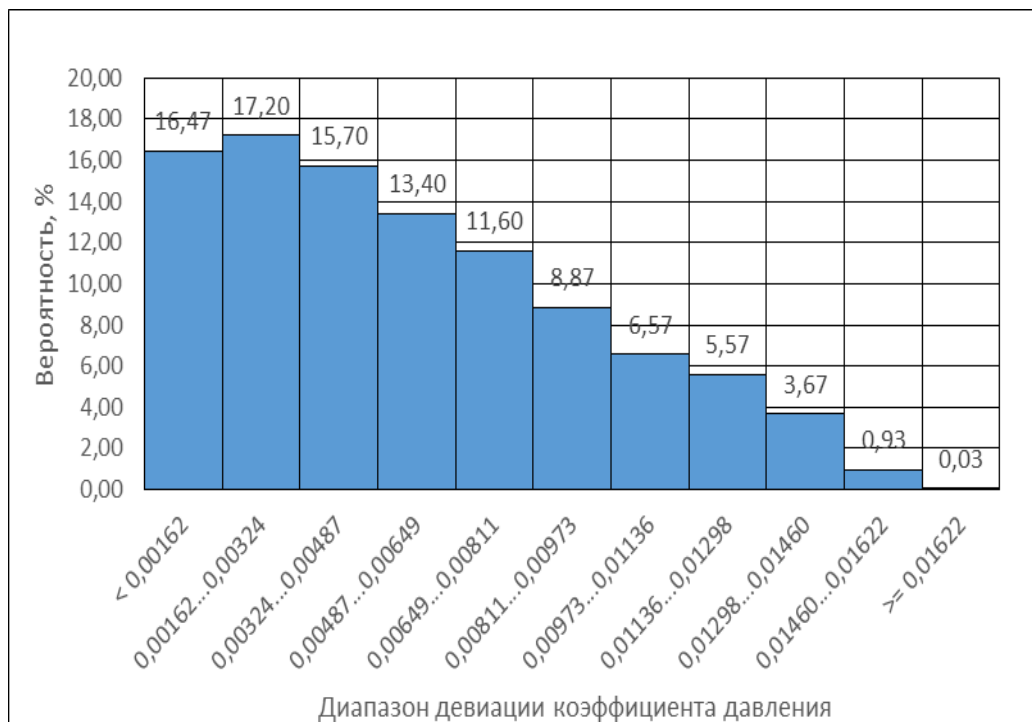


Рисунок 7 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 6)

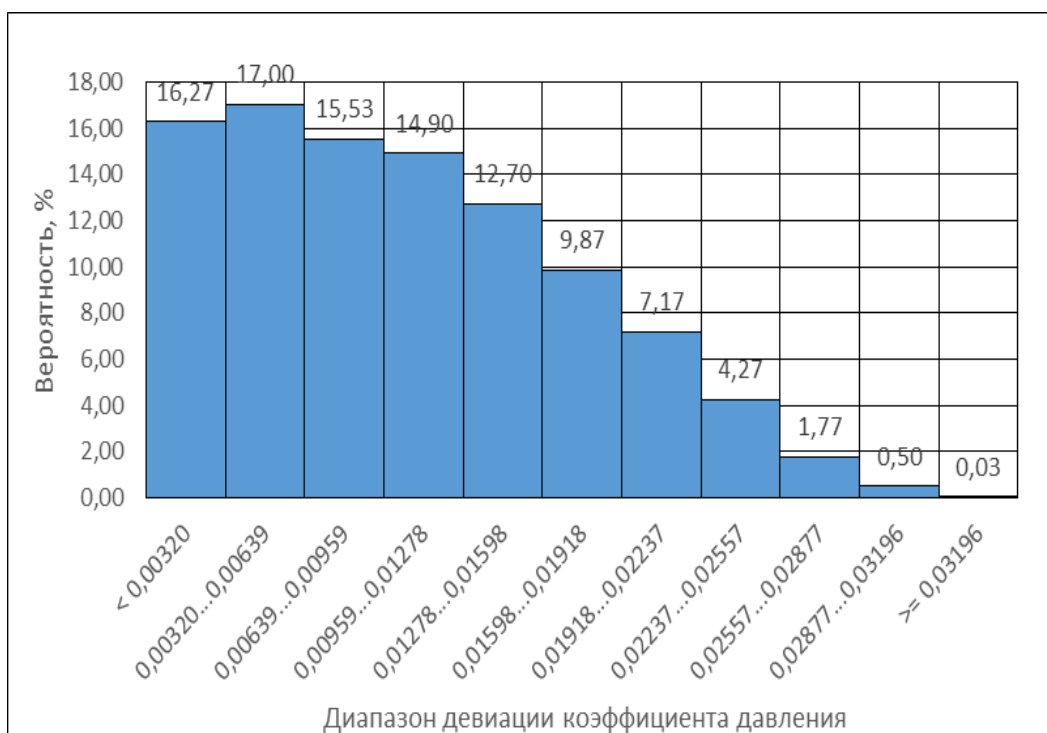


Рисунок 8 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 7)

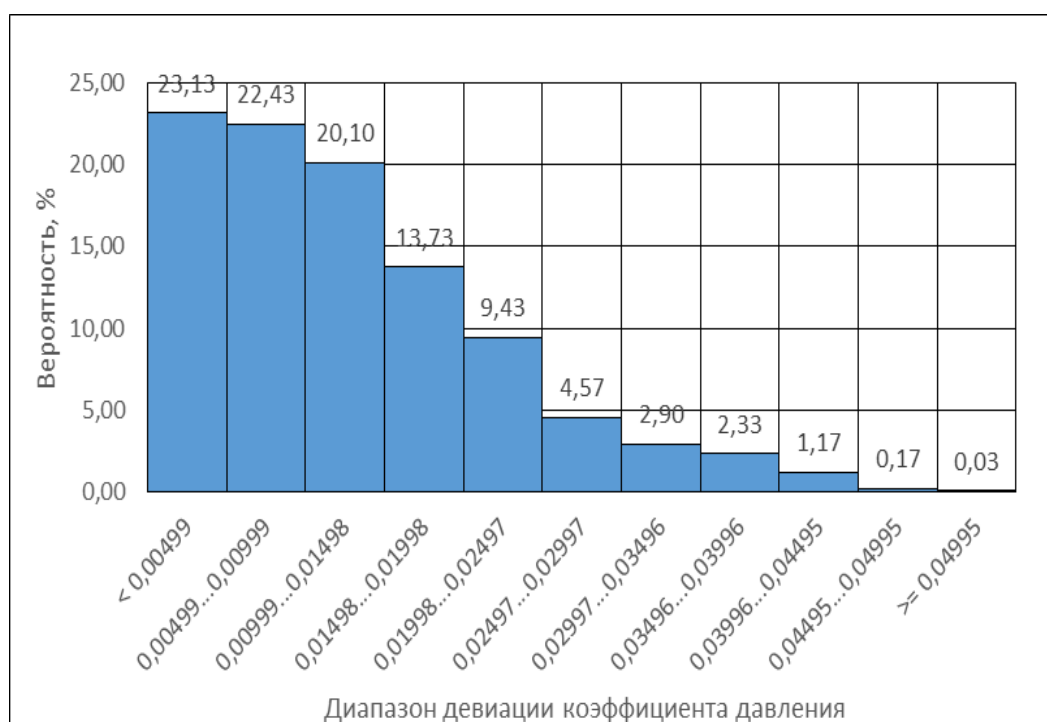


Рисунок 9 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 8)

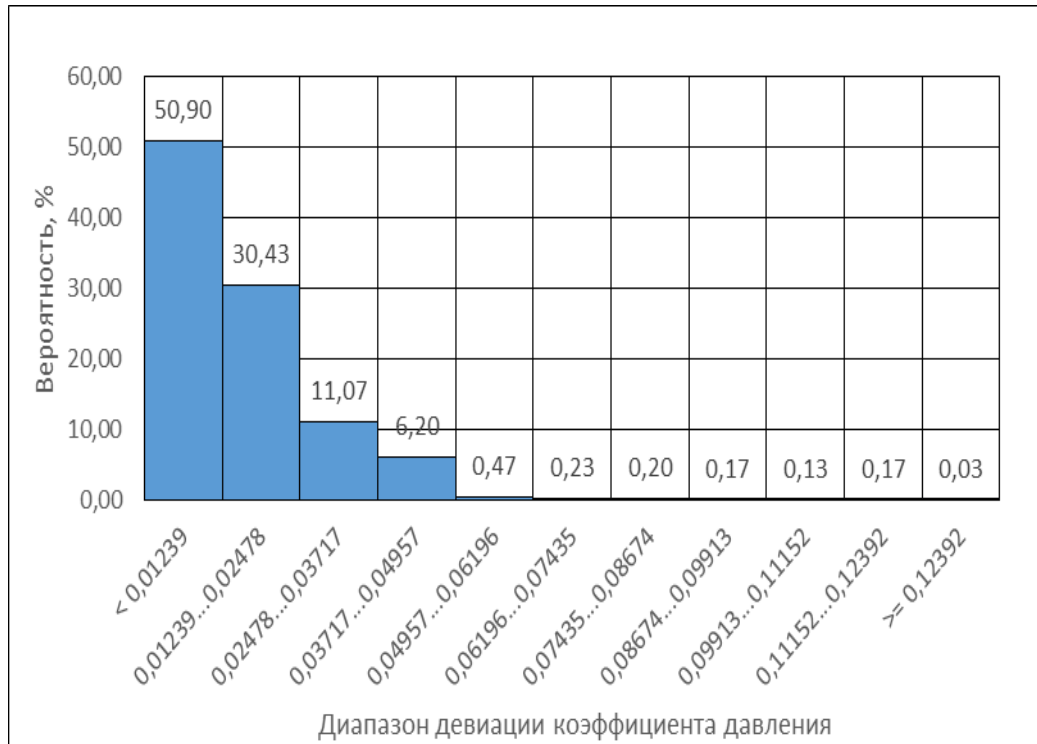


Рисунок 10 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 9)

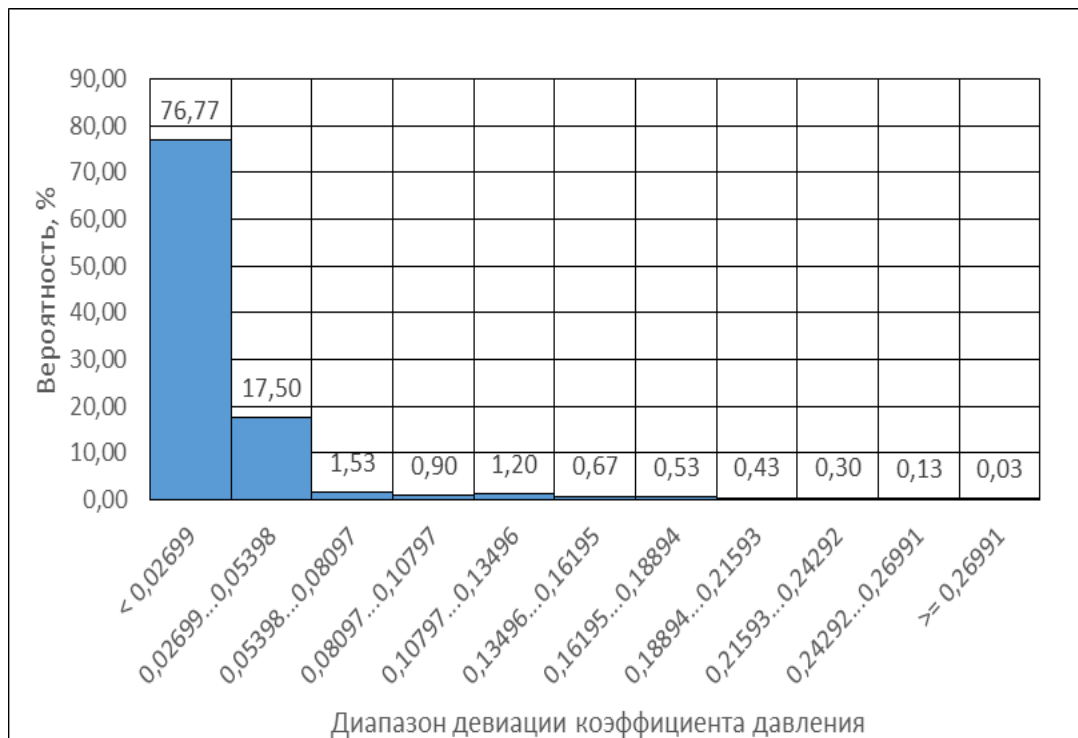


Рисунок 11. Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 10)

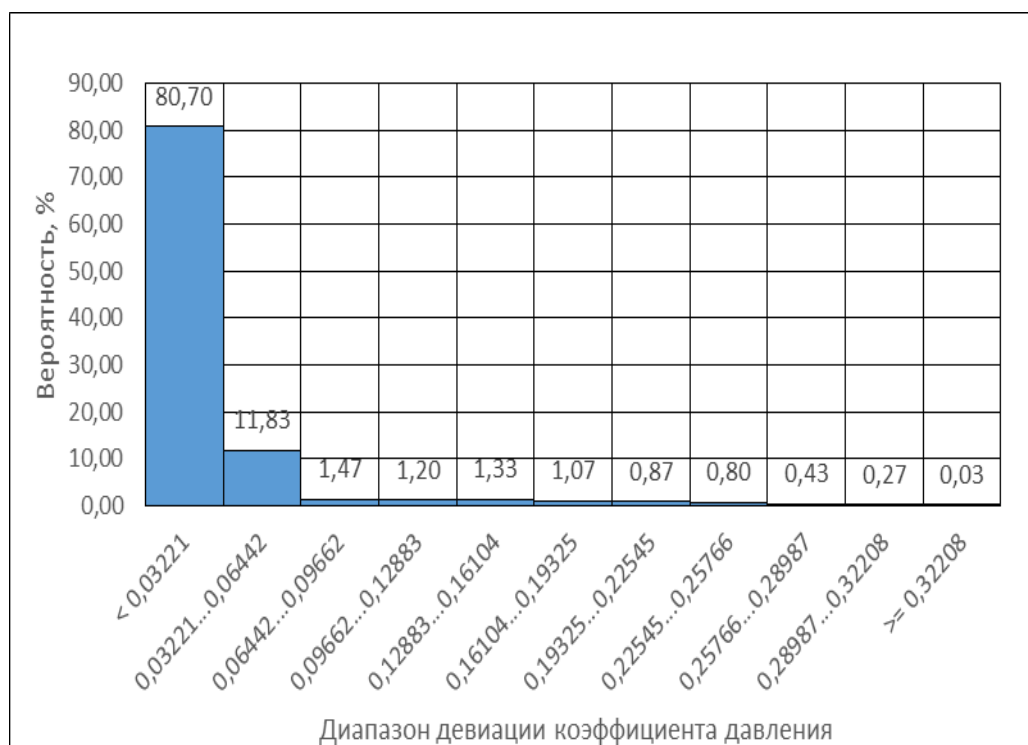


Рисунок 12 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 11)

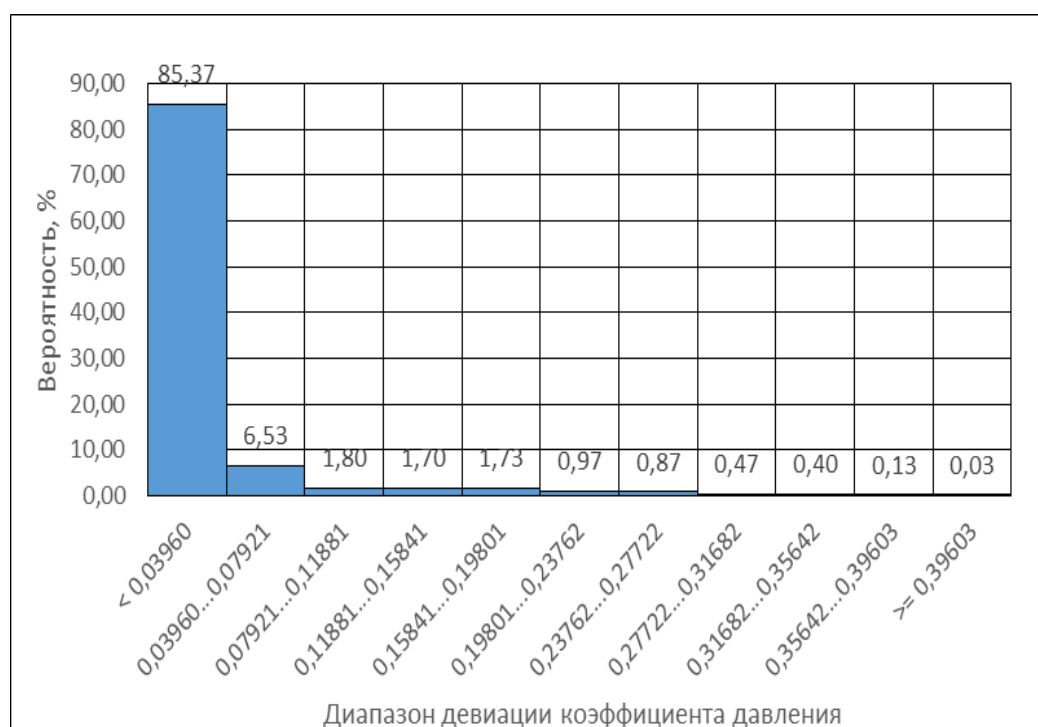


Рисунок 13 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 12)



Рисунок 14 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 13)

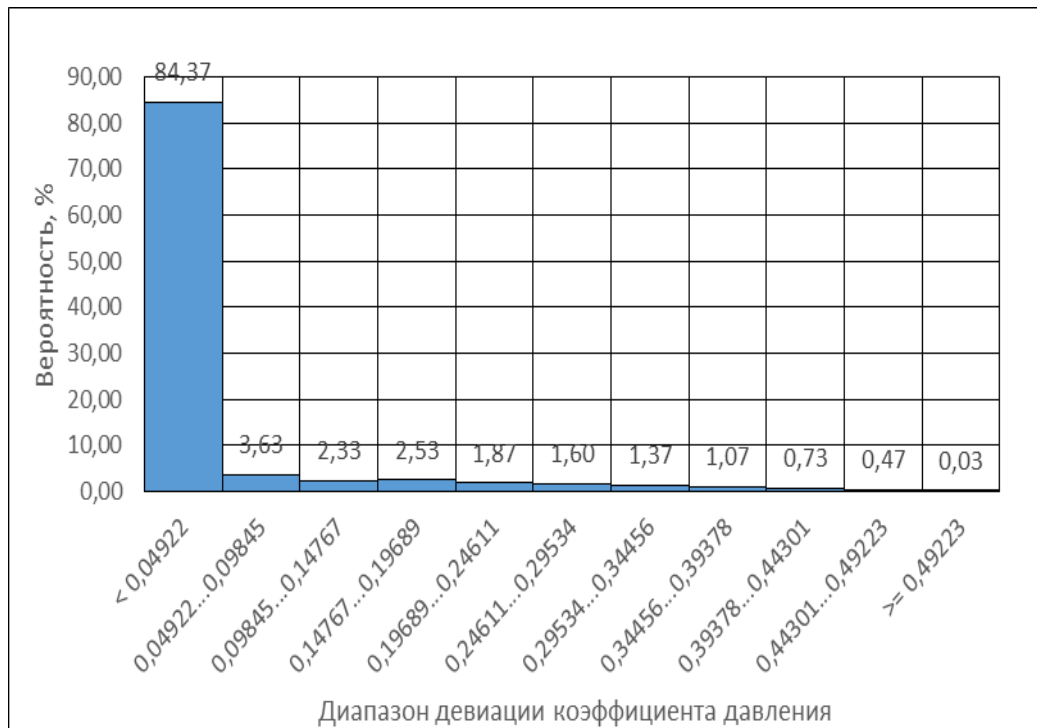


Рисунок 15 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 14)



Рисунок 16 – Распределение вероятности интервалов значений девиации коэффициента давления (эксперимент № 15)

Погрешности в определении высоты и скорости полета в экспериментах (таблица 1) при высоте $H = 1000$, скорости $V = 15$ м/с приведены в таблицах 2-16.

Таблица 2 – Погрешность в определении высоты и скорости полета (эксперимент № 1) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девиация коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,0001	0,0001	0,0005	0,0634	0,0063
0,00002	0,0002	0,001	0,0633	0,0063
0,00004	0,0003	0,002	0,0631	0,0063
0,00006	0,0005	0,003	0,0628	0,0063
0,00008	0,0006	0,004	0,0626	0,0063
0,0001	0,0008	0,0051	0,0624	0,0062
0,00012	0,0009	0,0061	0,0621	0,0062
0,00014	0,0011	0,0071	0,0619	0,0062
0,00016	0,0012	0,0081	0,0617	0,0062
0,00018	0,0014	0,0091	0,0614	0,0061
0,00020	0,0015	0,0101	0,0612	0,0061

Таблица 3 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 2) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,00003	0,0002	0,0015	0,0632	0,0063
0,00006	0,0005	0,0031	0,0628	0,0063
0,00012	0,0009	0,0062	0,0621	0,0062
0,00018	0,0014	0,0092	0,0614	0,0061
0,00025	0,0018	0,0123	0,0607	0,0061
0,00031	0,0023	0,0154	0,06	0,006
0,00037	0,0028	0,0185	0,0593	0,0059
0,00043	0,0032	0,0216	0,0586	0,0059
0,00049	0,0037	0,0247	0,0579	0,0058
0,00055	0,0042	0,0277	0,0572	0,0057
0,00062	0,0046	0,0308	0,0565	0,0056

Таблица 4 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 3) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,00006	0,00050	0,00300	0,06280	0,00630
0,00012	0,00090	0,00600	0,06210	0,00620
0,00024	0,00180	0,01210	0,06080	0,00610
0,00036	0,00270	0,01810	0,05940	0,00590
0,00048	0,00360	0,02420	0,05800	0,00580
0,00060	0,00450	0,03020	0,05660	0,00570
0,00073	0,00540	0,03630	0,05520	0,00550
0,00085	0,00630	0,04230	0,05380	0,00540
0,00097	0,00730	0,04840	0,05240	0,00520
0,00109	0,00820	0,05440	0,05100	0,00510
0,00121	0,00910	0,06050	0,04970	0,00500

Таблица 5 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 4) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,00020	0,00150	0,01020	0,06120	0,00610
0,00041	0,00300	0,02030	0,05890	0,00590
0,00081	0,00610	0,04060	0,05420	0,00540
0,00122	0,00910	0,06100	0,04960	0,00500
0,00163	0,01220	0,08130	0,04490	0,00450
0,00203	0,01520	0,10160	0,04020	0,00400
0,00244	0,01830	0,12200	0,03560	0,00360
0,00284	0,02130	0,14230	0,03090	0,00310
0,00325	0,02440	0,16260	0,02630	0,00260
0,00366	0,02740	0,18300	0,02160	0,00220
0,00406	0,03050	0,20330	0,01690	0,00170

Таблица Пб – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 5) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,00061	0,00460	0,03060	0,05650	0,00570
0,00122	0,00920	0,06130	0,04950	0,00490
0,00245	0,01840	0,12250	0,03540	0,00350
0,00367	0,02760	0,18390	0,02140	0,00210
0,00490	0,03680	0,24520	0,00730	0,00070
0,00612	0,04600	0,30660	0,00670	0,00070
0,00735	0,05520	0,36810	0,02080	0,00210
0,00857	0,06440	0,42960	0,03480	0,00350
0,00980	0,07370	0,49110	0,04890	0,00490
0,01102	0,08290	0,55260	0,06290	0,00630
0,01225	0,09210	0,61420	0,07700	0,00770

Таблица 7 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 6) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,00081	0,00610	0,04060	0,05420	0,00540
0,00162	0,01220	0,08110	0,04490	0,00450
0,00324	0,02440	0,16240	0,02630	0,00260
0,00487	0,03650	0,24360	0,00770	0,00080
0,00649	0,04870	0,32500	0,01090	0,00110
0,00811	0,06100	0,40640	0,02950	0,00300
0,00973	0,07320	0,48790	0,04810	0,00480
0,01136	0,08540	0,56940	0,06670	0,00670
0,01298	0,09770	0,65100	0,08530	0,00850
0,01460	0,10990	0,73270	0,10390	0,01040
0,01622	0,12220	0,81450	0,12260	0,01230

Таблица 8 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 7) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,00160	0,01200	0,07990	0,04520	0,00450
0,00320	0,02400	0,15990	0,02690	0,00270
0,00639	0,04800	0,32010	0,00980	0,00100
0,00959	0,07210	0,48060	0,04650	0,00460
0,01278	0,09620	0,64130	0,08310	0,00830
0,01598	0,12030	0,80230	0,11980	0,01200
0,01918	0,14450	0,96350	0,15650	0,01560
0,02237	0,16880	1,12500	0,19310	0,01930
0,02557	0,19300	1,28680	0,22980	0,02300
0,02877	0,21730	1,44880	0,26640	0,02660
0,03196	0,24170	1,61110	0,30310	0,03030

Таблица 9 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент №8) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,00250	0,01870	0,12490	0,03490	0,00350
0,00499	0,03750	0,25000	0,00620	0,00060
0,00999	0,07510	0,50070	0,05110	0,00510
0,01498	0,11280	0,75200	0,10830	0,01080
0,01998	0,15060	1,00400	0,16560	0,01660
0,02497	0,18850	1,25660	0,22290	0,02230
0,02997	0,22650	1,50980	0,28020	0,02800
0,03496	0,26460	1,76370	0,33750	0,03380
0,03996	0,30270	2,01820	0,39480	0,03950
0,04495	0,34100	2,27350	0,45210	0,04520
0,04995	0,37940	2,52930	0,50940	0,05090

Таблица 10 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 9) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,00620	0,04650	0,31030	0,00750	0,00080
0,01239	0,09320	0,62150	0,07860	0,00790
0,02478	0,18700	1,24690	0,22080	0,02210
0,03717	0,28150	1,87630	0,36290	0,03630
0,04957	0,37650	2,50980	0,50500	0,05050
0,06196	0,47210	3,14740	0,64720	0,06470
0,07435	0,56840	3,78930	0,78930	0,07890
0,08674	0,66530	4,43540	0,93140	0,09310
0,09913	0,76290	5,08600	1,07360	0,10740
0,11152	0,86110	5,74100	1,21570	0,12160
0,12392	0,96010	6,40060	1,35780	0,13580

Таблица 11 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 10) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,01350	0,10160	0,67710	0,09130	0,00910
0,02699	0,20380	1,35880	0,24610	0,02460
0,05398	0,41050	2,73660	0,55570	0,05560
0,08097	0,62010	4,13420	0,86530	0,08650
0,10797	0,83290	5,55240	1,17490	0,11750
0,13496	1,04880	6,99230	1,48440	0,14840
0,16195	1,26820	8,45480	1,79400	0,17940
0,18894	1,49120	9,94110	2,10360	0,21040
0,21593	1,71780	11,45230	2,41310	0,24130
0,24292	1,94850	12,98980	2,72260	0,27230
0,26991	2,18320	14,55490	3,03220	0,30320

Таблица 12 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 11) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,01610	0,12130	0,80850	0,12120	0,01210
0,03221	0,24350	1,62360	0,30590	0,03060
0,06442	0,49120	3,27440	0,67540	0,06750
0,09662	0,74310	4,95390	1,04480	0,10450
0,12883	0,99950	6,66360	1,41420	0,14140
0,16104	1,26080	8,40520	1,78360	0,17840
0,19325	1,52710	10,18060	2,15300	0,21530
0,22545	1,79880	11,99170	2,52230	0,25220
0,25766	2,07610	13,84100	2,89170	0,28920
0,28987	2,35960	15,73080	3,26100	0,32610
0,32208	2,64960	17,66400	3,63040	0,36300

Таблица 13 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 12) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,01980	0,14930	0,99500	0,16360	0,01640
0,03960	0,30000	2,00010	0,39070	0,03910
0,07921	0,60630	4,04190	0,84500	0,08450
0,11881	0,91920	6,12820	1,29920	0,12990
0,15841	1,23930	8,26180	1,75340	0,17530
0,19801	1,56690	10,44630	2,20760	0,22080
0,23762	1,90280	12,68530	2,66180	0,26620
0,27722	2,24750	14,98340	3,11590	0,31160
0,31682	2,60180	17,34530	3,57010	0,35700
0,35642	2,96650	19,77670	4,02420	0,40240
0,39603	3,34260	22,28420	4,47830	0,44780

Таблица 14 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 13) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,02264	0,17080	1,13870	0,19620	0,01960
0,04529	0,34360	2,29060	0,45590	0,04560
0,09057	0,69540	4,63610	0,97540	0,09750
0,13586	1,05610	7,04090	1,49480	0,14950
0,18115	1,42640	9,50950	2,01420	0,20140
0,22643	1,80710	12,04740	2,53360	0,25340
0,27172	2,19910	14,66070	3,05290	0,30530
0,31701	2,60350	17,35660	3,57220	0,35720
0,36229	3,02150	20,14350	4,09150	0,40910
0,40758	3,45470	23,03120	4,61080	0,46110
0,45287	3,90470	26,03160	5,13000	0,51300

Таблица 15 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 14) при высоте $H = 1000$ м, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,02461	0,18570	1,23820	0,21880	0,02190
0,04922	0,37380	2,49220	0,50110	0,05010
0,09845	0,75750	5,04980	1,06570	0,10660
0,14767	1,15170	7,67820	1,63020	0,16300
0,19689	1,55760	10,38370	2,19480	0,21950
0,24611	1,97600	13,17340	2,75930	0,27590
0,29534	2,40840	16,05580	3,32370	0,33240
0,34456	2,85610	19,04070	3,88810	0,38880
0,39378	3,32100	22,14000	4,45250	0,44530
0,44301	3,80520	25,36790	5,01690	0,50170
0,49223	4,31130	28,74190	5,58130	0,55810

Таблица 16 – Погрешность в определении высоты и скорости полета
(эксперимент № 15) при высоте $H = 1000$, скорости $V = 15$ м/с

Девияция коэффициента давления	Абсолютная погрешность скорости полета (м/с)	Относительная погрешность скорости полета (%)	Абсолютная погрешность высоты полета (м)	Относительная погрешность высоты полета (%)
0,02952	0,22300	1,48690	0,27510	0,02750
0,05903	0,44950	2,99660	0,61360	0,06140
0,11807	0,91330	6,08870	1,29070	0,12910
0,17710	1,39290	9,28620	1,96780	0,19680
0,23614	1,89010	12,60060	2,64480	0,26450
0,29517	2,40690	16,04580	3,32180	0,33220
0,35420	2,94580	19,63850	3,99870	0,39990
0,41324	3,50990	23,39950	4,67560	0,46760
0,47227	4,10320	27,35500	5,35240	0,53520
0,53130	4,73080	31,53860	6,02920	0,60290
0,59034	5,39930	35,99510	6,70600	0,67060

Как следует из представленного выше исследования, распределение вероятностей девиации коэффициента непроточных приемников статического давления подчиняется закону экспоненциального распределения. Как показали результаты моделирования, вероятность того, что при изготовлении приемника с допусками (таблица 1) девиация коэффициента давления будет меньше половины ее максимального значения составляет 85...95% и более. При этом погрешность в определении: скорости полета находится в пределах 0,01... 16,05%; высоты полета в пределах 0,0061...0,33%

Рассмотрим применение метода наихудшего случая для управления девиацией коэффициента давления, которая возникает вследствие отклонений его геометрических параметров от их номинальных значений применительно к приемникам с наружной профилированной поверхностью (таблица 17).

Таблица 17 – Геометрические параметры моделируемых ПСД с наружной профилированной поверхностью

№ ПСД	$D_{вх} \cdot 10^{-3}$ м	$D_{г} \cdot 10^{-3}$ м	$L \cdot 10^{-3}$ м	$L_x \cdot 10^{-3}$ м
1	12,0	14,0	60,0	33,0
2	12,0	16,0	65,0	19,5
3	12,0	18,0	70,0	38,5
4	12,0	20,0	70,0	49,0

В таблице 18 представлены максимальные значения девиации коэффициента давления $\Delta \bar{p}_{\text{мак}}$ и погрешность в определении скорости и высоты полета для выдерживания размеров $D_{вх}$, $D_{г}$, L и L_x в соответствии с различными качествами уровня относительной геометрической точности без учета скоса потока воздуха [2, 3].

Таблица 18 – 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	№ ПСД	$\Delta\bar{p}_{\text{мак}}$	δV (%)	δH (%)
4В	1	0,0001	0,005	0,006
	2	0,0001	0,006	0,005
	3	0,0002	0,012	0,004
	4	0,0003	0,014	0,004
12В	1	0,0035	0,177	0,025
	2	0,0046	0,229	0,034
	3	0,0094	0,473	0,077
	4	0,011	0,551	0,091

Полученные результаты (таблица 18) показали, что при изготовлении ПСД возможно использовать квалитет 12В, 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.

Рассмотрим некоторый пример статистического моделирования вариационного ряда приемников с целью выявления максимально возможных значений девиации коэффициента давления, обусловленной скосами потока. Пусть при решении задачи с использованием метода статистических испытаний были приняты следующие ограничения:

- допуск на диаметры входного участка ($D_{\text{вх}}$), гофров ($D_{\text{г}}$) от 0,0025 до 1,5 мм;
- допуск на длину профилированного участка (L) и удаление сечения отбора давления от начала профилированного участка (L_x) от 0,0025 до 1 мм;
- Число испытаний 3000;
- Число разбиений 10;
- Высота полета для вычисления ее погрешности равна 1000 м;
- Скорости полета для вычисления ее погрешности равна 69,44 м/с.
- Угол скоса набегающего воздушного потока от 5 до 30 градусов.

Максимальные значения девиации коэффициента давления моделируемых приемников при различных допусках на геометрические параметры ПСД (таблица 1), полученные в процессе реализации вычислительных экспериментов (метод статистических испытаний), приедены в таблице 19. Здесь под девиацией понимается отклонение значения коэффициента давления приемника, обусловленное скосами набегающего воздушного потока.

Таблица 19 – Максимальные значения девиации коэффициента давления $\Delta\bar{p}_{\text{мак}}^*$ при различных диапазонах изменения допусков на геометрические параметры ПСД ($\cdot 10^{-4}$)

№ Эксперимента	Угол скоса набегающего воздушного потока $\alpha_c, ^\circ$												
	2	4	6	8	10	12	15	17	20	22	25	27	30
1	0,05	0,10	0,1	0,21	0,26	0,30	0,37	0,42	0,50	0,55	0,62	0,68	0,75
2	0,15	0,31	0,45	0,62	0,77	0,88	1,1	1,24	1,50	1,69	1,94	1,99	2,20
3	0,30	0,59	0,86	1,20	1,50	1,83	2,19	2,53	3,00	3,26	3,62	4,04	4,40
4	1,0	2,0	3,0	4,1	5,2	6,0	7,9	8,8	10,0	11,0	12,2	13,8	14,7
5	3,1	6,1	9,4	11,6	15,0	17,6	21,7	25,2	29,9	33,0	37,0	41,0	47,1
6	4,2	8,0	12,0	16,4	20,6	25,1	31,6	35,2	40,3	47,3	50,7	56,8	65,8
7	19	38	58	77	96	116	145	164	193	212	241	260	289
8	19	39	58	77	96	116	145	164	193	212	241	260	289
9	82	182	270	343	467	541	700	773	905	985	1120	1181	1275
10	93	185	281	374	469	560	700	796	937	1020	1169	1257	1404
11	94	187	280	382	467	562	702	796	937	1030	1170	1261	1405
12	117	269	393	511	624	692	1050	1240	1389	1405	1548	1831	1893
13	158	412	617	656	956	1150	1452	1601	1789	2053	2265	2517	2913
14	244	445	735	927	1200	1347	1666	2038	2237	2549	2631	2961	3308
15	315	603	840	1162	1469	1785	2096	2387	2909	3190	3723	4126	4627

Зависимость максимальных значений девиации коэффициента давления $\Delta\bar{p}_{\text{мак}}^*$ от угла скоса потока α_c представлена на рисунке 17.

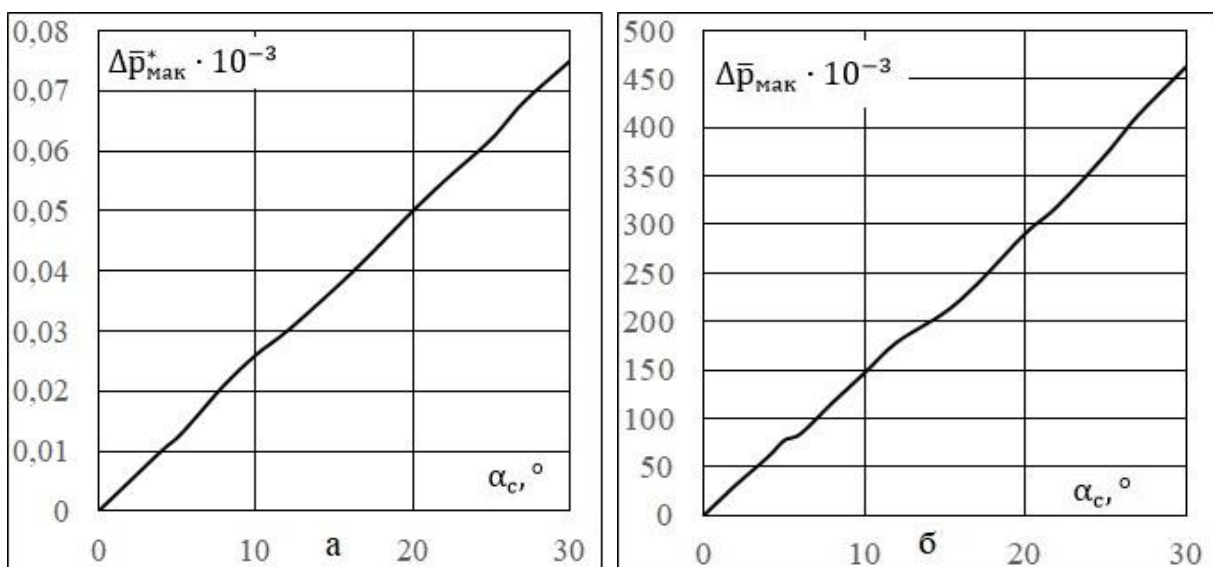


Рисунок 17 – Зависимость максимальных значений девиации коэффициента давления $\Delta \bar{p}_{\text{макс}}^*$ от угла скоса потока α_c : а – эксперимент № 1; б – эксперимент № 15

Как видно из данных исследования (таблица 19, и рисунок 17), девиация коэффициента давления ПСД с наружной профилированной поверхностью, в отличие от проточных приемников, линейно зависит от угла скоса набегающего воздушного потока. Для ПСД с внутренней профилированной поверхностью наблюдается более сложный характер влияния угла скоса потока на рассматриваемый параметр. Следует также отметить, что приемники статического давления с внутренней профилированной поверхностью менее чувствительны к скосам набегающего воздушного потока, по сравнению с рассматриваемыми приемниками.

Представленные в работе результаты могут быть использованы при проектировании ПСД с наружной профилированной поверхностью и двумя контурами компенсации аэродинамической погрешности 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 приемников статического давления с наружной профилированной поверхностью [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619053. Программа для расчета коэффициента давления приемников статического давления с наружной профилированной поверхностью // Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов; правообладатель: ФГБОУ ВО «УлГТУ»; зарегистр. 03.06.2021 . – М.: Роспатент, 2021.
2. 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.
3. 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.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667764. Программа функционального синтеза приемников статического давления // Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов; правообладатель: ФГБОУ ВО «УлГТУ»; заявл. 15.10.2021; зарегистр. 02.11.2021. – М.: Роспатент, 2021.