

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Учебно-методическое пособие
к выполнению практических занятий
по дисциплине «Метрологическое обеспечение машино-
приборостроительного производства»
для студентов всех форм обучения технических направлений

Севастополь
СевГУ
2025

УДК [006.91:531.717.52.082.32](076.5)

ББК 30.104-5*я73

Р24

Р е ц е н з е н т:

А. Ю. Тараховский – канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой «Основы цифрового проектирования»
Инженерного факультета ВТШ СПИ СевГУ

Составители: А. П. Васютенко, Н. А. Балакина

Р24 Расчет погрешности пневматических средств измерений :
учебно-методическое пособие к выполнению практических занятий по
дисциплине «Метрологическое обеспечение машино-
приборостроительного производства» для студентов всех форм
обучения технических направлений / Севастопольский
государственный университет ; сост.: А.П. Васютенко, Н.А. Балакина. –
Севастополь : СевГУ, 2025. – 61 с. – Текст : электронный.

Целью учебно-методического пособия является ознакомление студентов с
конструкцией, методиками расчета погрешности пневматических средств
измерения. Овладение практическими навыками проведения расчетов погрешности
измерения и выбора конструктивных параметров измерительных преобразователей
ламинарного и дроссельного типов.

Предназначено для учебно-методического обеспечения дисциплины
«Метрологическое обеспечение машино-приборостроительного производства».

Рекомендовано в качестве учебно-методического пособия для студентов всех
форм обучения технических направлений.

УДК [006.91:531.717.52.082.32](076.5)

ББК 30.104-5*я73

Учебно-методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании
кафедры «Приборостроение и транспорт», протокол № 43 от 1 октября 2025г.

© Васютенко А. П., Балакина Н. А., сост., 2025

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1. РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ПНЕВМОТАХОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА С ШИРОКОПРЕДЕЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПЛУНЖЕРНОГО ТИПА И ПОСТОЯННЫМ ДАВЛЕНИЕМ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ РАСХОДОМЕРА	6
1.1. Цель занятия	6
1.2. Теоретические положения.....	6
1.3. Индивидуальные расчетные задания	15
1.4. Порядок выполнения работы	16
1.5. Содержание отчета.....	16
1.6. Контрольные вопросы.	16
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2. РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ПНЕВМОТАХОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА С ШИРОКОПРЕДЕЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПЛУНЖЕРНОГО ТИПА И ПЕРЕМЕННЫМ ДАВЛЕНИЕМ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ РАСХОДОМЕРА	17
2.1. Цель занятия	17
2.2. Теоретические положения.....	17
2.3. Индивидуальные расчетные задания	23
2.4. Порядок выполнения работы	24
2.5. Содержание отчета.....	25
2.6. Контрольные вопросы.	25
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3. РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ПНЕВМОТАХОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА С ТУРБУЛЕНТНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ТИПА СОПЛО-ЗАСЛОНКА И ПОСТОЯННЫМ ДАВЛЕНИЕМ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ РАСХОДОМЕРА	25
3.1. Цель занятия	25
3.2. Теоретические положения.....	25
3.3. Индивидуальные расчетные задания	33
3.4. Порядок выполнения работы	33
3.5. Содержание отчета.....	33
3.6. Контрольные вопросы.	34

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4. РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ МЕМБРАННОГО ПНЕВМОИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	34
4.1. Цель занятия	34
4.2. Теоретические положения.....	34
4.3. Индивидуальные расчетные задания	58
4.4. Порядок выполнения работы	58
4.5. Содержание отчета.....	58
4.6. Контрольные вопросы.	59
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	61

ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей развития современного промышленного производства является увеличение доли затрат на выполнение различных измерений во всех стадиях создания, контроля и эксплуатации изделий. Особенно велика роль измерений линейных размеров. В машиностроении они составляют 80 - 90% от общего числа измерений. Получаемая от средств измерений информация о величине и направлении изменения размеров, являющаяся решающей для хода технологического процесса, дает возможность поддерживать последний в оптимальных границах, обеспечивающих заданный уровень качества.

Особенно велико значение измерительной техники, как одной из важнейших основ автоматизации производственных процессов, в которых средства измерения выполняют роль устройств обратной связи. Развитие этой отрасли технологии привело к существенному усложнению измерительных систем, повысило требования к точности, диапазонам измерения, надежности.

Повышение требований к точности измерительных устройств и уменьшению погрешности обратного хода привело к необходимости применения чувствительных упругих элементов, имеющих высокую стабильность упругих характеристик и малый гистерезис.

Важнейшими преимуществами пневматических средств измерения являются возможность производить бесконтактные измерения, незначительные размеры и относительная простота конструкции измерительной оснастки.

В настоящее время пневматические средства измерения устойчиво сохраняют свои позиции в области измерения диаметров, особенно малых размеров, где наряду с чисто пневматическими устройствами применяют комбинированные пневмоиндуктивные устройства, объединяющие достоинства обоих принципов действия.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ПНЕВМОТАХОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА С ШИРОКОПРЕДЕЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПЛУНЖЕРНОГО ТИПА И ПОСТОЯННЫМ ДАВЛЕНИЕМ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ РАСХОДОМЕРА

1.1. Цель занятия

Целью занятия является изучение принципа действия и расчет погрешности пневмотахометрического измерительного прибора с широкопредельным преобразователем плунжерного типа и постоянным давлением на входе расходомера.

1.2. Теоретические положения

В настоящее время большое распространение в машиностроении получили измерительные приборы, основанные на пневматическом принципе измерения. Высокая чувствительность и точность пневматических измерительных систем позволяет разрабатывать приборы, реагирующие на изменение размера изделия в пределах долей микрометра.

Анализ средств активного контроля размеров деталей в процессе их обработки и характеристик используемых измерительных преобразователей показал, что наиболее широкое применение нашли индуктивные, пневматические и электроконтактные приборы. В основном диапазон их измерения составляет 0,05...1 мм. Пневматические измерительные приборы имеют пределы измерения 0,012...0,24 мм при нелинейности статической характеристики 1% и 0,03...0,4 мм при нелинейности 3%. Для расширения пределов измерения пневматических приборов используются эжекторные сопла круглого или прямоугольного сечения. Они позволяют расширить пределы измерения в 2-3 раза, что составляет 0,3...0,65 мм.

Для использования средств активного контроля на металлообрабатывающих станках и без переналадки средств измерения в процессе обработки различных диаметральных размеров, например, шеек вала, различающихся, как правило, в пределах одной детали на 4...8 мм, необходимо обеспечить диапазон измерения преобразователя до 5...10 мм. При этом погрешность измерения должна составлять $\Delta = 0,005...0,02$ мм.

Средства измерения, реализующие пневматический принцип измерения, обладают рядом существенных достоинств: малые габаритные размеры измерительной оснастки, позволяющие производить многопараметрический контроль в условиях ограниченных размеров рабочей зоны, нечувствительность к вибрациям, простота конструкции и надёжность работы.

В качестве отсчётно-командных устройств в пневматических устройствах используются сильфонные и мембранные электроконтактные

преобразователи, которые могут формировать только дискретные электрические сигналы.

Разработка и исследование пневматических первичных преобразователей, в том числе широкопредельных и вторичных преобразователей на базе пневмотахометрических измерительных систем, позволяющих формировать цифровой выходной сигнал и производить обработку измерительной информации на современной элементной базе является важной и актуальной задачей.

На рис. 1.1 представлена схема преобразователя с соплом плунжерного типа.

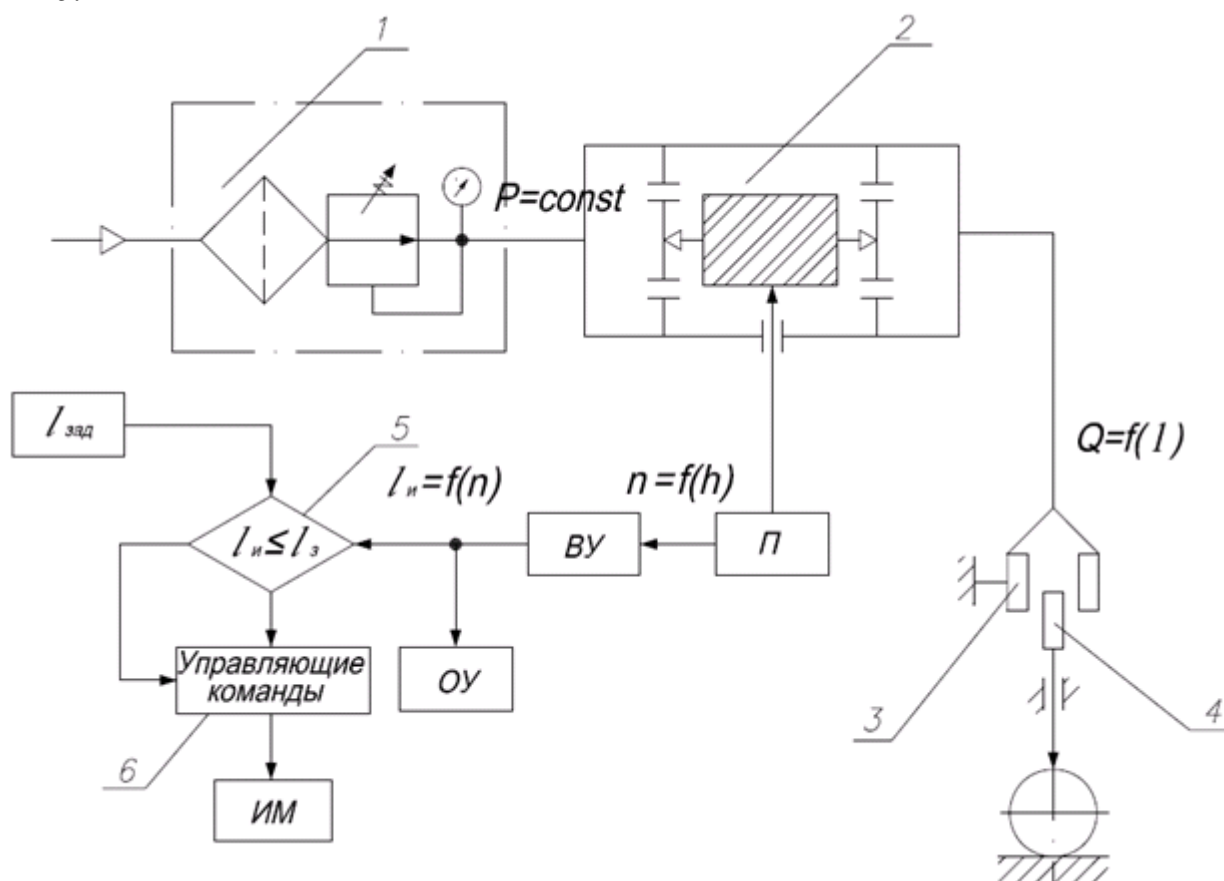


Рисунок 1.1 – Схема преобразователя с соплом плунжерного типа

Принцип их действия следующий. При изменении размера детали плунжер 4 перемещается на величину l_u и изменяется длина кольцевого зазора между плунжером и измерительным соплом 3, что приводит к изменению расхода воздуха $Q = f(l_u)$. В схему измерительной ветви установлен тахометрический преобразователь 2, на вход которого от блока подготовки воздуха 1 подаётся постоянное давление $P = const$. При изменении расхода воздуха Q меняется скорость вращения ротора n_u расходомера, которая измеряется преобразователем П.

Сигнал с преобразователя поступает на вычислительное устройство ВУ, определяющее значение l_u , как функцию скорости вращения ротора n_u .

В логическом блоке 5 сравниваются заданное l_z и измеренное значение l_u , и на основе этого формируются управляющие команды, поступающие затем на исполнительный механизм ИМ обрабатывающего станка, например, команда «конец обработки».

1.2.1. Тахометрический преобразователь

Схематично конструкция ротора преобразователя турбинного расходомера изображена на рис. 2.2. Ротор представляет собой крыльчатку, состоящую из ступицы и лопастного венца. В большинстве случаев лопасти выполняются по винтовым поверхностям с постоянной по высоте толщиной в торцевом сечении.

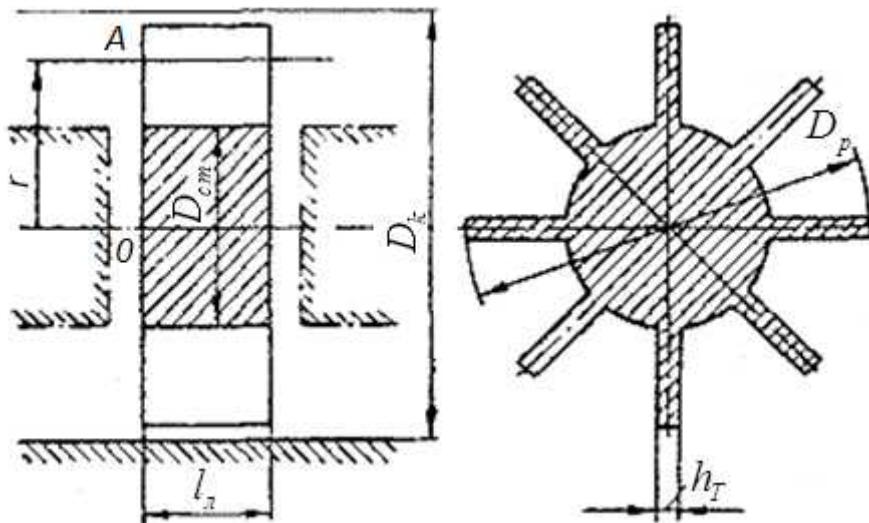


Рисунок 2.2 – Схема ротора преобразователя турбинного расходомера

В дальнейшем для основных размеров преобразователя будут применяться следующие обозначения: D_k – внутренний диаметр корпуса преобразователя; $D_p = 2R_p$ – наружный диаметр ротора; $D_{cm} = 2R_{cm}$ – диаметр ступицы ротора; $h_l = R_p - R_{cm}$ – высота лопастей; l_l – длина лопастей; h_T – толщина лопастей в торцевом сечении; z – число лопастей; H – ход винтовых поверхностей, образующих лопасти; β – угол подъема винтовых поверхностей.

Скорость вращения ротора равна:

$$n_u = \frac{Q}{SH}. \quad (1.1)$$

Значение H хода винтовых поверхностей определяем из выражения

$$H = \frac{2\pi R_p}{\operatorname{ctg} \beta}. \quad (1.2)$$

Площадь сечения потока в плоскости, перпендикулярной оси ротора

$$S = \frac{\pi D_k^2}{4} - \frac{\pi D_{cm}^2}{4} - z h_T h_l. \quad (1.3)$$

Пример расчёта турбинного расходомера (рис. 1.3). Исходные данные для расчёта:

- $D_k = 13$ мм – внутренний диаметр корпуса преобразователя;
- $D_p = 2R_p = 14$ мм – наружный диаметр ротора;
- $D_{cm} = 2R_{cm} = 6$ мм – диаметр ступицы ротора;
- $h_l = R_p - R_{cm} = 4$ мм – высота лопастей;
- $l_l = 8$ мм – длина лопастей;
- $h_T = 0,5$ мм – толщина лопастей в торцевом сечении;
- $z = 8$ – число лопастей;
- H – ход винтовых поверхностей, образующих лопасти;
- $b = 60^\circ$ – угол подъёма винтовых поверхностей.

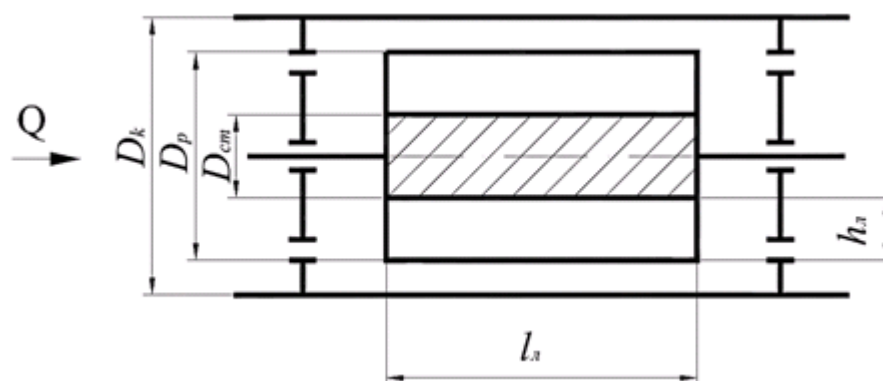


Рисунок 1.3 – Конструктивная схема преобразователя

Значение H хода винтовых поверхностей определяем из выражения (1.2):

$$H = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 7}{\text{ctg} 60^\circ} = 76 \text{ мм} = 0,076 \text{ м}.$$

Площадь сечения потока в плоскости, перпендикулярной оси ротора определяем из выражения (1.3):

$$S = \frac{3,14 \cdot 13^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 6^2}{4} - 8 \cdot 0,5 \cdot 4 = 88,2 \text{ мм}^2 = 88,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

1.2.2. Пневмосопротивление плунжерного типа

Конструктивная схема пневмосопротивления плунжерного типа показана на рис. 1.4. Сопротивление конструктивно выполнено в виде

цилиндрического сопла диаметром d и плунжера диаметром d_n , находящегося в отверстии сопла. При перемещении плунжера изменяется длина кольцевого зазора l и величина пневматического сопротивления.

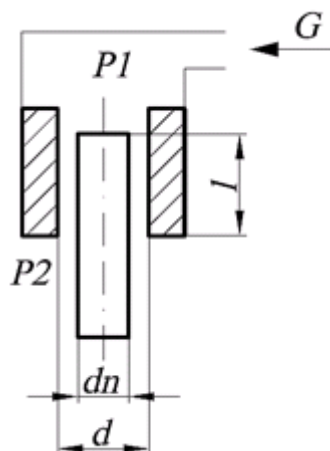


Рисунок 1.4 – Схема пневмосопротивления плунжерного типа

Зависимость расхода воздуха G от длины l кольцевого зазора имеет следующий вид:

$$G = F^2 \frac{P_1^2 - P_2^2}{16\pi R T \eta l}, \quad (1.4)$$

где F – площадь кольцевого зазора; P_1 и P_2 – давление воздуха на входе и выходе сопла; R – газовая постоянная; T – температура воздуха; η – динамическая вязкость воздуха; $l = l_0 + l_u$; $l_0 = (3...5)d_n$ – начальная длина входа плунжера в отверстие сопла; l_u – измерительное перемещение плунжера.

Площадь кольцевого зазора определяется по формуле

$$F = \frac{\pi}{4}(d^2 - d_n^2). \quad (1.5)$$

Выражение (1.4) можно преобразовать следующим образом:

$$G = \frac{F^2(P_1 - P_2)}{8\pi R T \eta l} \cdot \frac{(P_1 + P_2)}{2} = \frac{F^2 \rho}{8\pi \eta l} \cdot (P_1 - P_2), \quad (1.6)$$

где $\rho = \frac{P_1 + P_2}{2RT} = \frac{P_{cp}}{RT}$ – средняя плотность воздуха в пневмосопротивлении.

Подставив в (1.6) значение F согласно (1.5), получим

$$G = \frac{\pi(d^2 - d_n^2)^2 \rho (P_1 - P_2)}{128\eta l}. \quad (1.7)$$

Если перейти от абсолютного давления к избыточному давлению и записать $P_1 = P = const$, а $P_2 = 0$, то выражение (1.7) примет вид

$$G = \frac{\pi(d^2 - d_n^2)^2 \rho P}{128\eta l}. \quad (1.8)$$

Таким образом, предлагаемая схема пневматического измерительного преобразователя реализует зависимость изменения расхода воздуха от величины перемещения плунжера $G = f(l)$.

Из анализа принципа действия тахометрического преобразователя (1.1) следует:

$$n_u = \frac{Q}{SH}.$$

Подставив S согласно (1.3) в формулу (1.1), получим

$$n_u = \frac{Q}{\left(\frac{\pi D_K^2}{4} - \frac{\pi D_{CT}^2}{4} - z h_T h_n \right) H}. \quad (1.9)$$

Объёмный Q и массовый G расходы воздуха связаны зависимостью

$$G = Q \cdot \rho, \quad (1.10)$$

где ρ – плотность воздуха.

Подставим в (1.8) значение G согласно (1.10) и получим

$$Q = \frac{\pi(d^2 - d_n^2)^2 P}{128\eta l}. \quad (1.11)$$

После подстановки Q согласно (1.11) в (1.9) найдём зависимость скорости вращения ротора тахометрического преобразователя от величины перемещения l плунжера первичного измерительного пневматического преобразователя:

$$n_u = \frac{\pi(d^2 - d_n^2)^2 P}{128\eta l \left(\frac{\pi D_K^2}{4} - \frac{\pi D_{CT}^2}{4} - z h_T h_n \right) H}. \quad (1.12)$$

Важным конструктивным параметром преобразователя является величина кольцевого зазора δ между плунжером и измерительным соплом. Выбор величины зазора δ определяется двумя условиями: точностью перемещения плунжера (его перекосом) и максимально допустимой величиной расхода воздуха (исходя из возможности стабилизатора давления воздуха).

Учитывая, что

$$\delta = \frac{d - d_n}{2}. \quad (1.13)$$

Формулу (1.12) можно преобразовать:

$$n_u = \frac{\pi[(d - d_n)(d + d_n)]^2 P}{128\eta l \left(\frac{\pi D_K^2}{4} - \frac{\pi D_{CT}^2}{4} - zh_T h_n \right) H} = \frac{\pi \delta^2 (d + d_n)^2 P}{32\eta l \left(\frac{\pi D_K^2}{4} - \frac{\pi D_{CT}^2}{4} - zh_T h_n \right) H}. \quad (1.14)$$

Расчётные значения скорости вращения ротора для заданного варианта заносятся в табл. 1.1, а затем строится графическая зависимость $n_u = f(l)$ (рис. 1.5).

Таблица 1.1 – Значения скорости вращения ротора $n_u = f(l)$

$l, \text{мм}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$n_u, \text{с}^{-1}$									

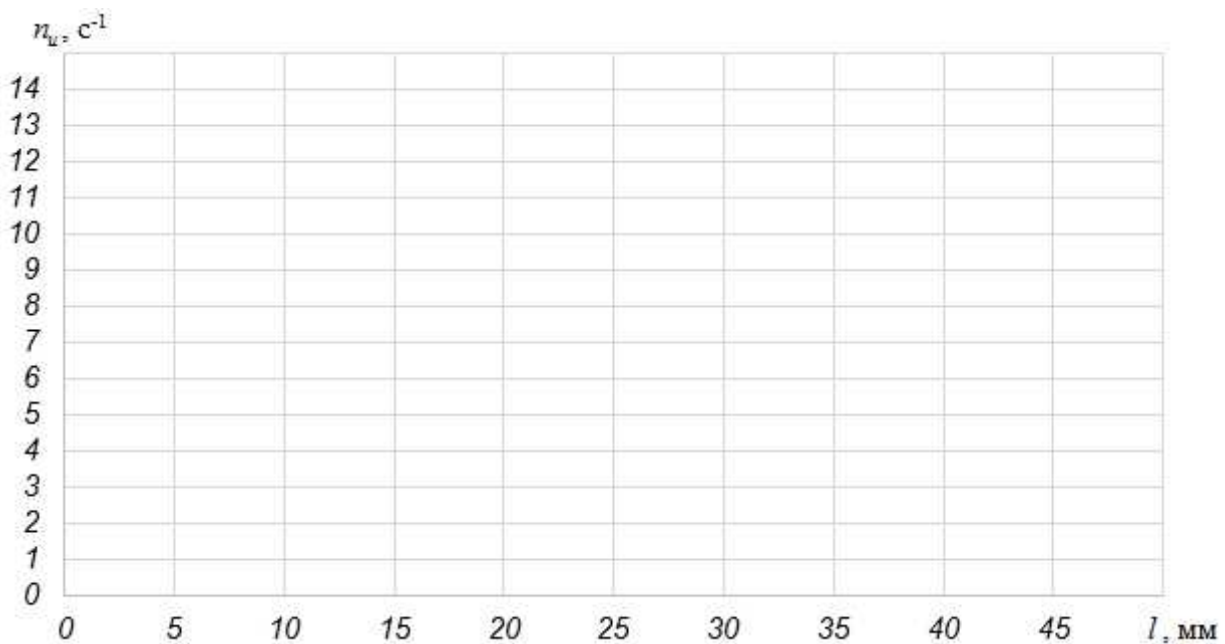


Рисунок 1.5 – Зависимость $n_u = f(l)$

1.2.3. Погрешность пневмотахометрических систем с соплом плунжерного типа и постоянным давлением воздуха на входе расходомера

Погрешность пневмотахометрического преобразователя может быть определена на основании зависимости $n_u = f(l)$ (1.14). Для принятых значений параметров, например, $d = 3$ мм, $d_n = 2,99$ мм, $\eta = 0,185 \cdot 10^{-4}$ с Па, $S = 88,2$ мм² и $H = 76$ мм она имеет вид

$$n_u = 710 \cdot 10^{-6} \frac{P}{l} = k \cdot \frac{P}{l}, \quad (1.15)$$

где $k = 710 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров. Выразим l из (1.15):

$$l = k \cdot \frac{P}{n_u}. \quad (1.16)$$

Значение погрешности измерения величины перемещения плунжера определяется путём дифференцирования выражения (1.16) по переменному параметру n_u :

$$\partial l = k \cdot P \cdot \frac{1}{n_u^2} \cdot \partial n_u. \quad (1.17)$$

После перехода к конечным приращениям имеем

$$\Delta l = k \cdot P \cdot \frac{1}{n_u^2} \cdot \Delta n_u. \quad (1.18)$$

В настоящее время разработаны и серийно выпускаются малогабаритные тахометрические расходомеры с выходным электрическим сигналом. Диапазон расходов воздуха преобразователей этого типа составляет 3,5...250 см³/с, диаметр проходного канала 4...15 мм, погрешность измерения расхода 0,5...1,0 %, перепад давления 0,0015...0,07 МПа. Указанные параметры расходомеров отвечают требованиям, предъявляемым к пневмооборудованию пневматических измерительных систем. Таким образом, погрешность расходомера равна

$$\Delta Q_i = (0,01...0,005) Q_i. \quad (1.19)$$

Погрешность измерения расхода воздуха ΔQ_i связана с погрешностью Δn_u скорости вращения ротора зависимостью (1.1)

$$n_u = \frac{Q}{SH},$$

откуда погрешность Δn_u равна

$$\Delta n_u = \frac{1}{SH} \Delta Q. \quad (1.20)$$

Расход воздуха через расходомер определяется по формуле

$$Q = n_u \cdot SH, \quad (1.21)$$

где Δn_u определяется по табл. 1.1.

Значения расхода воздуха Q_i соответствующие скорости вращения ротора n_u рассчитываются по формуле (1.21), погрешность измерения расхода воздуха ΔQ_i – по формуле (1.19). Рассчитанные значения заносят в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Значения расхода воздуха Q_i и погрешности ΔQ_i

$l, \text{ мм}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$n_u, \text{ с}^{-1}$									
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$									
$\Delta Q, \text{ м}^3/\text{с}$									

Далее рассчитывается погрешность измерения скорости вращения ротора расходомера $\Delta n_u = f(\Delta Q)$ по формуле (1.20). Расчетные значения заносятся в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Значения погрешности Δn_u

$l, \text{ мм}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$\Delta Q, \text{ м}^3/\text{с}$									
$\Delta n_u, \text{ с}^{-1}$									
$\Delta l, \text{ мм}$									

Величина погрешности $\Delta l_i = f(l_i)$ измерения перемещения плунжера пневматического широкопредельного преобразователя определяется по формуле (1.18) и заносится в табл. 1.3. Зависимость $\Delta l_i = f(l_i)$ погрешности перемещения плунжера Δl_i от величины перемещения l_i определяется по данным табл. 1.3 и представляется графически (рис. 1.6).

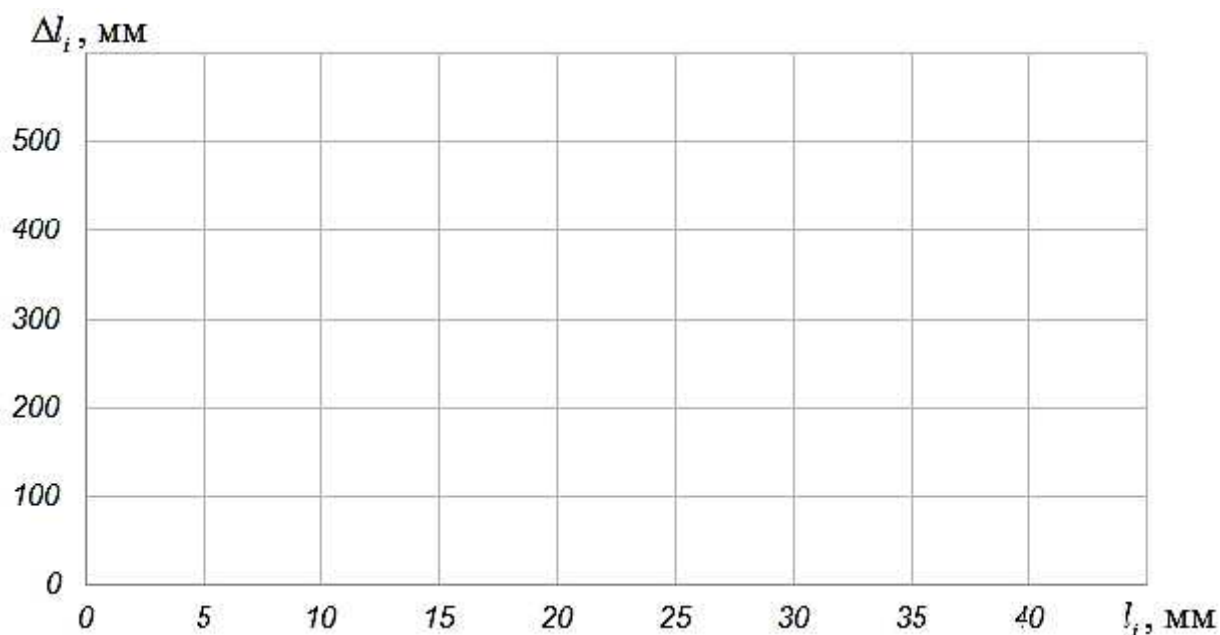


Рисунок 1.6 – Зависимость $\Delta l_i = f(l_i)$ погрешности измерения от перемещения плунжера

1.3. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета пневмосопротивления плунжерного типа и погрешности измерения пневмотахометрического прибора представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4 – Исходные данные для расчета

	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Ход винтовой линии, H , мм	76	70	80	75	70	80	75	80	70	75
Площадь потока, S , мм ²	90	80	85	60	70	75	85	80	75	80
Начальная длина входа плунжера, l_0 , мм	10									
Диаметр измерительного сопла, d , мм	3			4				5		
Перемещение плунжера, l , мм	45									
Основное отклонение плунжера	d									
Квалитет плунжера	5					7				
Рабочее давление воздуха, P , МПа	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1

Примечание. Необходимые дополнительные параметры или изменения исходных данных согласовываются с преподавателем.

1.4. Порядок выполнения работы

1. Изучить принцип действия и методики расчета пневмотахометрического прибора с преобразователем плунжерного типа и погрешности измерения Δl перемещения плунжера.

2. Рассчитать величину радиального зазора δ между плунжером и отверстием измерительного сопла.

3. Рассчитать коэффициент K в формуле (1.15) с учетом значений параметров, заданных в соответствующем варианте (табл. 1.4).

4. Рассчитать по формуле (1.14) и построить статическую характеристику $\Delta n_u = f(l_i)$ для $l_i = 5 \dots 45$ с дискретностью 5 мм.

5. Рассчитать значения расхода воздуха Q_i , соответствующие скорости вращения ротора n_u по формуле (1.1) для $l_i = 5 \dots 45$ с дискретностью 5 мм.

6. Рассчитать значения погрешности измерения расхода воздуха ΔQ_i по формуле (1.18) для Q_i значений расхода (табл. 1.2).

7. Рассчитать значения и построить зависимость погрешности измерения перемещения плунжера Δl от величины его перемещения $\Delta l = f(l)$ (табл. 1.3).

8. Определить диапазоны D_1 и D_2 перемещения плунжера и значения чувствительности $k_1 = \frac{\Delta n_1}{D_1}$ и $k_2 = \frac{\Delta n_2}{D_2}$.

1.5. Содержание отчета

1. Наименование и цель занятия.

2. Основные теоретические положения.

3. Таблица исходных данных для расчета.

4. Таблицы расчетных данных (табл. 1.1–1.3).

5. Графики зависимости $n_u = f(l)$, $\Delta l = f(l)$.

6. Выводы.

1.6. Контрольные вопросы.

1. Поясните принцип действия прибора.

2. Как рассчитать скорость вращения ротора?

3. Как рассчитать чувствительность на заданном участке статической характеристики?

4. Что такое ламинарное течение воздуха?

5. Изложите методику определения погрешности перемещения плунжера.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2
РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ПНЕВМОТАХОМЕТРИЧЕСКОГО
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА С ШИРОКОПРЕДЕЛЬНЫМ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПЛУНЖЕРНОГО ТИПА И ПЕРЕМЕННЫМ
ДАВЛЕНИЕМ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ РАСХОДОМЕРА

2.1. Цель занятия

Целью занятия является изучение принципа действия и расчет погрешности пневмотахометрического измерительного прибора с широкопредельным преобразователем плунжерного типа и переменным давлением воздуха на входе расходомера.

2.2. Теоретические положения

Схема пневмотахометрического преобразователя с соплом плунжерного типа и переменным давлением воздуха на входе расходомера показана на рис. 2.1.

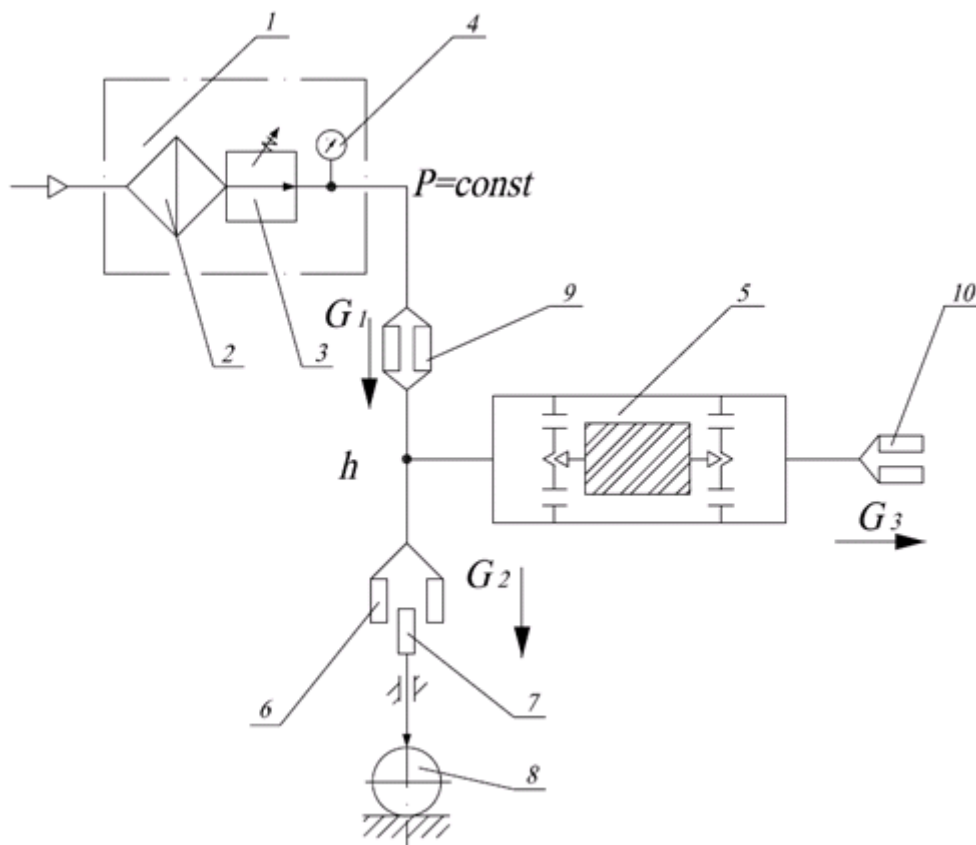


Рисунок 2.1 – Схема прибора с переменным давлением воздуха на входе расходомера

В отличие от схемы преобразователя, показанного на рис. 1.1, преобразователь по схеме 2.1 содержит входное сопло 9 и выходное 10.

Измерительное давление воздуха h является функцией рабочего давления P и проходных сечений F_1 , F_2 и F_3 сопел 6, 9 и 10. Сопла представляют собой ламинарные пневмосопротивления и расход воздуха через них описывается следующими выражениями при малых перепадах давления воздуха:

$$G_1 = \frac{\pi d_1^4 \rho}{128 \eta l_1} (P - h), \quad (2.1)$$

$$G_2 = \frac{\pi (d^2 - d_n^2)^2 \rho h}{128 \eta l}, \quad (2.2)$$

$$G_3 = \frac{\pi d_3^4 \rho h}{128 \eta l_3}. \quad (2.3)$$

Давление в измерительной камере h может быть найдено из условия

$$G_1 = G_2 + G_3. \quad (2.4)$$

Подставив в (2.4) значения G_1 , G_2 и G_3 получим

$$\frac{\pi d_1^4 \rho}{128 \eta l_1} (P - h) = \frac{\pi (d^2 - d_n^2)^2 \rho}{128 \eta l} h + \frac{\pi d_3^4 \rho}{128 \eta l_3} h.$$

После преобразования выражения (2.4) перепишется в виде

$$h = \frac{d_1^4 P}{\left[\frac{(d^2 - d_n^2)^2}{l} + \frac{d_3^4}{l_3} + \frac{d_1^4}{l_1} \right]}. \quad (2.5)$$

В формуле (2.5) переменным параметром, связанным с контролируемым размером, является величина перемещения плунжера l , а изменение диаметра входного сопла d_1 позволяет регулировать пневматическое передаточное отношение K_z , что является важным при выборе параметров пневмосистемы.

Расход воздуха G_3 через расходомер 5 с учётом (2.5) запишется следующим образом:

$$G_3 = \frac{\pi d_3^4 \rho d_1^4 P}{128 \eta l_3 \left[\frac{(d^2 - d_n^2)^2}{l} + \frac{d_3^4}{l_3} + \frac{d_1^4}{l_1} \right]}. \quad (2.6)$$

С учётом (1.10) выражение (2.6) перепишется следующим образом:

$$Q_3 = \frac{\pi d_3^4 d_1^4 P}{128 \eta l_3 \left[\frac{(d^2 - d_n^2)^2}{l} + \frac{d_3^4}{l_3} + \frac{d_1^4}{l_1} \right]}. \quad (2.7)$$

После подстановки Q_3 в (1.11) найдём зависимость скорости вращения ротора тахометрического преобразователя от величины перемещения l плунжера:

$$n_u = \frac{\pi d_3^4 d_1^4 P}{128 \eta l_3 \left[\frac{(d^2 - d_n^2)^2}{l} + \frac{d_3^4}{l_3} + \frac{d_1^4}{l_1} \right] \left(\frac{\pi D_K^2}{4} - \frac{\pi D_{CT}^2}{4} - z h_T h_n \right) \cdot H}. \quad (2.8)$$

Или после преобразования с учётом $\delta = \frac{d - d_n}{2}$ получим

$$n_u = \frac{\pi d_3^4 d_1^4 P}{128 \eta l_3 \left[\frac{\delta^2 (d + d_n)^2}{l} + \frac{d_3^4}{l_3} + \frac{d_1^4}{l_1} \right] \left(\frac{\pi D_K^2}{4} - \frac{\pi D_{CT}^2}{4} - z h_T h_n \right) \cdot H}. \quad (2.9)$$

Конструкция ротора расходомера, основные его размеры и зависимости для расчета скорости вращения ротора n_u (1.1), площади сечения потока воздуха S (1.2) и длины винтовых поверхностей H (1.3), образующих лопасти приведены в разделе 1.2 практического занятия №1.

Скорость вращения ротора рассчитывают по формуле (2.8) для заданных значений (табл. 2.4) конструктивных параметров.

Расчётные значения для заданного варианта заносятся в табл. 2.1, а затем строится графическая зависимость $n_u = f(l)$ (рис. 2.2).

Таблица 2.1 – Значения скорости вращения ротора $n_u = f(l)$

$l, \text{ мм}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$n_u, \text{ с}^{-1}$									

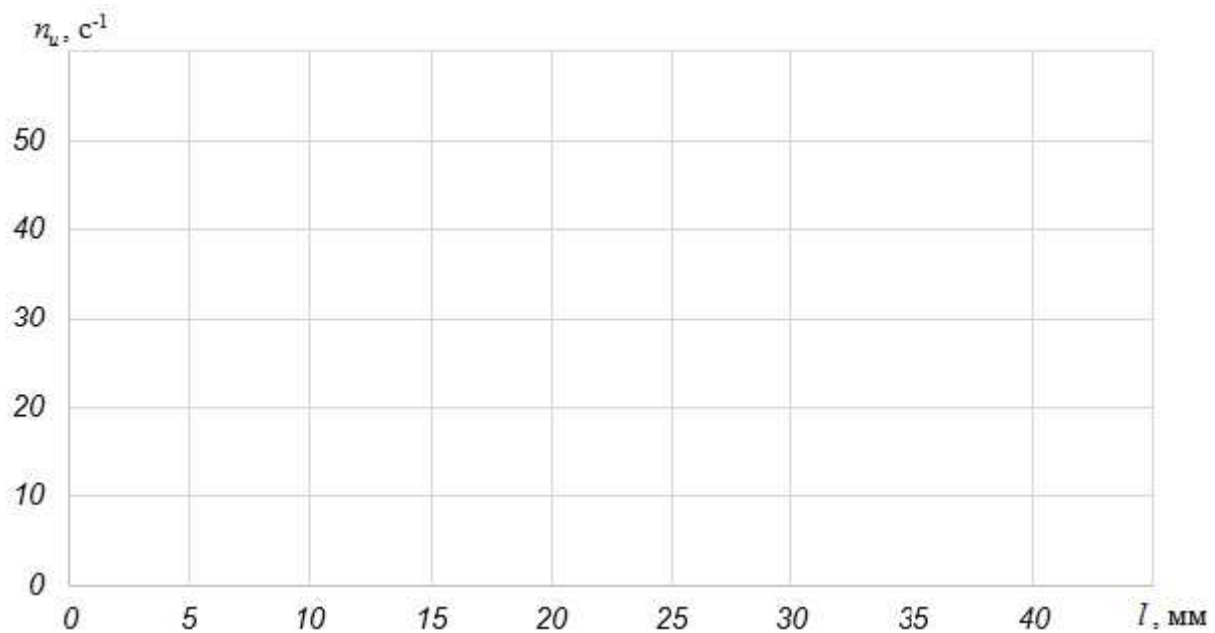


Рисунок 2.2 – Зависимость $n_u = f(l)$

Пример расчета.

Для исходных данных $d = 4$ мм; $d_n = 3,8$ мм; $\eta = 0,185 \cdot 10^{-4}$ мм;
 $S = 88,2$ мм²; $H = 76$ мм; $d_3 = 0,3$ мм; $l_3 = 4,0$ мм;
 $l_1 = 2,0$ мм формула (2.8) будет иметь вид

$$n_u = \frac{3,14 \cdot 0,3^4 d_1^4 P}{128 \cdot 0,185 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \left[\frac{(4^2 - 3,8^2)^2}{l} + \frac{0,3^4}{4} + \frac{d_1^4}{2} \right] \left(\frac{3,14 \cdot 13^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 6^2}{4} - 8 \cdot 0,5 \cdot 4 \right) \cdot 76}$$

Упростив выражение, получим

$$n_u = \frac{0,0254 \cdot d_1^4 P}{63,64 \cdot \left[\frac{2,43}{l} + 0,002 + \frac{d_1^4}{2} \right]}. \quad (2.10)$$

При $d_1 = 0,5$ мм и $P = 0,1 \cdot 10^6$ Па получим

$$n_u = \frac{158,75}{63,64 \cdot \left[\frac{2,43}{l} + 0,033 \right]} = \frac{2,49}{\left[\frac{2,43}{l} + 0,033 \right]}. \quad (2.11)$$

Для определения чувствительности измерения на графике $n_u = f(l)$ (рис. 2.2) выделяют два прямолинейных участка D_1 , D_2 и определяют чувствительность $K_1 = \frac{\Delta n_{u1}}{\Delta l_1}$, $K_2 = \frac{\Delta n_{u2}}{\Delta l_2}$.

Погрешность прибора с соплом плунжерного типа и переменным давлением на входе расходомера

Погрешность пневмотахометрического преобразователя может быть определена на основании зависимости $n_u = f(l)$ (2.11):

$$n_u = \frac{2,49}{\left[\frac{2,43}{l} + 0,033 \right]}.$$

Выразим l из формулы (2.11):

$$l = \frac{2,43}{\left[\frac{2,49}{n_u} - 0,033 \right]}. \quad (2.12)$$

Значение погрешности измерения величины перемещения плунжера определяется путём дифференцирования выражения (2.12) по переменному параметру n_u :

$$\partial l = \frac{6,05}{\left[\frac{2,49}{n_u} - 0,033 \right]^2 n_u^2} \cdot \partial n_u. \quad (2.13)$$

После перехода к конечным приращениям имеем

$$\Delta l = \frac{6,05}{\left[\frac{2,49}{n_u} - 0,033 \right]^2 n_u^2} \cdot \Delta n_u. \quad (2.14)$$

В разделе 1.2.3 (практическое занятие № 1) отмечено, что в настоящее время разработаны и серийно выпускаются малогабаритные тахометрические расходомеры с выходным электрическим сигналом. Диапазон расходов воздуха преобразователей этого типа составляет

3,5...250 см³/с, диаметр проходного канала 4...15 мм, погрешность измерения расхода 0,5...1,0 %, перепад давления 0,0015...0,07 МПа. Указанные параметры расходомеров отвечают требованиям, предъявляемым к пневмооборудованию пневматических измерительных систем. Таким образом погрешность расходомера согласно (1.19) равна

$$\Delta Q_i = (0,01...0,005) Q_i.$$

Погрешность измерения расхода воздуха ΔQ_i связана с погрешностью Δn_u числа оборотов ротора зависимостью (1.1):

$$n_u = \frac{Q}{SH},$$

откуда погрешность Δn_u (1.20) равна

$$\Delta n_u = \frac{1}{SH} \Delta Q,$$

где Δn_u определяется по табл. 1.1.

Расход воздуха через расходомер определяется по формуле (1.21):

$$Q = n_u \cdot SH.$$

Значения расхода воздуха Q_i , соответствующие скорости вращения ротора n_u рассчитывают по формуле (1.21), погрешность измерения расхода воздуха ΔQ_i – по формуле (1.19) и заносят их в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Значения расхода воздуха Q_i и погрешности ΔQ_i

l , мм	5	10	15	20	25	30	35	40	45
n_u , с ⁻¹									
Q , м ³ /с									
ΔQ , м ³ /с									

Далее рассчитывается погрешность измерения скорости вращения ротора расходомера $\Delta n_u = f(\Delta Q)$ по формуле (1.20). Расчетные значения заносятся в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Значения погрешности Δn_u и Δl_i

l_i , мм	5	10	15	20	25	30	35	40	45
ΔQ , м ³ /с									
Δn_u , с ⁻¹									
Δl_i , мм									

Величина погрешности $\Delta l_i = f(l_i)$ измерения перемещения плунжера пневматического широкопредельного преобразователя определяется по формуле (1.18) и заносится в табл. 2.3. Зависимость $\Delta l_i = f(l_i)$ погрешности перемещения плунжера Δl_i от величины перемещения l_i определяется по данным табл. 2.3 и представляется графически (рис. 2.3).

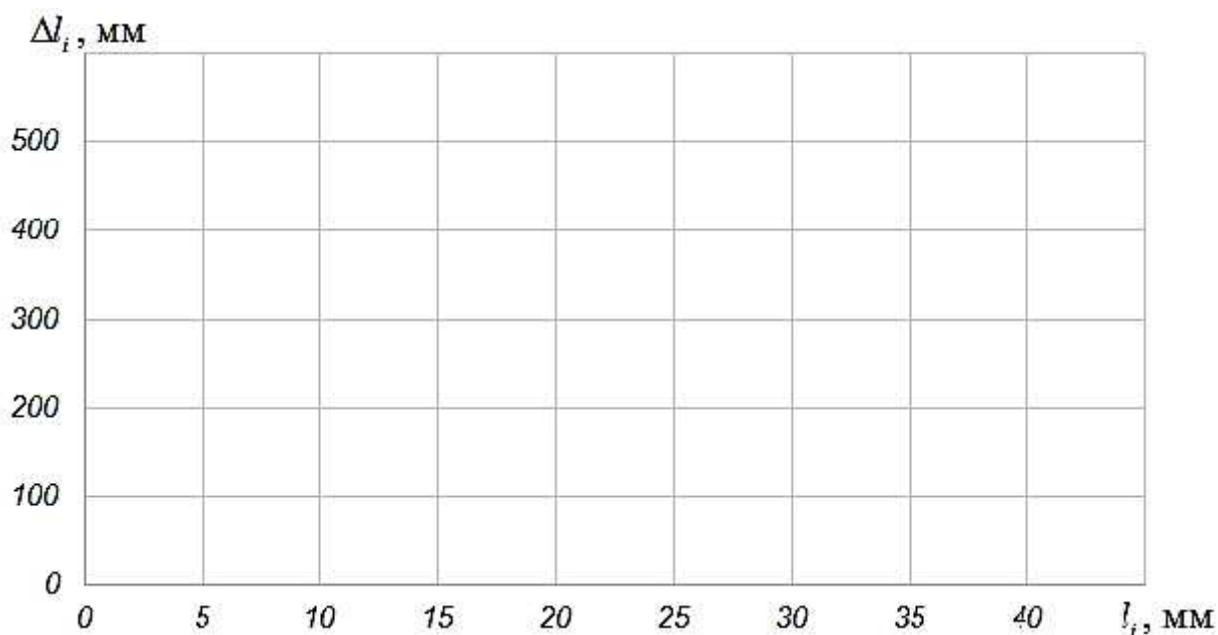


Рисунок 2.3 – Зависимость погрешности измерения от перемещения плунжера

2.3. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета пневмосопротивления плунжерного типа и погрешности измерения пневмотахометрического прибора представлен в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Исходные данные для расчета

Наименование параметра	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Ход винтовой линии, H , мм	76	70	80	75	70	80	75	80	70	75
Площадь потока, S , мм ²	90	80	85	60	70	75	85	80	75	80
Начальная длина входа плунжера, l_0 , мм	10									
Диаметр измерительного сопла, d , мм	3			5				4		
Перемещение плунжера, l , мм	35									
Основное отклонение плунжера	d									
Квалитет плунжера	5					7				
Рабочее давление воздуха, P , МПа	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1
Диаметр входного сопла d_1 , мм	0,5	0,6	0,8	0,5	0,6	0,8	0,5	0,6	0,8	0,5
Диаметр выходного сопла d_3 , мм	0,3									
Длина сопла, l_3 , мм	4									
Длина сопла, l_1 , мм	2									

Примечание. Необходимые дополнительные параметры или изменения исходных данных согласовываются с преподавателем.

2.4. Порядок выполнения работы

1. Изучить принцип действия и методики расчета пневмотахометрического прибора с преобразователем плунжерного типа и погрешности измерения Δl перемещения плунжера.

2. Рассчитать по формуле (2.8) и построить статическую характеристику $\Delta n_u = f(l_i)$ для $l_i = 5 \dots 45$ с дискретностью 5 мм.

3. Определить диапазоны D_1 и D_2 перемещения плунжера и значения чувствительности $k_1 = \frac{\Delta n_1}{D_1}$ и $k_2 = \frac{\Delta n_2}{D_2}$.

4. Рассчитать значения расхода воздуха Q_i , соответствующие скорости вращения ротора n_u по формуле (1.21) для $l_i = 5 \dots 45$ с дискретностью 5 мм.

5. Рассчитать значения погрешности измерения расхода воздуха ΔQ_i по формуле (1.19) для Q_i значений расхода (табл. 2.2).

6. Рассчитать значения и построить зависимость погрешности измерения перемещения плунжера Δl от величины его перемещения $\Delta l = f(l)$ (табл. 2.3).

2.5. Содержание отчета

1. Наименование и цель занятия.
2. Основные теоретические положения.
3. Таблица исходных данных для расчета.
4. Таблицы расчетных данных (табл. 2.1 - 2.3).
5. Графики зависимости $n_u = f(l)$, $\Delta l = f(l)$.
6. Выводы.

2.6. Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия прибора.
2. Как рассчитать скорость вращения ротора?
3. Как рассчитать чувствительность на заданном участке статической характеристики?
4. Что такое число Рейнольдса?
5. Изложите методику определения погрешности перемещения плунжера.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3 РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ПНЕВМОТАХОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА С ТУРБУЛЕНТНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ТИПА СОПЛО-ЗАСЛОНКА И ПОСТОЯННЫМ ДАВЛЕНИЕМ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ РАСХОДОМЕРА

3.1. Цель занятия

Целью занятия является изучение принципа действия и расчета погрешности пневмотахометрического измерительного прибора с турбулентным сопротивлением типа сопло-заслонка и постоянным давлением воздуха на входе расходомера.

3.2. Теоретические положения

Схема пневмотахометрического прибора с турбулентным сопротивлением типа сопло-заслонка и постоянным давлением воздуха на входе расходомера показана на рис. 3.1.

На рис. 3.1 позицией 7 обозначена заслонка измерительного сопла 6. Эти элементы образуют пневмосопротивления турбулентного типа, расходная характеристика которого описывается зависимостью

$$G = \alpha F_1 P_1 \sqrt{\left\{ \frac{2}{RT_1} \cdot \frac{\chi}{\chi - 1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\chi}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \right] \right\}}. \quad (3.1)$$

Это выражение трудно использовать для практических расчётов, но его можно упростить и представить в следующем виде при малых перепадах давления воздуха на пневмосопротивлении:

$$G = \alpha F \varepsilon \sqrt{2\rho_1(P_1 - P_2)}, \quad (3.2)$$

где ρ_1 – плотность воздуха до сопротивления; ε – коэффициент, учитывающий изменение плотности воздуха при прохождении через пневмосопротивление; α – коэффициент расхода; F – площадь сечения сопротивления.

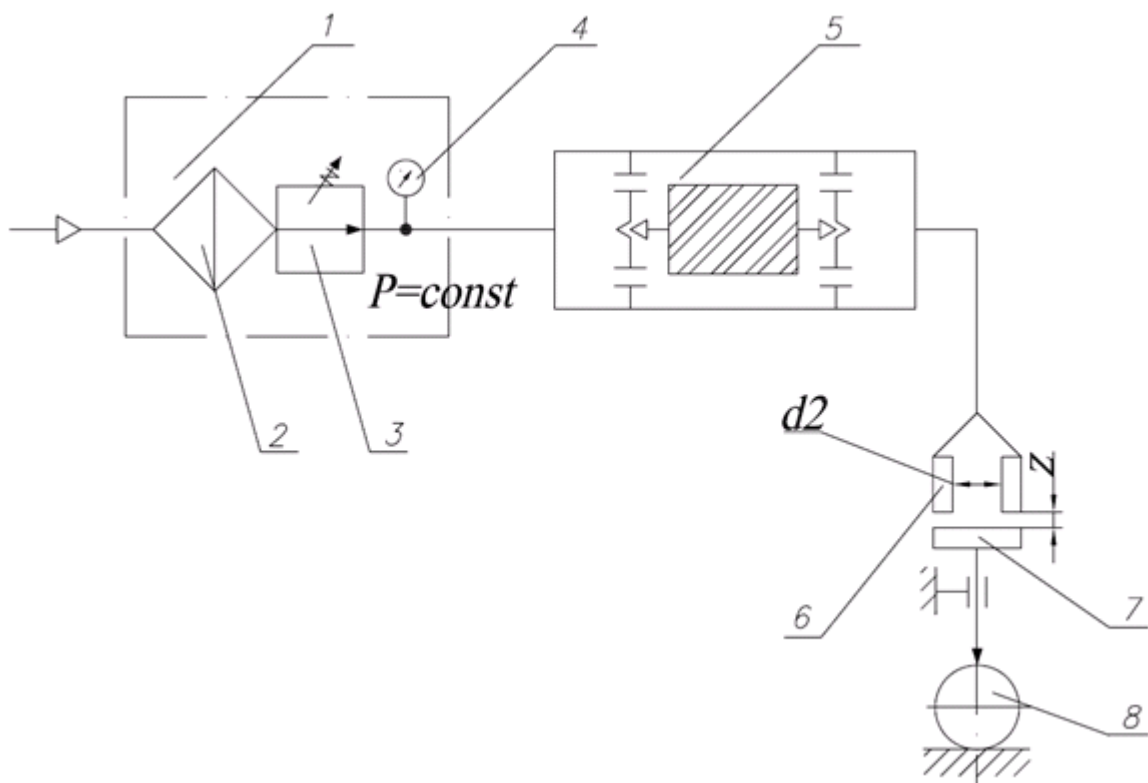


Рисунок 3.1 – Схема пневмотахометрического прибора с турбулентным сопротивлением типа сопло-заслонка

С учётом принятых обозначений и при переходе к избыточным давлениям формула (3.2) переписывается в виде

$$G = \alpha_2 F_2 \varepsilon_2 \sqrt{2\rho_2 P}. \quad (3.3)$$

Площадь истечения воздуха через измерительное сопло равна:

$$F_2 = \pi d_2 z, \quad (3.4)$$

где d_2 – диаметр измерительного сопла; z – зазор между соплом и заслонкой.

Тогда выражение (3.3) примет вид

$$G = \alpha_2 \pi d_2 z \varepsilon_2 \sqrt{2\rho_2 P}. \quad (3.5)$$

Переходя от массового расхода воздуха к объёмному, получим

$$Q = \frac{\alpha_2 \pi d_2 z \varepsilon_2}{\rho_2} \sqrt{2\rho_2 P}. \quad (3.6)$$

После подстановки Q в (1.9) найдём зависимость скорости вращения ротора тахометрического преобразователя от зазора z между измерительным соплом и заслонкой:

$$n_u = \frac{\alpha_2 \pi d_2 z_n \varepsilon_2}{\left(\frac{\pi D_K^2}{4} - \frac{\pi D_{CT}^2}{4} - z h_T h_n \right) H} \sqrt{\frac{2P}{\rho_2}}. \quad (3.7)$$

Зависимость (3.7) описывает линейную статическую характеристику преобразователя.

Конструкция ротора расходомера, основные его размеры и зависимости для расчета скорости вращения ротора n_u (1.1), площади сечения потока воздуха S (1.2) и длины винтовых поверхностей H (1.3), образующих лопасти приведены в разделе 1.2 практического занятия №1.

По формуле (3.7) рассчитать скорость вращения ротора для заданных значений (табл. 2.4) конструктивных параметров.

Расчётные значения $n_u = f(z)$ для заданного варианта заносятся в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Значения скорости вращения ротора $n_u = f(z)$

z , мм	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24
n_u , с ⁻¹						

Например, для исходных данных $\alpha = 0,82$; $\varepsilon_2 \approx 1$; $\rho_2 = 2,4$ кг/м³; $d_2 = 1,0$ мм; $S = 88,2$ мм²; $H = 76$ мм.

Максимальная величина зазора z между измерительным соплом и заслонкой определяется из условия равенства площади кольцевого зазора и площади поперечного сечения измерительного сопла:

$$\frac{\pi d_2^2}{4} = \pi d_2 z,$$

откуда

$$z_{\max} = \frac{d_2}{4},$$

при $d_2 = 1,0$ мм

$$z_{\max} = 0,25 \text{ мм.}$$

После подстановки исходных данных выражение (3.7) принимает вид

$$n_u = \frac{0,82 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 1 \cdot z}{\left(\frac{3,14 \cdot 13^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 6^2}{4} - 8 \cdot 0,5 \cdot 4 \right) 76} \sqrt{\frac{2P}{2,4 \cdot 10^{-6}}} = 0,3498 \cdot z \cdot \sqrt{P}. \quad (3.8)$$

Диаметр измерительного сопла уменьшен в два раза с $d_2 = 2,0$ мм до $d_2 = 1,0$ мм. Это связано с необходимостью ограничения скорости вращения ротора $n_{2p} = 41,6 \dots 50$ об/с.

В расчётах принимались значения рабочего давления воздуха $P = 0,1; 0,15; 0,2 \cdot 10^6$ Па, изменения зазора $z = 0 \dots 0,25$ мм с дискретностью 0,04 мм.

Результаты расчёта примера представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Расчетные данные

z , мм	P , МПа		
	0,1	0,15	0,2
0	0	0	0
0,04	4,42	5,42	6,26
0,08	8,85	10,84	12,51
0,12	13,27	16,26	18,77
0,16	17,70	21,67	25,03
0,20	22,12	27,10	31,29
0,24	26,55	32,51	37,54

Графики статических характеристик при различных значениях рабочего давления выполняют на сетке рис. 3.2.

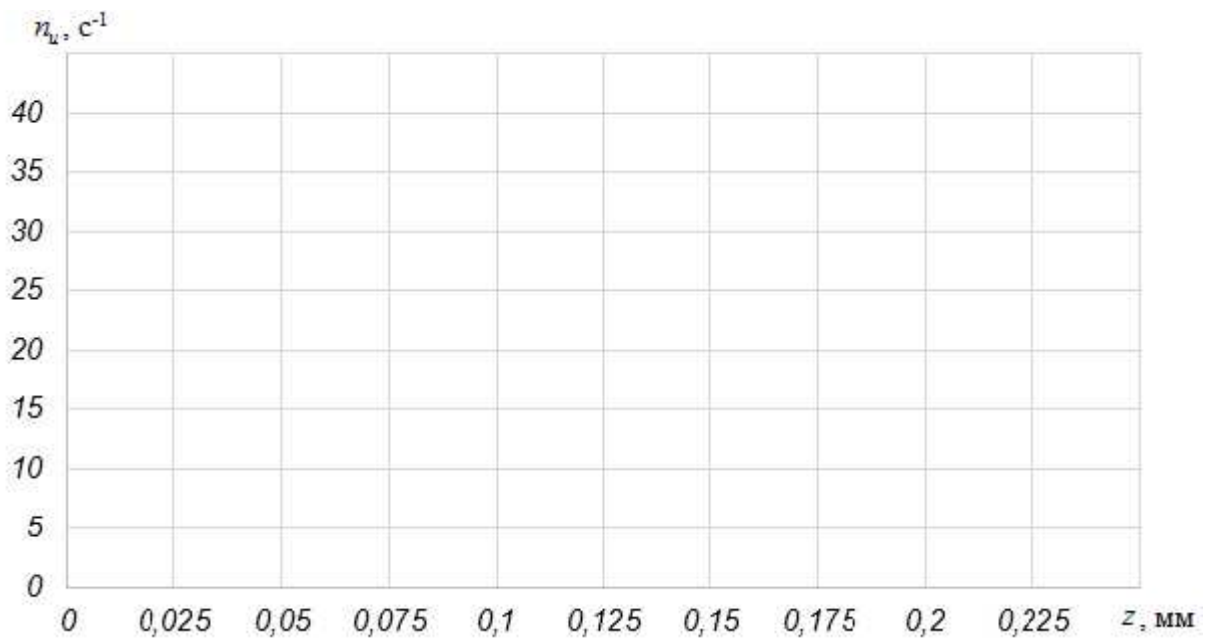


Рисунок 3.2 – Статистическая характеристика $n_u = f(z)$:

1 – $P = 0,1$ МПа; 2 – $P = 0,15$ МПа; 3 – $P = 0,2$ МПа

Статические характеристики преобразователя с измерительным дросселем типа сопло-заслонка имеют линейный характер в диапазоне измерения зазоров $z = 0 \dots 0,25$ мм. Чувствительность преобразователя определяется по формуле

$$K = \frac{\Delta n}{\Delta l} = \frac{n_{u \max} - n_{u \min}}{\Delta l}. \quad (3.9)$$

Значения $n_{u \max}$, $n_{u \min}$ и K для рассматриваемого примера представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Чувствительность преобразователя

Рабочее давление P , МПа	Скорость вращения ротора n_u , c^{-1}		Δn , c^{-1}	Чувствительность K , $\frac{1}{c \cdot мм}$
	$n_{u \max}$	$n_{u \min}$		
0,1	26,55	0	26,6	106,0
0,15	32,51	0	32,5	130,0
0,2	37,54	0	37,5	148,0

Расширить диапазон измерения можно за счёт увеличения диаметра измерительного сопла и уменьшения рабочего давления.

При диаметре $d_2 = 2$ мм $z_{\max} = d_2 / 4 = 0,5$ мм.

Ограничив скорость вращения ротора до $n_{u \max} = 40 c^{-1}$ и $z_{\max} = 0,5$ мм, получаем

$$P = \left(\frac{40}{0,7 \cdot 0,5} \right)^2 = 0,013 \text{ МПа.}$$

При $P = 0,013$ МПа и $d_2 = 2$ мм зависимость $n_u = f(z)$ будет иметь вид

$$n_u = 0,7 \cdot z \sqrt{0,013 \cdot 10^6} = 79,8 \cdot z. \quad (3.10)$$

В табл. 3.3 даны значения n_u при $z = 0 \dots 0,5$ мм и указана величина передаточного отношения $K = \frac{\Delta n}{\Delta l}$.

Таблица 3.3 – Значения n_u и K

z , мм	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
n_u , с ⁻¹	3,2	6,4	9,6	12,8	16	20	24	28	32	36	40
K , (с · мм) ⁻¹	80										

Увеличение диапазона измерения в два раза от 0,25 мм до 0,5 мм приводит к снижению чувствительности.

Погрешность пневмотахометрических преобразователей с дросселем типа сопло-заслонка и постоянным давлением воздуха на входе расходомера

Погрешность измерения определяется на основе зависимости $n_u = f(z)$ (формулы (3.8)).

Выразим $z = f(n_u)$:

при $P = 0,1; 0,15; 0,2$ МПа и $d_2 = 1$ мм:

$$z = \frac{n_u}{0,35 \cdot \sqrt{P}}, \quad (3.10)$$

при $P = 0,013$ МПа и $d_2 = 2$ мм:

$$z = \frac{n_u}{79,8}. \quad (3.11)$$

Значение погрешности измерения величины перемещения плунжера определяется путём дифференцирования выражения (3.11) по переменному параметру n_u .

$$\partial z = \frac{\partial n_u}{79,8}. \quad (3.12)$$

После перехода к конечным приращениям имеем

$$\Delta z = \frac{\Delta n_u}{79,8}. \quad (3.13)$$

В разделе 1.2.3 (практическое занятие № 1) отмечено, что в настоящее время разработаны и серийно выпускаются малогабаритные тахометрические расходомеры с выходным электрическим сигналом. Диапазон расхода воздуха преобразователей этого типа составляет 3,5...250 см³/с, диаметр проходного канала 4...15 мм, погрешность измерения расхода 0,5...1,0 %, перепад давления 0,0015...0,07 МПа. Указанные параметры расходомеров отвечают требованиям, предъявляемым к пневмооборудованию пневматических измерительных систем. Таким образом, погрешность расходомера согласно (1.19) равна

$$\Delta Q_i = (0,01...0,005) Q_i.$$

Погрешность измерения расхода воздуха ΔQ_i связана с погрешностью Δn_u скорости вращения ротора зависимостью (1.1)

$$n_u = \frac{Q}{SH},$$

откуда погрешность Δn_u (1.20) равна

$$\Delta n_u = \frac{1}{SH} \Delta Q.$$

Расход воздуха через расходомер определяется по формуле (1.21)

$$Q = n_u \cdot SH,$$

где Δn_u определяется по табл. 1.1.

Рассчитать значения расхода воздуха Q_i , соответствующие скорости вращения ротора n_u по формуле (1.21), погрешность измерения расхода воздуха ΔQ_i – по формуле (1.19) и занести их в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Значения расхода воздуха Q_i и погрешности ΔQ_i

z , мм	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24
n_u , с ⁻¹						
Q , м ³ /с						
ΔQ , м ³ /с						

Далее рассчитывается погрешность измерения скорости вращения ротора расходомера $\Delta n_u = f(\Delta Q)$ по формуле (1.20). Расчетные значения заносятся в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Значения погрешности Δn_u и Δz_i

z_i , мм	5	10	15	20	25	30	35	40	45
ΔQ , м ³ /с									
Δn_u , с ⁻¹									
Δz_i , мм									

Величина погрешности $\Delta z_i = f(\Delta n_u)$ измерения перемещения заслонки пневматического преобразователя определяется по формуле (3.13) и заносится в табл. 3.5. Зависимость $\Delta z_i = f(z_i)$ погрешности перемещения заслонки Δz_i от величины перемещения z_i определяется по данным табл. 3.5 и представляется графически.

Зависимость погрешности измерения зазора Δz от перемещения заслонки z_i выполняются на сетке рис. 3.3.

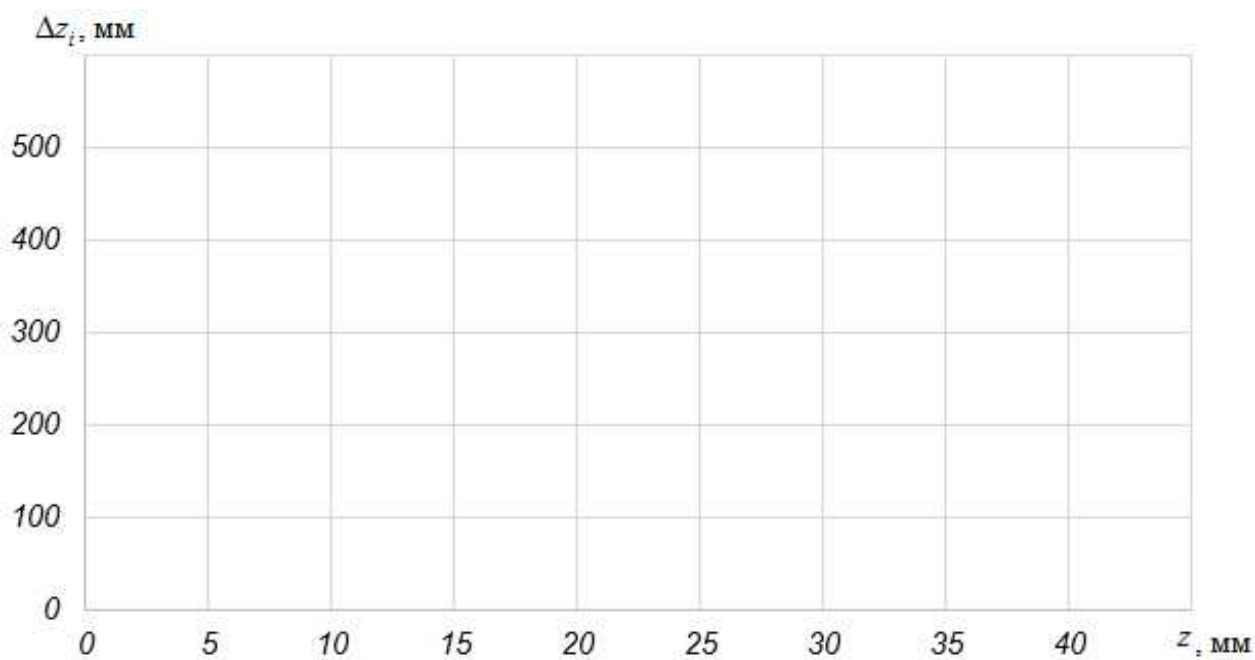


Рисунок 3.3 – Зависимость $\Delta z_i = f(z_i)$ погрешности измерения зазора Δz от перемещения заслонки z_i

3.3. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета пневмотахометрического прибора с пневмосопротивлением типа сопло-заслонка и погрешности измерения представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6 – Исходные данные для расчета

Наименование параметра	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Ход винтовой линии, H , мм	76	70	80	75	70	80	75	80	70	75
Площадь потока, S , мм ²	90	80	85	60	70	75	85	80	75	80
Диаметр измерительного сопла d_2 , мм	1									
Рабочее давление воздуха, P , Мпа	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1

Примечание. Необходимые дополнительные параметры или изменения исходных данных согласовываются с преподавателем.

3.4. Порядок выполнения работы

1. Изучить принцип действия и методики расчета пневмотахометрического прибора с преобразователем типа сопло-заслонка и погрешности измерения Δz перемещения заслонки.

2. Рассчитать по формуле (3.7) и построить статическую характеристику $\Delta n_u = f(z_i)$ для $z_i = 0,04 \dots 0,24$ мм с дискретностью 0,04 мм.

3. Рассчитать чувствительность k_1 по статической характеристике $\Delta n_u = f(z_i)$.

4. Рассчитать значения расхода воздуха Q_i , соответствующие скорости вращения ротора n_u для $z_i = 0,04 \dots 0,24$ мм с дискретностью 0,04 мм.

5. Рассчитать значения погрешности измерения расхода воздуха ΔQ_i по формуле (1.19) для Q_i значений расхода (табл. 2.2).

6. Рассчитать значения и построить зависимость погрешности измерения перемещения заслонки Δz от величины ее перемещения $\Delta z = f(z)$ (табл. 3.5).

3.5. Содержание отчета

1. Наименование и цель занятия.
2. Основные теоретические положения.
3. Таблица исходных данных для расчета.
4. Таблицы расчетных данных (табл. 3.1-3.5).

5. Графики зависимости $n_u = f(z)$, $\Delta z = f(z)$.

6. Выводы.

3.6. Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия прибора.
2. Как рассчитать скорость вращения ротора?
3. Как рассчитать чувствительность на заданном участке статической характеристики?
4. Что такое турбулентное течение воздуха?
5. Изложите методику определения погрешности перемещения плунжера.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4 РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ МЕМБРАННОГО ПНЕВМОИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

4.1. Цель занятия

Целью занятия является изучение принципа действия и расчета погрешности мембранного пневмоиндуктивного преобразователя.

4.2. Теоретические положения

В пневматических приборах для линейных измерений использована зависимость между площадью f проходного сечения канала истечения и расходом G сжатого воздуха. Площадь канала истечения изменяется за счет измеряемого линейного перемещения. Таким образом, $G = \varphi(P, f)$, где P – давление воздуха, под которым он истекает через проходное сечение канала площадью f . На рис. 4.1 показана блок-схема пневматического прибора.

Прибор включает в себя следующие узлы и блоки: первичный пневматический преобразователь Π типа сопло-заслонка, который воспринимает линейный размер детали и преобразовывает его в соответствующее изменение давления или расхода воздуха; измерительную пневматическую схему $ИС$, предназначенную для преобразования сигнала первичного преобразователя в удобный для обработки электрический параметр; указательное устройство $У_k$, служащее для отображения измеряемой величины в принятых единицах измерения; командное устройство K , предназначенное для подачи сигналов-команд управления технологическим процессом; стабилизатор давления C и фильтр Φ очистки воздуха; источник сжатого воздуха $ИБ$.

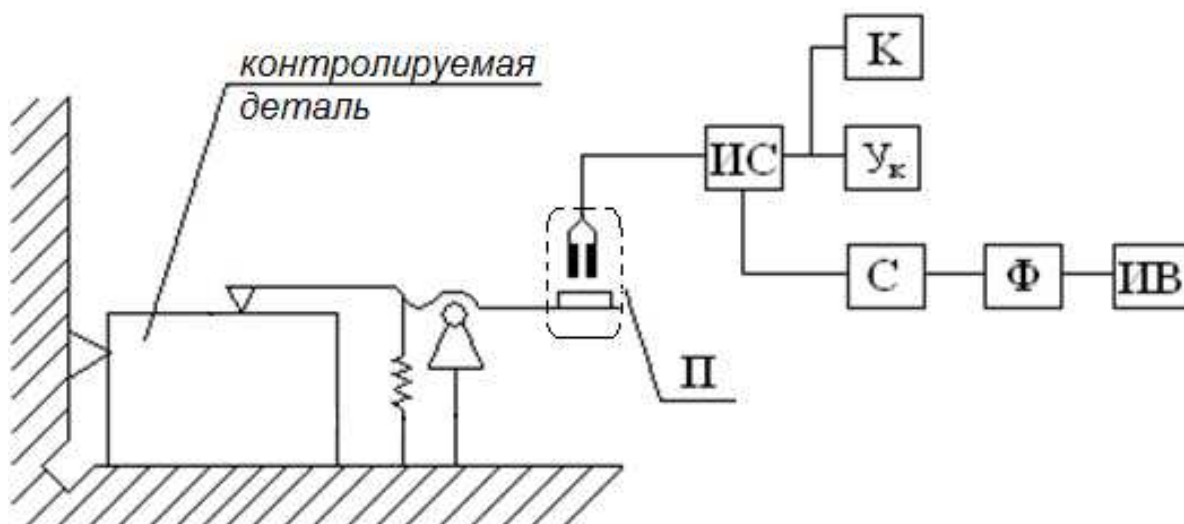


Рисунок 4.1 – Блок-схема пневматического прибора

Измеряя расход G , при постоянном давлении P мы можем судить о размере контролируемой детали.

Пневматические приборы обладают высокой точностью, позволяют производить дистанционные измерения, малогабаритная пневматическая измерительная оснастка позволяет производить измерения в относительно труднодоступных местах и создавать наиболее простые конструкции многомерных устройств для контроля практически любых линейных параметров деталей. Однако для работы пневматических приборов необходима воздушная сеть с определенным давлением воздуха, подготовка которого требует особого внимания в процессе эксплуатации.

Расход воздуха в пневматических приборах в основном измеряют с помощью манометров и ротаметров, в зависимости от чего все пневматические измерительные схемы делятся на две основные группы:

- *Манометрические* – реагирующие на изменение давления (рис. 4.2).
- *Ротаметрические* – реагирующие на изменение расхода.

В приборах для автоматического контроля размеров в машиностроении более широко применяют пневматические схемы манометрического типа. На рис. 4.2,а представлена простейшая схема прибора манометрического типа. Для косвенного определения расхода воздуха через пневматический преобразователь с площадью проходного сечения f_2 путем измерения давления устанавливают дополнительный постоянный дроссель с площадью канала f_1 , который в пневматических приборах называют входным соплом.

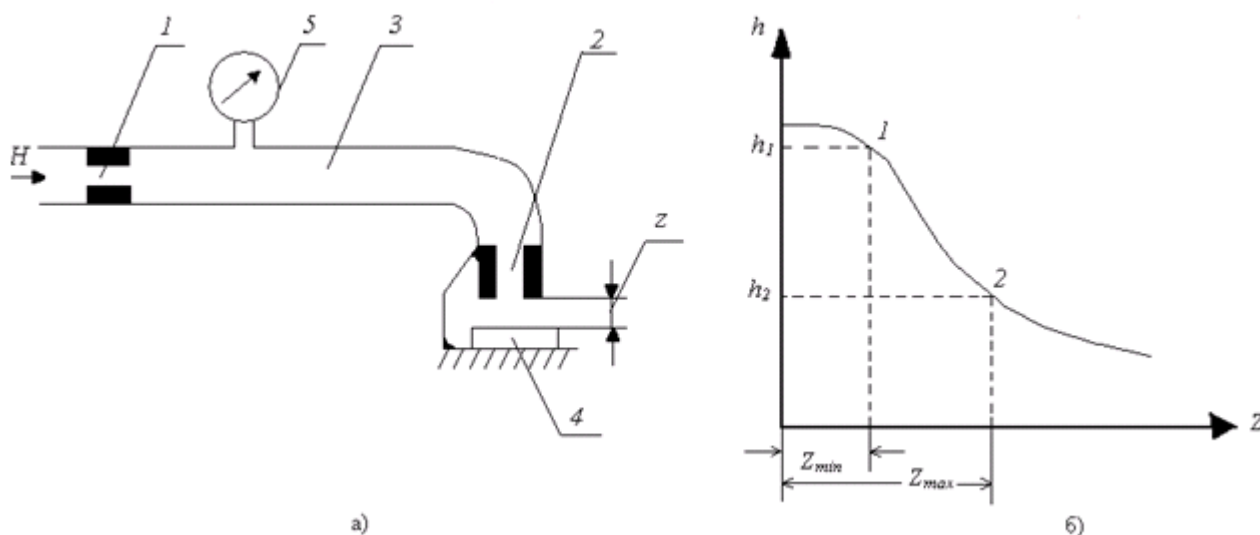


Рисунок 4.2 – Пневматический прибор манометрического типа:

а – принципиальная схема;

б – характеристика пневматической измерительной схемы

Сжатый воздух под постоянным рабочим давлением H через входное сопло 1 истекает в измерительную камеру 3 и далее через кольцевой зазор, образованный торцом измерительного сопла 2 и поверхностью контролируемой детали 4 , истекает в атмосферу. В зависимости от величины зазора Z в камере 3 устанавливается определенное измерительное давление h , которое при постоянном рабочем давлении H и площади входного сопла f_1 является мерой расхода воздуха через преобразователь, следовательно, и мерой контролируемой линейной величины Z . В качестве измерителя давления h могут использоваться жидкостные или пружинные манометры 5 , шкала которых проградуирована в линейных величинах. Такие манометры снабжены устройствами для выдачи сигналов-команд.

В нашей стране широкое распространение получили приборы, построенные по дифференциальной схеме. В этих приборах используются дифференциальные манометры, где в основном в качестве упругих чувствительных элементов применены сильфоны. На рис. 4.3 приведена принципиальная схема такого прибора. Сжатый воздух из пневмосети, пройдя через блок фильтра и стабилизатора, под постоянным давлением истекает через входные сопла 1 и $1'$ в полости сильфонов.

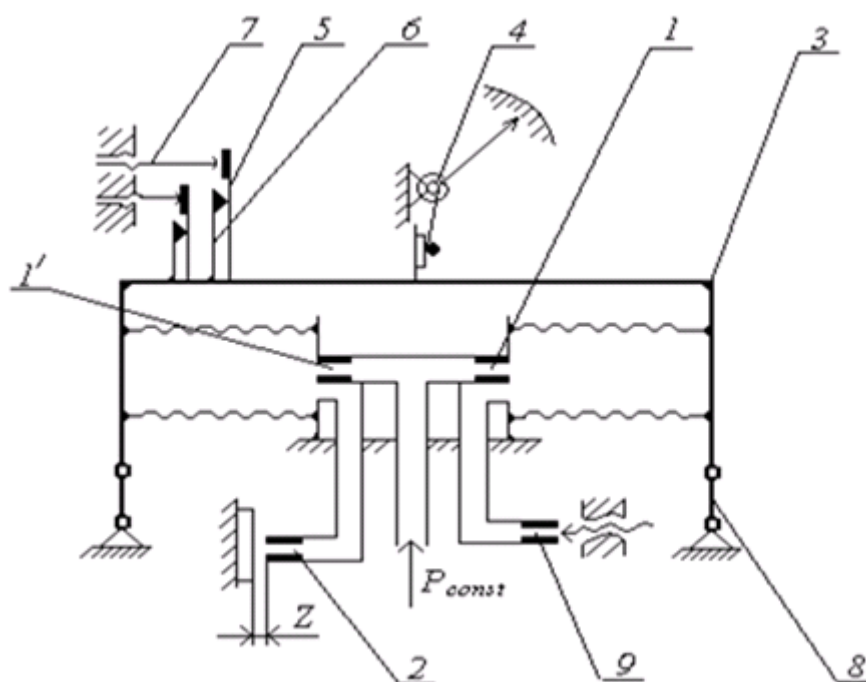


Рисунок 4.3 – Принципиальная схема сифонного дифференциального пневматического прибора

Из левого сифона воздух через кольцевой зазор Z , образованный торцом измерительного сопла 2 и поверхностью контролируемой детали, истекает в атмосферу. В этом сифоне создается измерительное давление h_u , величина которого зависит от размера контролируемой детали. Из правого сифона воздух истекает в атмосферу через узел противодействия 9, а в полости сифона создается постоянное давление h_n . Свободные концы сифонов жестко связаны стяжкой 3, которая подвешена на плоских пружинах 8. Положение подвижной системы прибора определяется разностью измерительного давления h и некоторого постоянного противодействия h_n . Перемещение подвижной системы измеряется с помощью механизма 4, который включает стрелку со шкалой и рычажно-зубчатую передачу от сифонов к стрелке. На подвижной системе прибора с помощью плоских пружин 5 закреплены подвижные электрические контакты. Для предварительного натяжения пружин с целью обеспечения необходимого усилия замыкания контактов служат упоры 6. Винты 7 служат для настройки срабатывания электрических контактов при заданном размере контролируемой детали. В существующих приборах число контактов достигает восьми. При дифференциальных измерениях вместо узла противодействия устанавливается второе измерительное сопло, аналогичное соплу 2.

В том случае, когда прибор проектируется также и для контроля отклонений от правильной геометрической формы и взаимного расположения поверхностей, например, овальности, биения,

перпендикулярности торца и т. д., он снабжается плавающим контактом. Настройка прибора ведется с помощью образцовых деталей, причем при настройке контактов, регулируя узел противодействия, добиваются такого положения подвижной системы, при котором стрелка прибора располагается симметрично относительно нуля шкалы при последовательной установке на измерительную позицию максимальной и минимальной образцовой детали.

В качестве вторичных преобразователей в пневматических измерительных системах используются сильфонные преобразователи (рис. 4.3), а также мембранные преобразователи дифференциального (рис. 4.4) и компенсационного (рис. 4.5) типов.

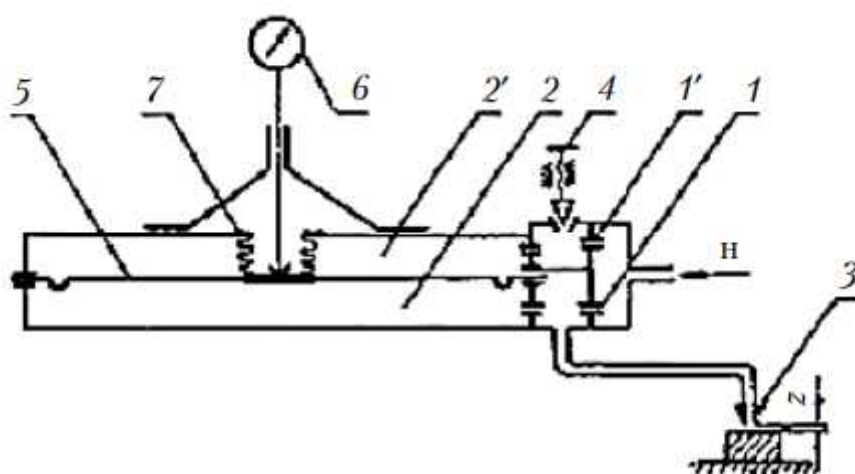


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема пневматического преобразователя дифференциального типа с упругой мембраной

На рис. 4.4 приведена принципиальная схема пневматического преобразователя дифференциального типа с упругой мембраной. Принцип работы следующий. Сжатый воздух постоянного давления P через входные сопла 1 и $1'$ истекает в измерительную камеру 2 и в камеру противодействия $2'$. Из камеры 2 воздух истекает в атмосферу через зазор Z между торцом измерительного сопла 3 и контролируемой деталью, а из камеры $2'$ — через настроенный конический вентиль 4 . При изменении размера контролируемой детали меняется перепад давлений на мембране 5 , что вызывает прогиб мембраны. Прогиб фиксируется показывающим прибором 6 . Для герметизации камеры $2'$ служит сильфон 7 .

Мембрану с целью уменьшения погрешности обратного хода изготавливают из бериллиевой бронзы, которая обладает весьма малым гистерезисом.

На рис. 4.5 приведена принципиальная схема прибора, построенного по компенсационной схеме.

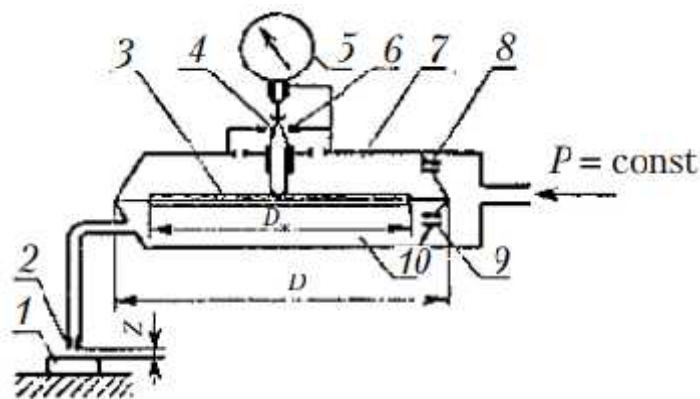


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема пневматического преобразователя компенсационного типа

Принцип работы следующий. Сжатый воздух под постоянным давлением P поступает через входные сопла 8 и 9 в измерительную камеру 10 и компенсационную камеру 7. Из измерительной камеры воздух истекает в атмосферу через измерительный зазор между торцом измерительного сопла 2 и поверхностью контролируемой детали 1.

Из компенсационной камеры воздух истекает через кольцевой зазор между поверхностями конической иглы 4 и сопла 6. Вялая мембрана 3 находится в покое только в том случае, если давление воздуха в измерительной и компенсационной камерах одинаково. При изменении зазора Z измерительное давление также меняется и равновесие мембраны нарушается. Перемещаясь, мембрана изменяет положение иглы 4 относительно сопла 6 таким образом, что давление в компенсационной камере вновь становится равным измерительному. Перемещение иглы 4, отсчитываемое по шкале измерительной головки 5, является мерой измерения размера контролируемой детали 1.

Погрешность мембранного преобразователя дифференциального типа

Использование упругой плоской мембраны в качестве чувствительного элемента пневматического преобразователя позволяет значительно сократить объёмы измерительных камер и, следовательно, уменьшить инерционность прибора по сравнению с сифонной конструкцией.

Преобразователи с плоской мембраной часто применяют в сочетании с фотоэлектрическими сортировочными преобразователями, которые имеют шкалу и позволяют выдавать до 50 дискретных сигналов-команд, а также с механотронными или индуктивными приборами. Такие сочетания объясняются тем, что пневматические измерительные устройства малогабаритны и высокоточны, а в существующих, например, фотоэлектрических преобразователях серийного производства просто решается задача дальнейшего преобразования измерительной информации в

дискретные сигналы-команды. Сочетание пневматического преобразователя с индуктивными и механотронными приборами также создаёт возможность для использования при построении измерительного средства наиболее положительных свойств указанных приборов.

Пневматические комбинированные пневмоиндуктивные преобразователи используются в качестве вторичных преобразователей для измерения линейных величин с целью увеличения чувствительности измерения (общего передаточного отношения) и получения аналогового электрического сигнала на выходе индуктивного преобразователя.

Принципиальная схема мембранного комбинированного пневмоиндуктивного преобразователя приведена на рис. 4.6.

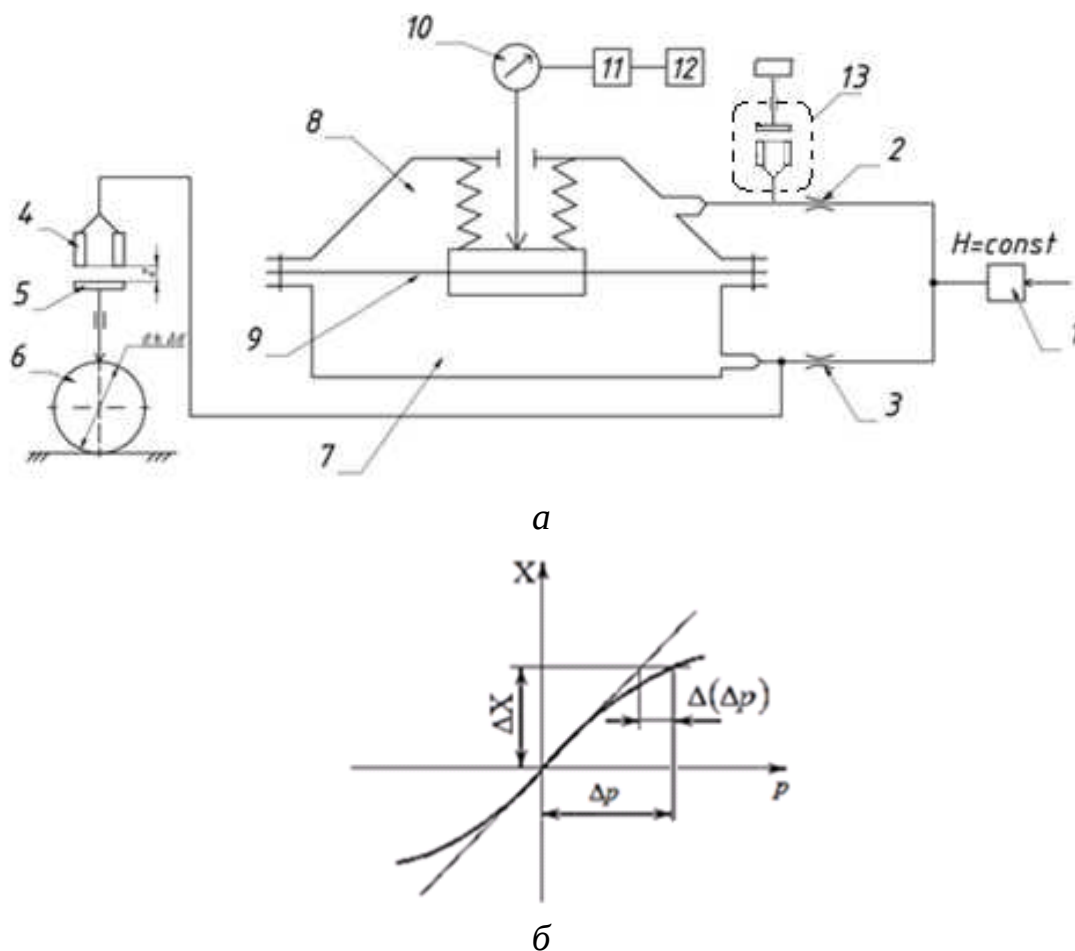


Рисунок 4.6 – Схема комбинированного пневмоиндуктивного преобразователя с плоской мембраной (а) и его характеристика (б)

Принцип действия следующий. Воздух от компрессора поступает к блоку подготовки воздуха 1, который включает в себя регулятор-стабилизатор давления воздуха, фильтр-влагодетелитель и манометр. Далее воздух под постоянным рабочим давлением $H = const$ через входные сопла 2 и 3 поступает в измерительную камеру 7 и камеру противодействия 8, а из камеры 7 к измерительному соплу 4. Из измерительного сопла 4 воздух

выходит в атмосферу через кольцевой зазор Z между соплом 4 и заслонкой 5. Величина зазора Z зависит от диаметра контролируемой детали 6 и вызывает изменение давления воздуха h в измерительной камере 7 мембранного преобразователя, что приводит к перемещению мембраны 9 и изменению показания индуктивного преобразователя 10. Давление воздуха в камере противодействия регулируется узлом противодействия 13. Сигнал с индуктивного преобразователя на измерительную схему 11, а затем на показывающий прибор 12.

Вывод уравнения погрешности мембранного пневмоиндуктивного преобразователя

Расчёт мембранного преобразователя заключается в определении по заданной нелинейности характеристики мембраны и чувствительности пневматического преобразователя основных параметров мембраны, которые обеспечили бы требуемую чувствительность и точность мембранного преобразователя. К параметрам мембраны относятся её диаметр и толщина.

Суммарная чувствительность мембранного преобразователя

$$K_{\text{общ}} = K_z \cdot K_M = \frac{\Delta p}{\Delta z} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta p} = \frac{\Delta x}{\Delta z}, \quad (4.1)$$

где K_z – пневматическое передаточное отношение, которое выбирают по экспериментальным таблицам, исходя из заданного диапазона измерения Δz ; $K_M = \frac{\Delta x}{\Delta p}$ – чувствительность мембраны.

Чувствительность мембраны K_M определяют из зависимости прогиба мембраны x от перепада давлений Δp на ней, эта величина является характеристикой мембраны и в случае жёсткой её заделки имеет вид

$$\frac{\Delta p R^4}{E b^4} = A \frac{x}{b} + B \left(\frac{x}{b} \right)^3, \quad (4.2)$$

где $A = \frac{16}{3(1-\mu^2)}$; $B = \frac{2}{21} \cdot \left(\frac{23-9\mu}{1-\mu} \right)$ – постоянные коэффициенты; E –

модуль упругости материала мембраны; $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона; R, b – радиус и толщина мембраны соответственно.

При малых прогибах мембраны вторым членом правой части уравнения (4.2) можно пренебречь, и тогда чувствительность

$$K_M = \frac{\Delta X}{\Delta p} = \frac{R^4}{A E b^2}. \quad (4.3)$$

Наибольшее расхождение $\Delta(\Delta p)$ характеристик $X = f(\Delta p)$, определяемых уравнениями (4.2) и (4.3),

$$\Delta(\Delta p) = \left(\frac{AEb^3}{R^4} \right) X + \left(\frac{BEb}{R^4} \right) X^3 - \left(\frac{AEb^3}{R^4} \right) X = \left(\frac{BEb}{R^4} \right) X^3, \quad (4.4)$$

а относительное расхождение

$$\frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p} = \frac{B}{A} \cdot \left(\frac{\Delta X}{b} \right)^2. \quad (4.5)$$

Характеристики мембраны, определяемые уравнениями (4.2) и (4.3) позволяют увидеть, что прямолинейный участок, при котором расхождение $\Delta(\Delta p)$ не превышает определённого заданного значения, занимает область как положительных, так и отрицательных прогибов (рис. 4.6,б). Однако в силу несовпадения диаметров заделки мембраны с двух её сторон крутизна характеристики мембраны меняется при переходе из области положительных в область отрицательных прогибов. Поэтому при построении высокоточных преобразователей с высокой степенью линейности их характеристики в качестве диапазона измерения ΔX следует выбирать участок характеристики с прогибом одного знака. В этом случае вышеприведенное соотношение определяет относительную погрешность линеаризации δz в общем случае нелинейной характеристики мембраны:

$$\frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p} = \frac{\Delta(\Delta X)}{\Delta X} = \delta z_1, \quad (4.6)$$

где диапазон измерения ΔZ преобразователя соответствует перемещению мембраны на ΔX .

Графическим построением можно показать, что нелинейность характеристики мембраны $x = f(p)$ не выпрямляет нелинейность характеристики $p = f(Z)$ пневматического преобразователя и поэтому суммарная нелинейность

$$\delta z = \delta z_1 + \delta z_2 = \frac{B}{A} \cdot \left(\frac{\Delta X}{b} \right)^2 + \delta z_2, \quad (4.7)$$

где δz_1 – нелинейность характеристики $p = f(Z)$; δz_2 – нелинейность характеристики $x = f(p)$.

Предполагая характеристики $p = f(Z)$ и $x = f(p)$ линейными, можно записать

$$\Delta X = K_z K_M \Delta Z \quad (4.8)$$

и тогда

$$\delta z_1 = \frac{B}{A} \left(\frac{K_z K_M \Delta Z}{b} \right)^2. \quad (4.9)$$

Зависимость, описывающая связь между зазором Z и конструктивными параметрами преобразователя, согласно выражения (4.2), имеет вид

$$Z = \frac{X}{K_{\text{общ}}} = \frac{C}{K_{\text{общ}}} \cdot \frac{NR^2}{Eb^3}, \quad (4.10)$$

где

$$C = \frac{1-\mu^2}{\pi} \left(\frac{k^2-1}{4k^2} - \frac{\ln^2 k}{k^2-1} \right), \quad (4.11)$$

причём N – измерительное усилие индуктивного преобразователя; k – отношение радиуса мембраны к радиусу жёсткого центра. Обычно это отношение достаточно велико, поэтому выражение для постоянной C упрощается:

$$C = \frac{3}{4} \cdot \frac{1-\mu^2}{\pi}. \quad (4.12)$$

Оценка составляющих погрешности измерения

Согласно выражения (4.10) с величиной зазора Z связаны следующие конструктивные параметры преобразователя: общее передаточное отношения $K_{\text{общ}}$, радиус мембраны R , толщина мембраны b и измерительное усилие N , действующее на мембрану со стороны индуктивного преобразователя.

Отклонения указанных параметров вызывают погрешность измерения ΔZ . Общее передаточное отношение определяется произведением пневматического передаточного отношения K_z и отношения мембраны K_M . Пневматическое передаточное отношение определяется как производная статической характеристики $p = f(Z)$ первичного пневматического преобразователя типа сопло-заслонка

$$p = \frac{H}{1 + \left(\frac{4d_2 Z}{d_1^2} \right)^2}, \quad (4.13)$$

где d_1 – диаметр входного сопла; d_2 – диаметр измерительного сопла; H – рабочее давление воздуха.

Дважды продифференцировав уравнение (4.11) по Z , найдем максимальное значение пневматического передаточного отношения

$$K_z = \frac{2,6Hd_2}{d_1^2}. \quad (4.14)$$

На величину погрешности ΔZ оказывают влияние следующие параметры:

- тепловые деформации и погрешность изготовления измерительного сопла Δd_2 ;
- колебание величины рабочего давления воздуха ΔH ;
- отклонение радиуса мембраны ΔR ;
- отклонение толщины мембраны Δb ;
- колебание величины измерительного усилия индуктивного преобразователя ΔN .

Для определения составляющих ΔZ_i от первичных ошибок $\Delta K_{общ}$; ΔR ; Δb ; ΔN вычислим коэффициенты влияния ошибок, для чего определим частные производные выражения (4.10).

Погрешность $\Delta Z_{K_{общ}}$, связанная с колебанием величины передаточного отношения $K_{общ}$.

Коэффициент влияния определяется следующим образом:

$$k_{K_{общ}} = \frac{\partial Z}{\partial K_{общ}} = \left(\frac{CR^2 N}{K_{общ} Eb^3} \right)'_{K_{общ}} = \frac{-CR^2 N}{K_{общ}^2 Eb^3}. \quad (4.15)$$

Погрешность $\Delta Z_{K_{общ}}$ равна

$$\Delta Z_{K_{общ}} = k_{K_{общ}} \Delta K_{общ} = \frac{-CR^2 N}{K_{общ}^2 Eb^3} \Delta K_{общ}. \quad (4.16)$$

Погрешность ΔZ_R от колебания радиуса мембраны ΔR .

Коэффициент влияния равен

$$k_R = \frac{\partial Z}{\partial R} = \left(\frac{CR^2 N}{K_{\text{общ}} Eb^3} \right)'_R = \frac{2CRN}{K_{\text{общ}} Eb^3}. \quad (4.17)$$

Погрешность ΔZ_R равна

$$\Delta Z_R = k_R \cdot \Delta R = \frac{2CRN}{K_{\text{общ}} Eb^3} \cdot \Delta R. \quad (4.18)$$

Погрешность ΔZ_N от колебания измерительного усилия индуктивного преобразователя ΔN .

Коэффициент влияния равен

$$k_N = \frac{\partial Z}{\partial N} = \left(\frac{CR^2 N}{K_{\text{общ}} Eb^3} \right)'_N = \frac{CR^2}{K_{\text{общ}} Eb^3}. \quad (4.19)$$

Погрешность ΔZ_N равна

$$\Delta Z_N = k_N \cdot \Delta N = \frac{CR^2}{K_{\text{общ}} Eb^3} \cdot \Delta N. \quad (4.20)$$

Погрешность ΔZ_b от колебания толщины мембраны вследствие тепловых деформаций и погрешности изготовления.

Коэффициент влияния равен

$$k_b = \frac{\partial Z}{\partial b} = \left(\frac{CR^2 N}{K_{\text{общ}} Eb^3} \right)'_b = \frac{-3CR^2 N}{K_{\text{общ}} Eb^4}. \quad (4.21)$$

Погрешность ΔZ_b равна

$$\Delta Z_b = k_b \cdot \Delta b = \frac{-3CR^2 N}{K_{\text{общ}} Eb^4} \cdot \Delta b. \quad (4.22)$$

Выражения коэффициентов влияния k_i первичных ошибок сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Коэффициенты влияния первичных ошибок

Наименование ошибки	Обозначение ошибки	Коэффициент влияния	Выражение
Колебания передаточного отношения	$\Delta K_{\text{общ}}$	$k_{K_{\text{общ}}}$	$\frac{-CR^2 N}{K_{\text{общ}}^2 Eb^3}$
Колебания радиуса мембраны	ΔR	k_R	$\frac{2CRN}{K_{\text{общ}} Eb^3}$
Колебания измерительного усилия	ΔN	k_N	$\frac{CR^2}{K_{\text{общ}} Eb^3}$
Колебание толщины мембраны	Δb	k_b	$\frac{-3CR^2 N}{K_{\text{общ}} Eb^4}$

Пример расчета погрешности измерения

Расчет коэффициентов влияния k_i и составляющих погрешности измерения ΔZ_i проводится согласно выражений 4.13; 4.15; 4.17; 4.19; 4.21, значения параметров R , N , $K_{\text{общ}}$, E , b приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Среднее значение параметров преобразователя

№	Наименование параметра	Значение	Отклонение
1	Радиус мембраны R , мм	25	0,025
2	Общее передаточное отношение $K_{\text{общ}}$	2,5	0,10
3	Измерительное усилие N , Н	1,0	0,10
4	Толщина мембраны b , мм	0,3	0,005
5	Коэффициент C	0,25	–
6	Модуль упругости E , МПа	$2,1 \cdot 10^5$	–

С учетом исходных данных получим:

Коэффициент влияния колебания передаточного отношения

$$k_{K_{\text{общ}}} = \frac{-0,25 \cdot 25^2 \cdot 1,0}{2,5 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,5^3} = 0,0024 \text{ мм.}$$

Коэффициент влияния колебания радиуса мембраны

$$k_R = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 25 \cdot 1,0}{2,5 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,5^3} = 0,0019.$$

Коэффициент влияния колебания измерительного усилия

$$k_N = \frac{0,25 \cdot 25^2}{2,5 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,5^3} = 0,0024 \text{ мм/Н.}$$

Коэффициент влияния толщины мембраны

$$k_b = \frac{-3 \cdot 0,25 \cdot 25^2 \cdot 1,0}{2,5 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,3^4} = -0,11.$$

В таблице 4.3 представлены расчетные значения коэффициентов влияния k_i , первичных ошибок $\Delta K_{\text{общ}}$, ΔR , ΔN , Δb и составляющих погрешности $\Delta Z_i = k_i \cdot \Delta_i$.

Таблица 4.3 – Составляющие погрешности измерения

Обозначение составляющих погрешности ΔZ_i	Обозначение ошибки	Значение ошибки Δ_i	Коэффициент влияния k_i	Значение составляющих погрешности ΔZ_i , мм
$\Delta Z_{K_{\text{общ}}}$	$\Delta K_{\text{общ}}$	0,1	0,0024	0,00024
ΔZ_R	ΔR	0,025	0,0019	0,00004
ΔZ_N	ΔN	0,1	0,0024	0,00024
ΔZ_b	Δb	0,005	-0,11	0,00055

Значения составляющих погрешности измерения рассчитывались по формулам 4.14; 4.16; 4.18; 4.20; 4.22.

Если рассматривать составляющие погрешности измерения как случайные величины, то суммарная погрешность определится из выражения

$$\Delta Z_{\Sigma} = \pm \sqrt{\sum \Delta Z_i^2} = \pm \sqrt{\Delta Z_{\text{общ}}^2 + \Delta Z_R^2 + \Delta Z_N^2 + \Delta Z_b^2}.$$

С учетом полученных данных:

$$\Delta Z_{\Sigma} = \pm \sqrt{0,24^2 + 0,04^2 + 0,24^2 + 0,55^2} = 0,647 \text{ мкм.}$$

Таким образом суммарная погрешность измерения мембранного пневматического преобразователя составляет 0,647 мкм при принятых значениях конструктивных параметров.

Моделирование статических характеристик пневмоиндуктивного мембранного преобразователя дифференциального типа

Статическая характеристика комбинированного пневмоиндуктивного преобразователя образуется двумя характеристиками пневматического преобразователя $p = f(Z)$

$$p = \frac{H}{1 + \left(\frac{4d_2}{d_1^2} \right)^2 \cdot Z^2}, \quad (4.23)$$

и статической характеристикой мембранного преобразователя $X = f(p)$

$$X = \frac{pR^4}{AEb^3}, \quad (4.24)$$

где $A = \frac{16}{3(1-\mu)}$ – постоянный коэффициент.

Выражение (4.24) перепишем в виде

$$p = \frac{AEb^3}{R^4} \cdot X. \quad (4.25)$$

Подставим (4.25) в формулу (4.23) и получим:

$$\frac{AEb^3}{R^4} \cdot X = \frac{H}{1 + \left(\frac{4d_2}{d_1^2} \right)^2 \cdot Z^2}. \quad (4.26)$$

После преобразования зависимости $x = f(Z)$ примет вид

$$X = \frac{HR^4}{\left[1 + \left(\frac{4d_2}{d_1^2} \right)^2 \cdot Z^2 \right] \cdot AEb^3}. \quad (4.27)$$

Пневматические преобразователи широко используются для контроля геометрических параметров деталей как в приборах активного контроля в процессе обработки, так и в контрольно-сортировочных автоматах, поэтому моделирование статических характеристик преобразователей проводятся при различных значениях и сочетаниях конструктивных параметров (табл. 4.13).

Таблица 4.4 – Исходные данные для моделирования

№	Наименование параметра	Номинальное значение
1	Рабочее давление воздуха H , МПа	0,15
2	Диаметр измерительного сопла d_2 , мм	2,0
3	Диаметр входного сопла d_1 , мм	1,0
4	Радиус мембраны R , мм	25
5	Толщина мембраны b , мм	0,6
6	Зазор Z , мм	0...150
7	Коэффициент A	5,8

При моделировании характеристики $X = f(Z)$, значения постоянных параметров принимаются из табл. 4.4 (номинальное значение), а переменных из табл. 4.13.

Моделирование функции $X = f(Z)$ при $H = 0,1; 0,15; 0,2$ МПа

Для моделирования погрешности подставим в выражение (4.27) значения постоянных параметров

$$X = \frac{H \cdot 15^4}{\left[1 + \left(\frac{4 \cdot 2}{1^2} \right)^2 \cdot Z^2 \right] \cdot 5,8 \cdot 2,1 \cdot 0,6^3}. \quad (4.28)$$

Расчётные значения, полученные после подстановки H и Z , указанных в табл. 4.13, в формулу 4.28 заносятся в табл. 4.5, а также строятся графические зависимости $X = f(Z)$ (рис 4.7) для различных значений d_1 .

Таблица 4.5 – Значения $X = f(Z)$

Давление H , МПа	Зазор Z , мм								
	0	10	20	30	50	70	90	110	150
0,1									
0,15									
0,2									

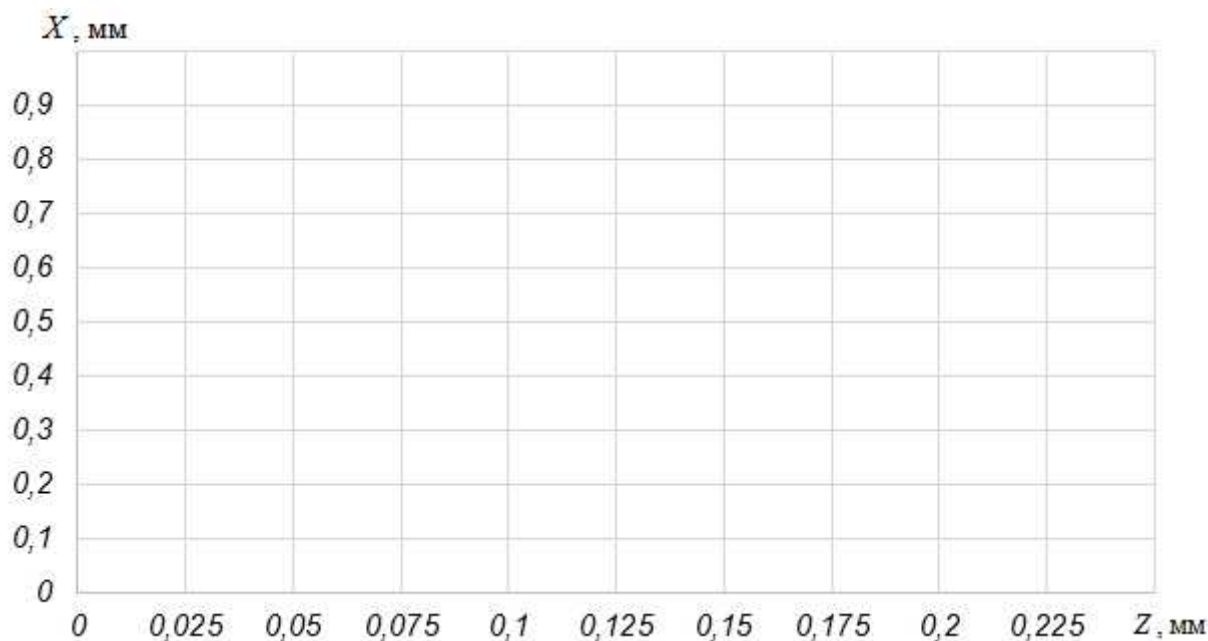


Рисунок 4.7 – Графическая зависимость $X = f(Z)$

Моделирование функции $X = f(Z)$ при $d_1 = 0,5; 0,7; 1,0; 1,2; 1,5$ мм

Для моделирования погрешности подставим в выражение (4.27) значения постоянных параметров

$$X = \frac{15 \cdot 15^4}{\left[1 + \left(\frac{4 \cdot 2}{d_1^2} \right)^2 \cdot Z^2 \right] \cdot 0,25 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,6^3}. \quad (4.29)$$

Расчётные значения X , полученные после подстановки d_1 и Z , указанных в табл. 4.13, в формулу 4.29 приведены в табл. 4.6, а на рис. 4.8 – графические зависимости $X = f(Z)$.

Таблица 4.6 – Значения $X = f(Z)$

Диаметр d_1 , мм	Зазор Z , мм								
	0	10	20	30	50	70	90	110	150
0,5									
0,7									
1,0									
1,2									
1,5									

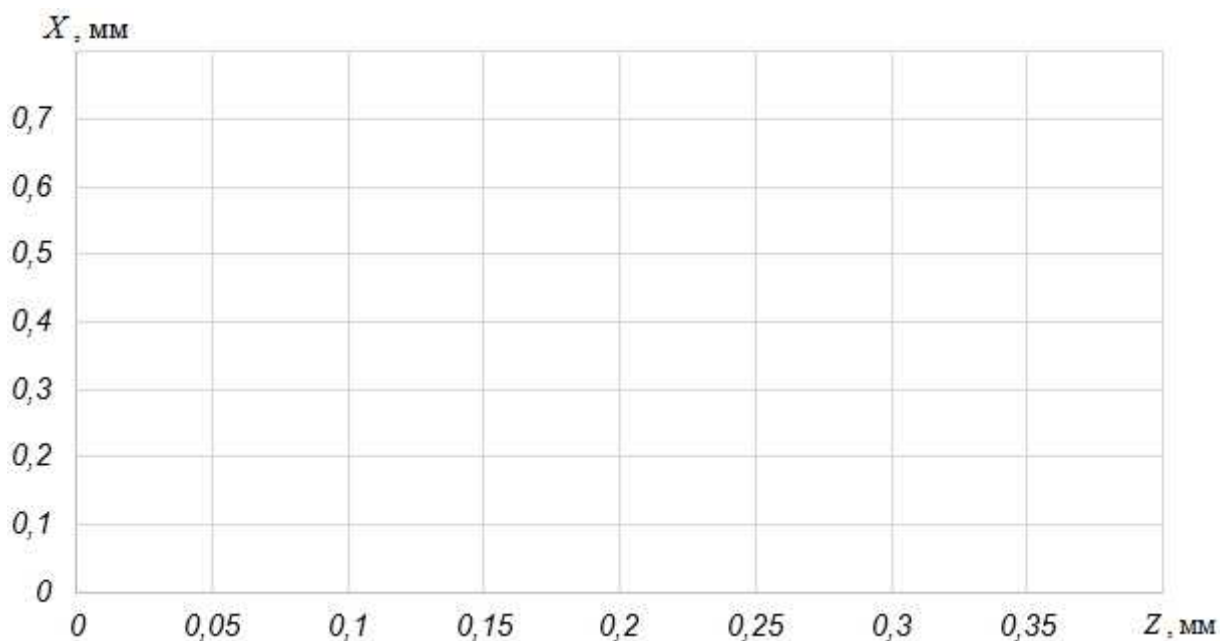


Рисунок 4.8 – Графическая зависимость $X = f(Z)$

Моделирование функции $X = f(Z)$ при $R = 10; 15; 20$ мм

Для моделирования погрешности подставим в выражение (4.27) значения постоянных параметров

$$X = \frac{0,15 \cdot R^4}{\left[1 + \left(\frac{4 \cdot 2}{1^2} \right)^2 \cdot Z^2 \right] \cdot 0,25 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,6^3}. \quad (4.30)$$

Расчётные значения X , полученные после подстановки R и Z , указанных в табл. 4.13, в формулу 4.30 приведены в табл. 4.7, а на рис. 4.9 – графические зависимости $X = f(Z)$.

Таблица 4.7 – Значения $X = f(Z)$

Радиус R , мм	Зазор Z , мкм								
	0	10	20	30	50	70	90	110	150
10									
15									
20									

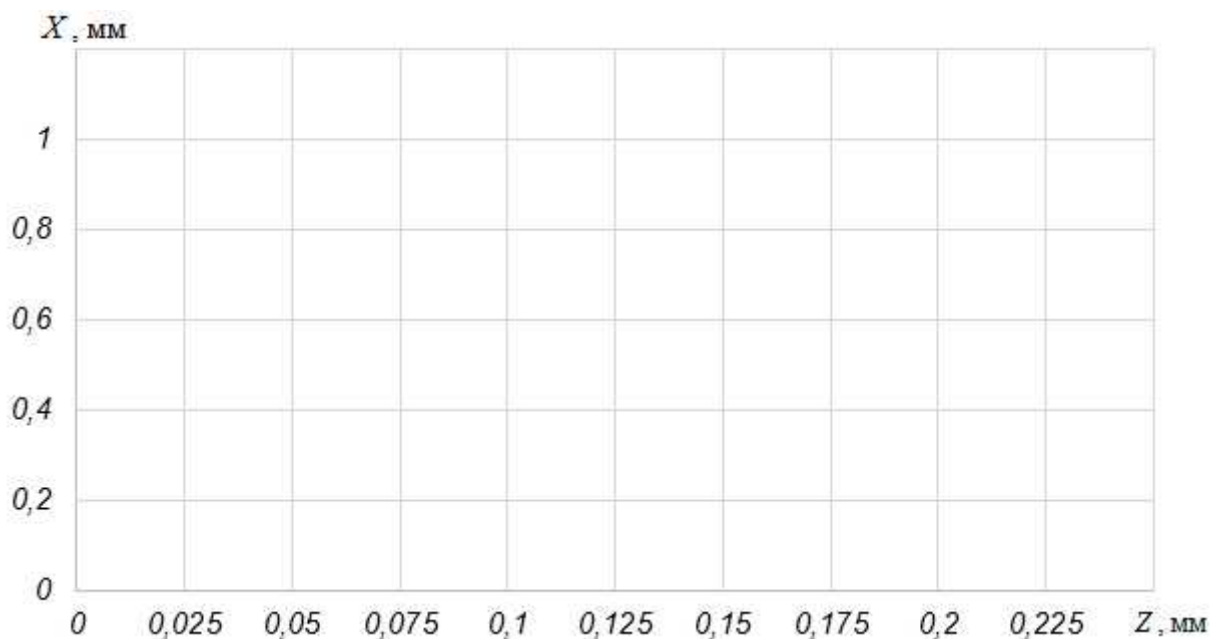


Рисунок 4.9 – Графическая зависимость $X = f(Z)$

Моделирование функции $X = f(Z)$ при $b = 0,55; 0,6; 0,65$ мм

Для моделирования погрешности подставим в выражение (4.27) значения постоянных параметров

$$X = \frac{0,15 \cdot 15^4}{\left[1 + \left(\frac{4 \cdot 2}{1^2} \right)^2 \cdot Z^2 \right] \cdot 0,25 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot b^3}. \quad (4.31)$$

Расчётные значения X , полученные после подстановки b и Z , указанных в табл. 4.13, в формулу 4.31 приведены в табл. 4.8, а на рис 4.10 – графические зависимости $X = f(Z)$

Таблица 4.8 – Значения $X = f(Z)$

Толщина b , мм	Зазор Z , мкм								
	0	10	20	30	50	70	90	110	150
0,55									
0,6									
0,65									

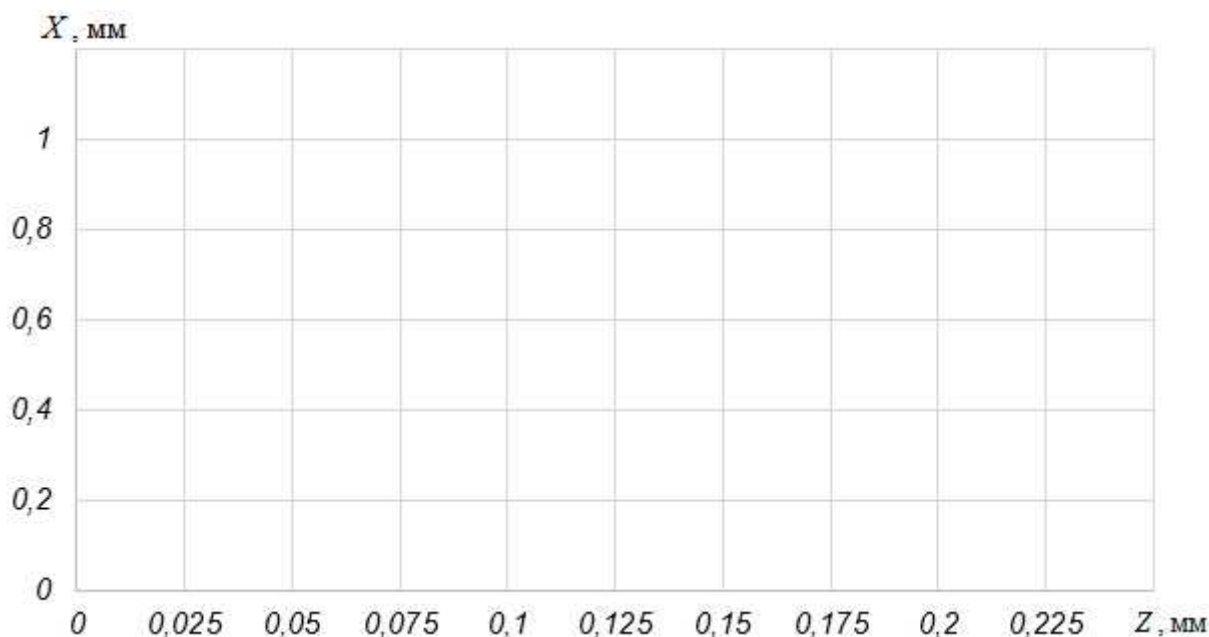


Рисунок 4.10 – Графическая зависимость $X = f(Z)$

Определение чувствительности и прямолинейных участков характеристики $X = f(Z)$

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 4.7-4.10 позволяет определить значение прямолинейных участков характеристик Δ_{zi} и чувствительности K_i пневматического мембранного преобразователя дифференциального типа при различных сочетаниях конструктивных параметров H , d_1 , R , b значения которых представлены в табл. 4.9 - 4.12.

Таблица 4.9 – Значения прямолинейных участков и чувствительности характеристик $X = f(Z)$

№	Параметр	Рабочее давление H , МПа		
		0,1	0,15	0,2
1	Диапазон измерения Δ , мм			
2	Чувствительность K			

Таблица 4.10 – Значения прямолинейных участков и чувствительности характеристик $X = f(Z)$

№	Параметр	Диаметр входного сопла d_1 , мм				
		0,5	0,7	1,0	1,2	1,5
1	Диапазон измерений Δ , мм					
2	Чувствительность K					

Таблица 4.11 – Значения прямолинейных участков и чувствительности характеристик $X = f(Z)$

№	Параметр	Радиус мембраны R , мм		
		10	15	20
1	Диапазон измерения D , мм			
2	Чувствительность K			

Таблица 4.12 – Значения прямолинейных участков и чувствительности характеристик $X = f(Z)$

№	Параметр	Толщина мембраны b , мм		
		0,55	0,6	0,65
1	Диапазон измерения D , мм			
2	Чувствительность K			

На рис. 4.11 - 4.14 показаны зависимости $D = f(H, d_1, R, b)$, а на рис. 4.15 - 4.18 – зависимости $K = f(H, d_1, R, b)$.

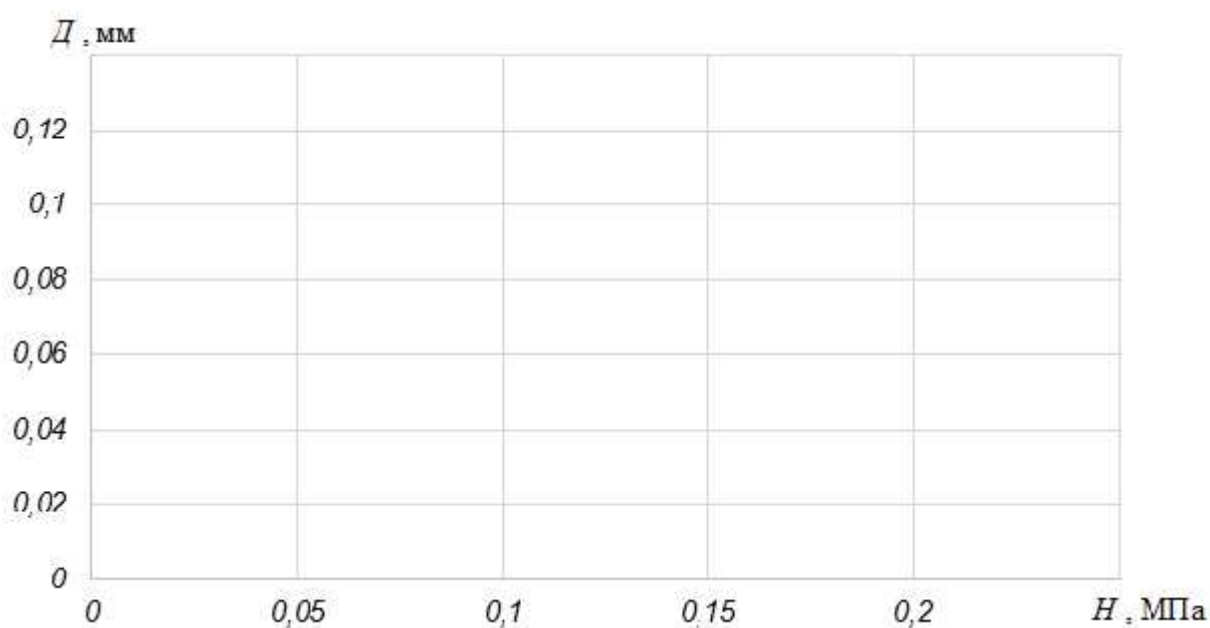


Рисунок 4.11 – Зависимость $D = f(H)$

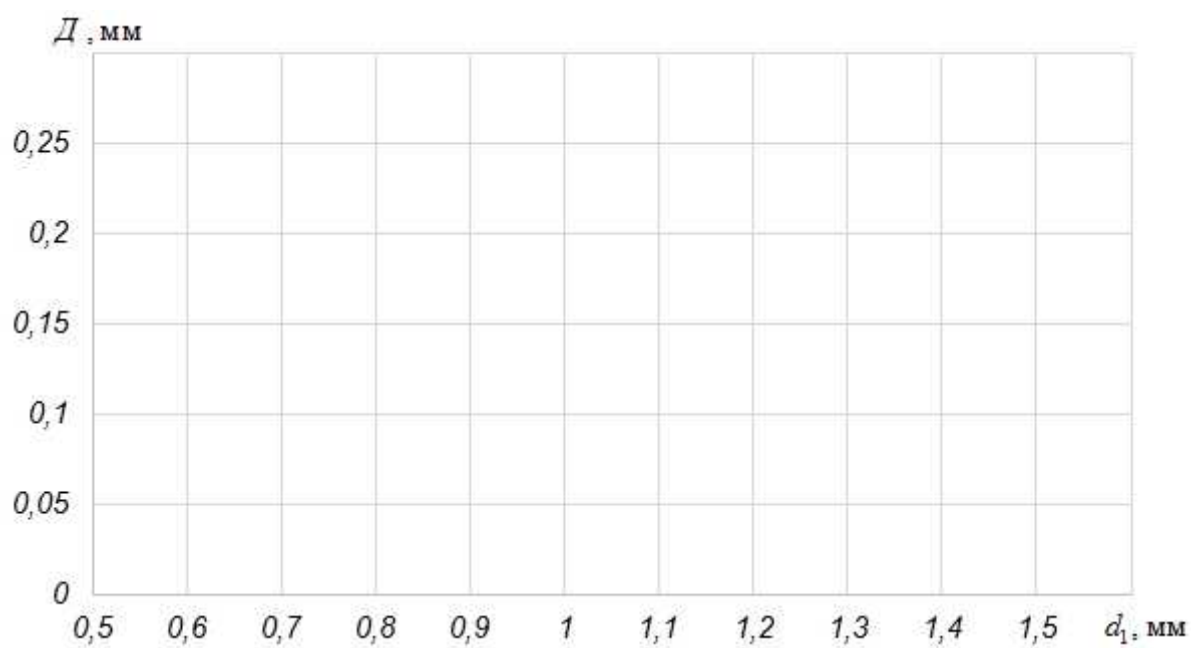


Рисунок 4.12 – Зависимость $D = f(d_1)$

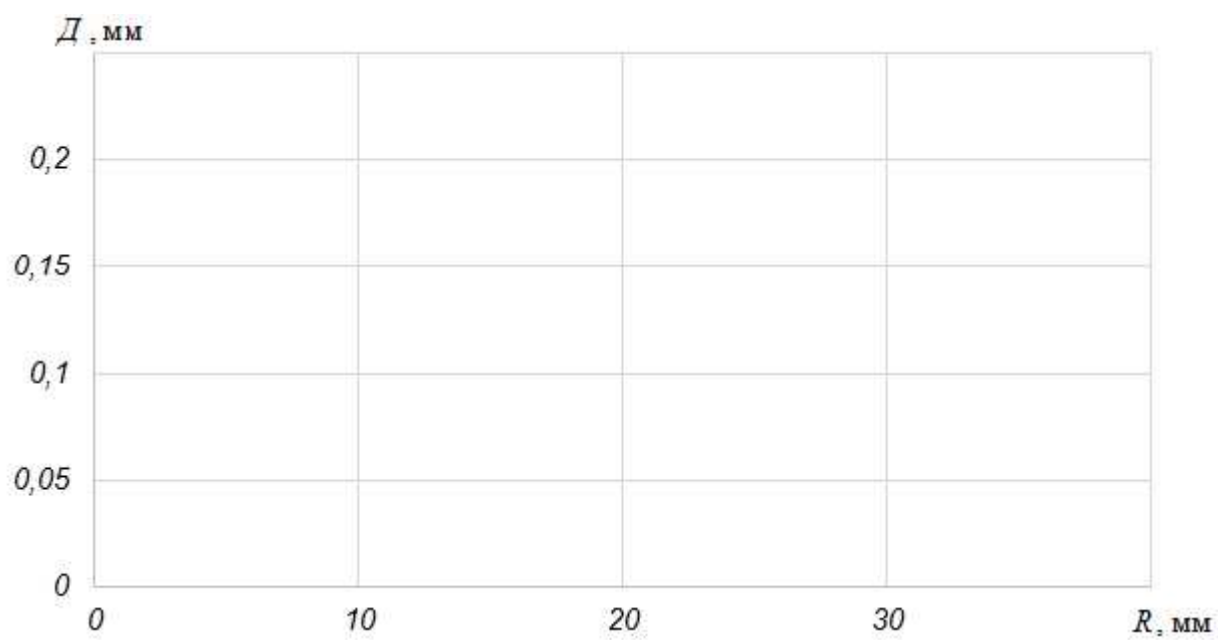


Рисунок 4.13 – Зависимость $D = f(R)$

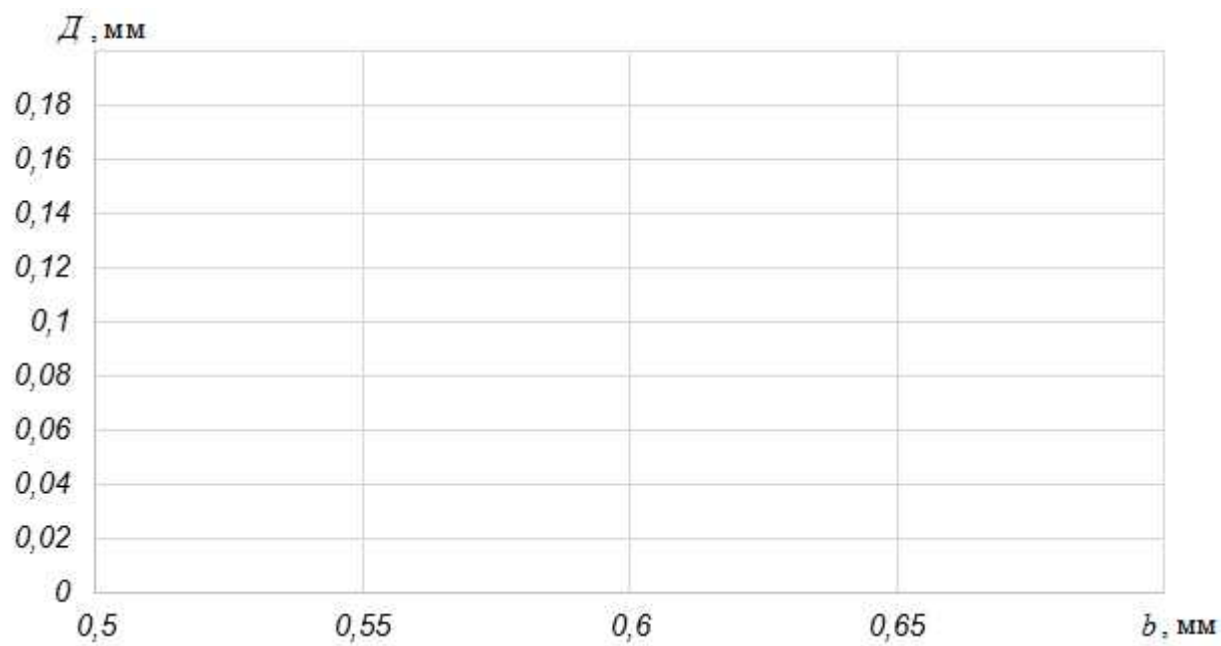


Рисунок 4.14 – Зависимость $D = f(b)$

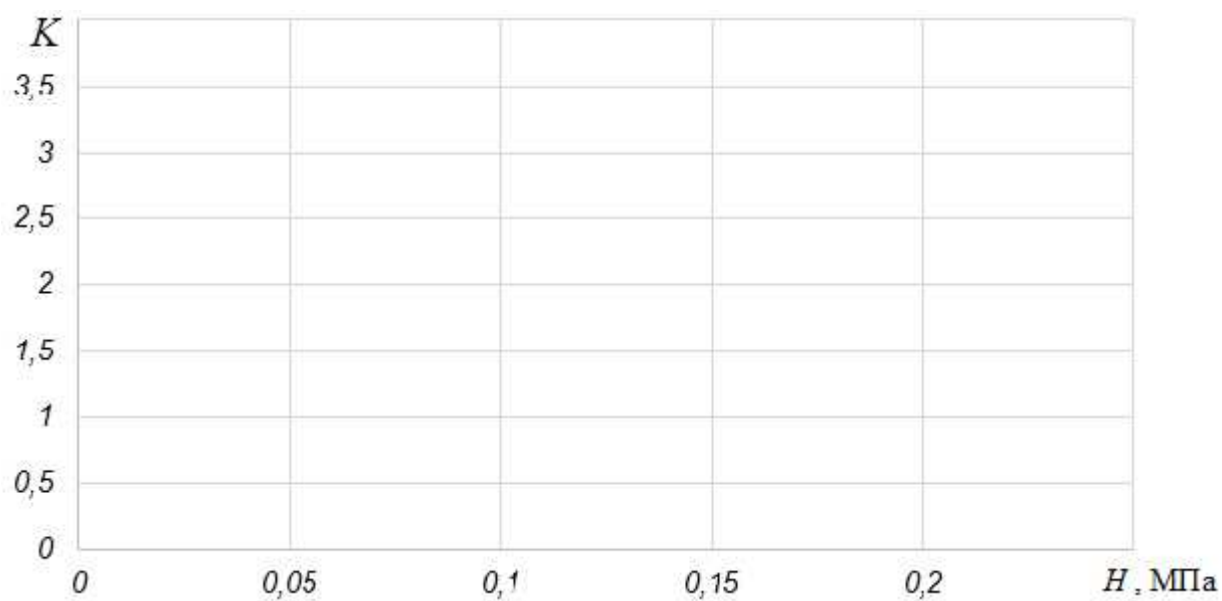


Рисунок 4.15 – Зависимость $K = f(H)$

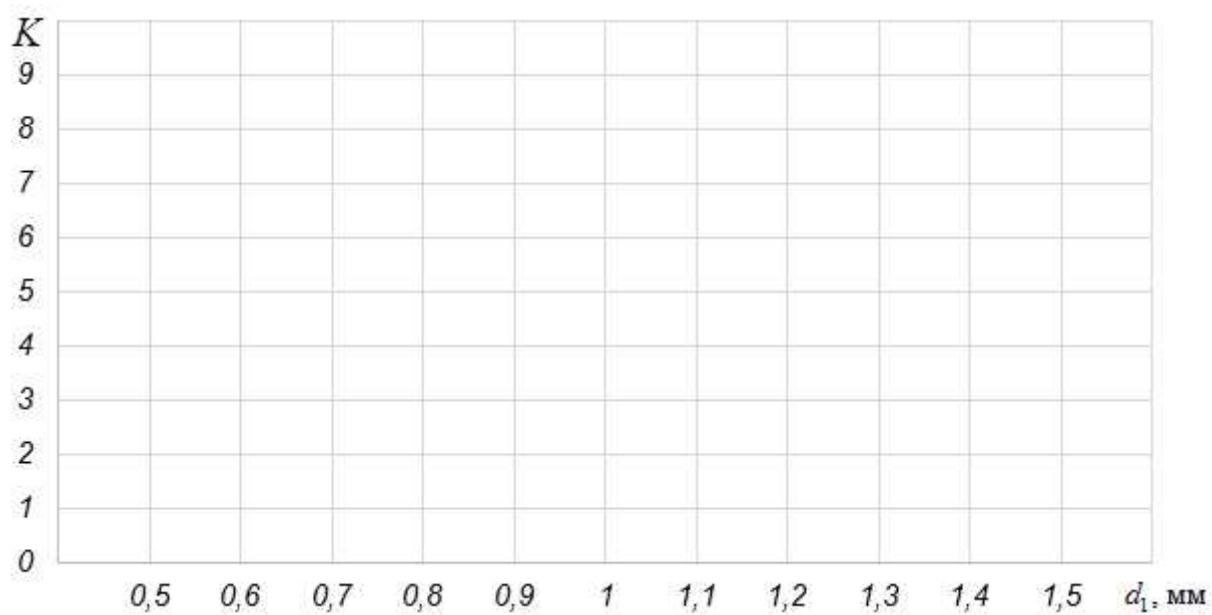


Рисунок 4.16 – Зависимость $K = f(d_1)$

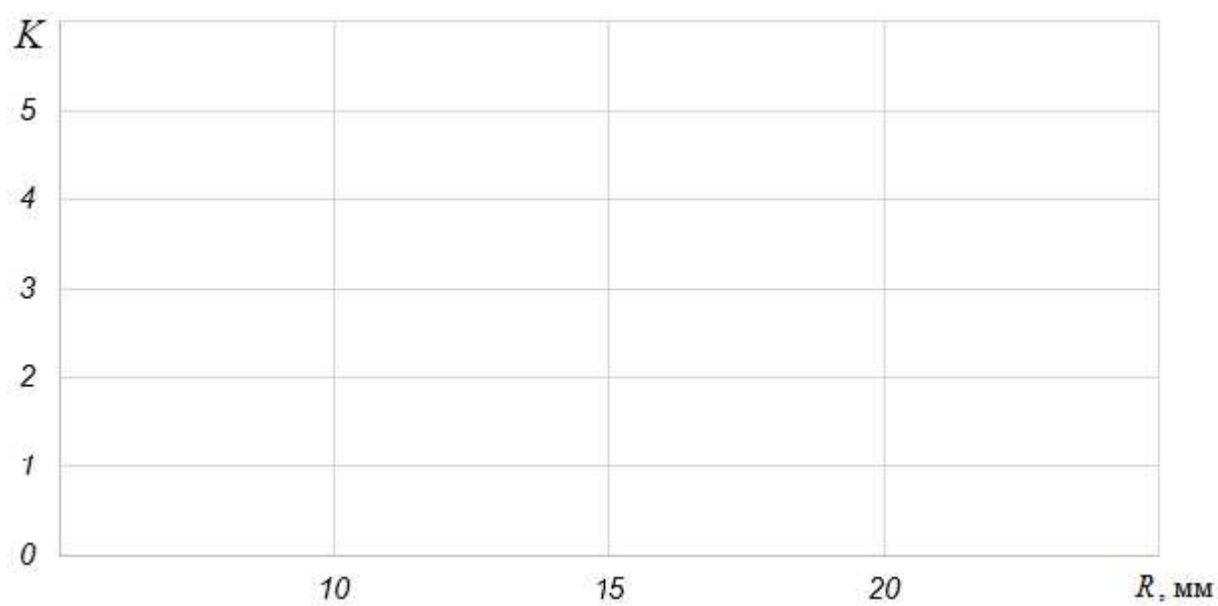


Рисунок 4.17 – Зависимость $K = f(R)$

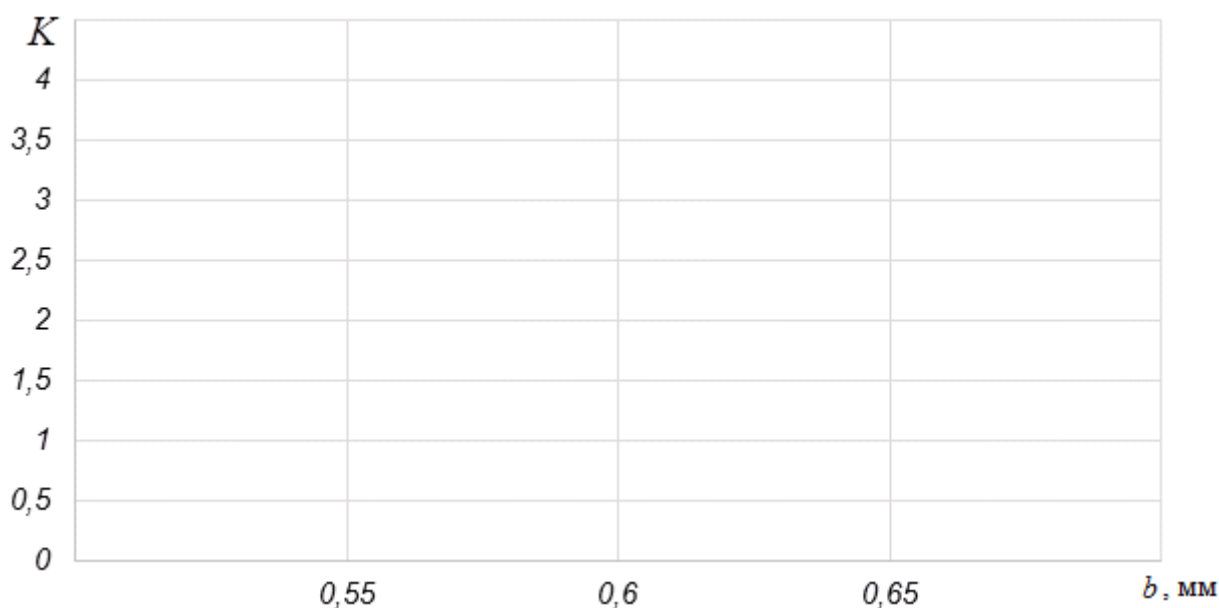


Рисунок 4.18 – Зависимость $K = f(b)$

4.3. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета погрешности мембранного пневмоиндуктивного преобразователя представлены в табл. 4.13.

4.4. Порядок выполнения работы

1. Изучить принцип действия и методики расчета погрешности мембранного пневмоиндуктивного преобразователя.

2. Рассчитать значение коэффициентов влияния первичных ошибок на величину погрешности мембранного пневмоиндуктивного преобразователя.

3. Рассчитать суммарную погрешность измерения ΔZ_{Σ} .

4. Провести расчет и моделирование статических характеристик $X = f(z)$ пневмоиндуктивного преобразователя для заданных исходных данных (рис. 4.7–4.10), (табл. 4.5–4.8).

5. Определить диапазон измерения и чувствительность по графикам статических характеристик $X = f(z)$ (рис. 4.11–4.18), (табл. 4.9–4.12).

4.5. Содержание отчета

1. Наименование и цель занятия.

2. Основные теоретические положения.

3. Таблица исходных данных для расчета.

4. Таблица расчетных данных (табл. 4.5–4.12).

5. Графики зависимости $X = f(z)$, $D = f(H; d_1; R; b)$, $K = f(H; d_1; R; b)$.

6. Выводы.

4.6. Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия пневматического прибора.
2. Поясните принцип действия сильфонных и мембранных преобразователей.
3. Изложите методику расчета погрешности комбинированного мембранного пневмоиндуктивного преобразователя.
4. Какие составляющие учитываются при расчете суммарной погрешности измерения комбинированного мембранного пневмоиндуктивного преобразователя.
5. Что такое коэффициент влияния и как его определить?.
6. При каких параметрах пневмоиндуктивного преобразователя обеспечивается большее значение диапазона измерения и чувствительности?

Таблица 4.13 – Исходные данные для расчета

Наименование параметров	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Рабочее давление воздуха H , Мпа	0,1; 0,15	0,15; 0,2	0,1; 0,2	0,1; 0,15	0,15; 0,2	0,1; 0,2	0,1; 0,15	0,15; 0,2	0,1; 0,2	0,1; 0,15
Диаметр измерительного сопла d_2 , мм	2									
Диаметр входного сопла d_1 , мм	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5	0,5	0,6
Толщина мембраны b , мм	0,55	0,6	0,65	0,65	0,55	0,6	0,6	0,65	0,55	0,6
Радиус мембраны R , мм	20	25	30	25	30	20	30	20	25	30
Зазор Z , мкм	0; 10; 20; 30; 50; 70; 90; 110; 150									

Примечание. Необходимые дополнительные параметры или изменения исходных данных согласовываются с преподавателем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пухаренко, Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация : учебное пособие для СПО / Ю. В. Пухаренко, В. А. Норин. — Санкт-Петербург : Лань, 2025. — 376 с. — ISBN 978-5-507-50279-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/446156> (дата обращения: 04.12.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Федотов, А. И. Метрология : учебник для вузов / А. И. Федотов, С. К. Лисин. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 168 с. — ISBN 978-5-507-49051-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/400997> (дата обращения: 04.12.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Эрастов, В. Е. Метрология, стандартизация и сертификация : учебное пособие / В. Е. Эрастов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : ИНФРА-М, 2023. — 196 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — URL: <https://znanium.com/catalog/product/1983263> (дата обращения: 04.12.2025). — Режим доступа: по подписке. — DOI 10.12737/23696. — ISBN 978-5-16-012324-0. — Текст : электронный.

4. Этингоф М. И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках / М. И. Этингоф. — М. : АПР, 2016. — 336 с.

5. Легаев В. П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении : учеб. пособие / В. П. Легаев — Владим. Гос. Ун-т. — Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. — 123 с.

6. Педь Е. И. Активный контроль в машиностроении/ Е. И. Педь. - М. : Машиностроение, 1991. — 359 с.

7. Волосов С. С. Приборы автоматического контроля в машиностроении / С. С. Волосов, Е. И. Педь. - М. : Машиностроение, 1970. — 310 с.

8. Цидулко В. М. Точность пневматического контроля линейных размеров. — М. : Изд-во стандартов, 1976, 156 с.

9. Высоцкий А. В. Пневматические измерения линейных размеров. - М.: Машгиз, 1963. — 268 с.

10. Высоцкий А. В. Пневматические средства измерений линейных величин в машиностроении / А. В. Высоцкий, А. П. Курочкин. — М.: Машиностроение, 1979. — 206 с.

11. Высоцкий А. В. Конструирование и наладка пневматических устройств для линейных измерений / А. В. Высоцкий, А. П. Курочкин. — М.: Машиностроение, 1972. — 156 с.

Учебное издание

**РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ**

*Учебно-методическое пособие
к выполнению практических занятий*

Составители: **Васютенко** Александр Павлович,
Балакина Наталья Анатольевна

В авторской редакции

Изд. № 219/2025. Объем 4 п. л. Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,92.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»