

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБКОВ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ БУРОВЫХ КОРОНОК

Ensuring the Required Accuracy of Cylindrical Inserts' Diameter Measurement Prior to Hammer Bits' Selective Assembly

Zapewnienie wymaganej dokładności pomiarów średnic walcowych wkładek dla montażu selekcyjnego wiertel górniczych

Плешаков Алексей Андреевич, Кристаль Марк Григорьевич

Аннотация: Для обеспечения погрешности измерений диаметров цилиндрических деталей на уровне $\pm 0,7$ мкм в измерительном диапазоне шириной не менее 220 мкм предложено устройство временного преобразования линейного размера в интервал времени, за который глухая измерительная камера опустошается в атмосферу через зазор между поверхностью измеряемой детали, базированной в призме, и срезом сопла, лежащим в плоскости, совпадающей с боковой поверхностью этой призмы. Также разработана расчетная модель для установления рациональных параметров устройств такого типа. Приведены результаты теоретического и экспериментального исследований, по результатам которых установлена целесообразность применения предложенного устройства для измерения диаметров цилиндрических зубков буровых коронок перед их селективной сборкой.

Ключевые слова: линейные измерения, измерение диаметра, пневматическое устройство, временное преобразование.

Abstract: A pneumo-electronic Temporal Conversion Device is proposed to ensure outer diameter measurement error within $\pm 0,7$ μm in the measurement range with the width of no less than 220 μm . The Device converts linear quantity into time interval, during which the measurement chamber containing the compressed air discharges into the atmosphere through the restrictor formed by the surface of the target part, located in the channel of a V-block, and the measuring nozzle exit section, contained by one of the channel's faces. Paper also covers a developed computational model to establish Device parameters rational values. The results of theoretical and experimental research, covered here, show the suitability of the proposed Device for gauging the cylindrical inserts' diameters prior to the hammer bits' selective assembly.

Key words: linear measurement, diameter measurement, pneumatic device, temporal conversion.

Streszczenie: W celu zapewnienia błędów pomiarów walcowych części na poziomie $\pm 0,7$ μm w przedziale pomiarowym do 220 mm, opracowano urządzenie bieżącego przekształcania wymiaru liniowego w przedział czasowy za którym pełna komora pomiarowa wypróżniana do atmosfery przez luz między powierzchnią mierzonej części (bazowanej w przyźmie) a ścięciem dyszy, leżącym w płaszczyźnie przylegającej do bocznej powierzchni tej przyźmy. Opracowano także model obliczeniowy w celu wyznaczenia parametrów urządzenia tego typu. Przytoczono wyniki teoretycznych i eksperymentalnych badań, na podstawie których wyznaczono celowość stosowania proponowanego urządzenia do pomiarów średniowalcowych słupków wiertel górniczych przed ich selektywnym montażem.

Słowa kluczowe: pomiar wymiarów liniowych, pomiary średnie, urządzenie pneumatyczne, bieżące przekształcenie

Введение

Технология изготовления буровых коронок предполагает запрессовку зубков с цилиндрическим хвостовиком в отверстия в ее корпусе. Качество коронки во многом определяется соблюдением требуемых натягов, поэтому используют метод групповой взаимозаменяемости: зубки и отверстия сортируют по величине диаметра. В частности, при производстве коронок типа КНШ (коронка неперетачиваемая штыревая) зубки диаметром D от 6 до 10 мм с допуском на диаметр 220 мкм сортируют в 44 размерные группы, из которых затем комплектуют пары для сборки,

точность которой зависит от точности измерения диаметра. Поэтому для повышения качества буровых коронок актуально снижение погрешности Δ измерений диаметра зубков, которая, в соответствии с [1], не должна превышать 1,4 мкм.

Поскольку при измерении в условиях производства возможны вибрационные, ударные воздействия и влияние электромагнитных полей, целесообразно применять пневматические средства измерений (СИ), нечувствительные к этим воздействиям [2] вследствие демпфирующих свойств сжатого воздуха. Однако ширина измерительного диапазона известных пневматических СИ при требуемом уровне погрешности

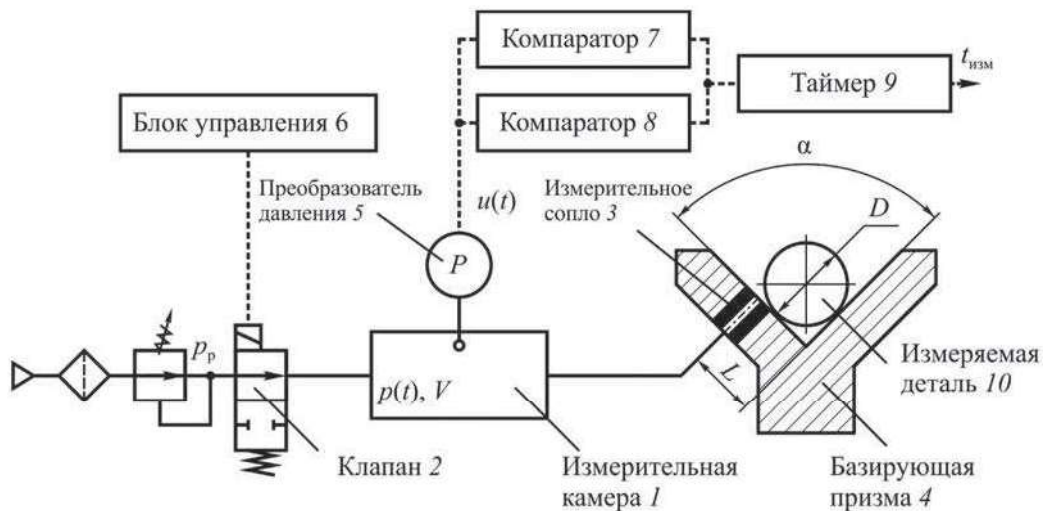


Рис. 1. Разработанное УВП
Fig. 1. The proposed Temporal Conversion Device

ограничена 200 мкм [3], чего не достаточно для сортировки зубков.

Целью работы является обеспечение требуемой погрешности $\pm 0,7$ мкм измерений диаметров зубков буровых коронок в измерительном диапазоне шириной 220 мкм. Для этого предложено [4] пневматическое устройство временного преобразования (УВП) линейного размера (рис. 1), осуществляющее оценку измеряемого диаметра D по интервалу времени $t_{изм}$ истечения сжатого воздуха из измерительной камеры (ИК) в атмосферу через измерительный зазор, образованный поверхностью измеряемого зубка, установленного в базирующей призме, и срезом измерительного сопла, лежащим в ее боковой поверхности. Для оценки влияния зависимости погрешности Δ измерений устройства такого типа от его параметров на этапе проектирования разработана математическая модель процесса временного преобразования, где учтен смешанный характер дросселирования потока сжатого воздуха в измерительном зазоре.

Устройство временного преобразования с расширенным измерительным диапазоном

В состав предложенного УВП входят измерительная камера 1, клапан 2, измерительное сопло 3, базирующая призма 4, пневмоэлектрический преобразователь (ПП) 5, блок 6 управления (БУ), компараторы 7 и 8, таймер 9. ИК 1 объемом V соединена с источником сжатого воздуха через канал клапана 2 и с атмосферой через измерительный зазор, образованный срезом измерительного сопла 3 диаметром d и поверхностью измеряемого зубка 10 диаметром D . Сопло 3 установлено в боковой поверхности призмы 4 так, что его срез лежит в плоскости этой поверхности, а его ось ей перпендикулярна. При этом сопло 3

смещено от вершины призмы на расстояние L и от линии касания рассматриваемой боковой поверхности призмы 4 с зубком 10 наибольшего в измерительном диапазоне диаметра $D_{макс}$ на расстояние l . БУ 6 формирует команды открытия и закрытия клапана 2. ИК 1 объединена с камерой ПП 4, который выполняет непрерывное преобразование величины давления $p(t)$ воздуха в ней в электрический сигнал $u(t)$. Этот сигнал поступает на входы компараторов 7 и 8, которые срабатывают при $u(t_B) = u_B \sim p_B$ и $u(t_H) = u_H \sim p_H$, соответственно. Компаратор 7 осуществляет запуск таймера 9, а компаратор 8 – его останов.

Измерение осуществляется следующим образом. В начале измерительного цикла клапан 2 открыт, и сжатый воздух с рабочим давлением p_p поступает от стабилизированного источника в ИК 1 и истекает в атмосферу через измерительный зазор, образованный срезом измерительного сопла 3 и поверхностью измеряемого зубка 10.

В момент времени p_0 БУ 6 закрывает клапан 2, в результате чего ИК 1 отключается от источника сжатого воздуха. Воздух с давлением $p(t_0) = p_p$, оставшийся в ИК 1, продолжает истекать в атмосферу через измерительный зазор. В момент времени t_B давление $p(t)$ воздуха в ИК 1 уменьшается до верхней границы p_B интервала $[p_H; p_B]$, в результате чего срабатывает компаратор 7, запускающий таймер 9. Затем в момент времени t_H давление $p(t)$ уменьшается до нижней границы p_H интервала $[p_H; p_B]$. При этом срабатывает компаратор 8, останавливая таймер 9.

Так таймер 9 измеряет время $t_{изм} = (t_H - t_B)$, в течение которого давление $p(t)$ воздуха в ИК 1 изменялось в границах установленного интервала $[p_H; p_B]$. Величина $t_{изм}$ пропорциональна измеряемому диаметру D и используется для его получения его оценки \hat{D} в соответствии с заданной функцией $\hat{D} = f(t_{изм})$ преобразования.

Математическая модель процесса временного преобразования

Для оценки влияния параметров УВП на погрешность Δ измерений с целью установления их рационального с точки зрения обеспечения требуемой погрешности Δ в заданном измерительном диапазоне сочетания разработана расчетная модель процесса временного преобразования, в состав которой входят математическое описание опустошения ИК в атмосферу и механизм формирования величины Δ .

При разработке модели приняты допущения о мгновенном отключении ИК от источника сжатого воздуха (так как погрешность, возникающая вследствие случайного характера длительности закрытия клапана, в данном случае незначима), а также о равенстве единице коэффициента $\varepsilon = 1$ расхода воздуха и турбулентном характере дросселирования потока сжатого воздуха в измерительном зазоре (с учетом дальнейшего уточнения модели на основе опытных данных).

Для описания изменения во времени t давления $p(t)$ воздуха в ИК при ее опустошении использовано уравнение [5]:

$$\frac{V}{R_B T} \frac{dp(t)}{dt} = -M, \quad (1)$$

где

R_B – газовая постоянная для воздуха;

T – температура воздуха в ИК;

M – массовый расход воздуха через измерительный зазор.

Для вычисления расхода M воздуха использована известная из газовой динамики [5] система уравнений, описывающая истечение воздуха в надкритическом и докритическом режимах в зависимости от соотношения давлений $p(t)$ в ИК и критического $p_{кр}$:

$$M = \begin{cases} \varepsilon F_3 p(t) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k-1} \sqrt{\frac{2k}{(k+1)R_B T}}, & \text{при } p(t) > p_{кр}, \\ \varepsilon F_3 p_a^{k-1} [p(t)]^{(k-1)k-1} \sqrt{\frac{2k}{(k-1)R_B T} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p(t)}\right)^{(k-1)k-1}\right]}, & \text{при } p(t) < p_{кр}, \end{cases} \quad (2)$$

где k – показатель адиабаты. Критическое давление $p_{кр}$ определяется как

$$p_{кр} = p_a (2/[k+1])^{-k(k-1)^{-1}}.$$

Площадь F измерительного зазора, пропорциональная измеряемому диаметру D , вычислялась в соответствии со схемой на рис. 2 как $F = \int_0^{2\pi} (d/2)h d\theta$, где

$$h = \sqrt{\left[L - \left(\frac{D}{2}\right) / \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \left(\frac{d}{2}\right) \cos \theta \right]^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} - \left(\frac{D}{2}\right).$$

Для оценки результата $t_{изм}$ временного преобразования уравнение (1) решалось с граничными условиями $p(t_B) = p_B$ и $p(t_H) = p_H$, откуда вычислялись значения t_B и t_H и, затем, результат $t_{изм} = (t_H - t_B)$ временного преобразования. По нескольким значениям D , принадлежащих заданному измерительному диапазону, получены статические характеристики $t_{изм} = f(D)$ и обратные им функции $\dot{D} = f(t_{изм})$ преобразования для различных сочетаний параметров УВП.

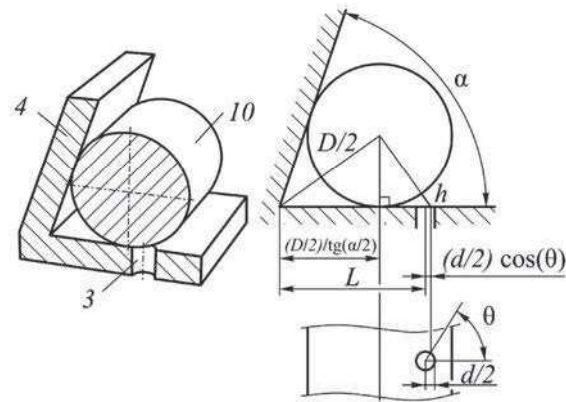


Рис. 2. Базирование измеряемого зубка в призме
Fig. 2. Basing the target TCI in the v-Block

Основным источником погрешности Δ УВП предложенного типа является случайная ошибка Δ_u преобразования величины давления $p(t)$ в электрический сигнал $u(t)$. Наличие этой ошибки приводит к тому, что сигнал $u(t)$ может принимать граничные значения $u_B \sim p_B$ и $u_H \sim p_H$ раньше или позже достижения действительных равенств $p(t_B) = p_B$ и $p(t_H) = p_H$. Вследствие этого компараторы 7 и 8 могут сработать как раньше, так и позже моментов t_B и t_H , что обуславливает наличие погрешности Δ_t временного преобразования. Решая (1) при $p(t_B^-) = (p_B - \Delta_u)$, $p(t_B^+) = (p_B + \Delta_u)$, $p(t_H^-) = (p_H - \Delta_u)$ и $p(t_H^+) = (p_H + \Delta_u)$, получены значения t_B^- , t_B^+ , t_H^- и t_H^+ – наименьшие и наибольшие возможные значения величин t_B и t_H (рис. 3). Предельная погрешность Δ_t временного преобразования оценена как $\Delta_t = (t_H^+ - t_B^+) - (t_H^- - t_B^-)$. Далее погрешность Δ измерений оценивается как $\Delta = \hat{D}(t_H^+ - t_B^-) - \hat{D}(t_H^- - t_B^+)$ в соответствии с функцией $\hat{D} = f(t_{изм})$ преобразования.

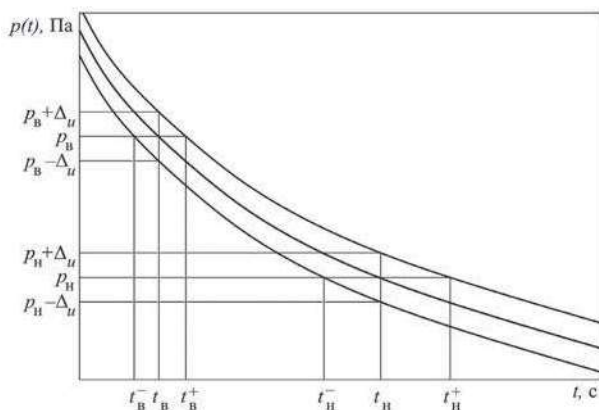


Рис. 3. Схема для расчета погрешности измерений
Fig. 3. Computation of the measurement error

Теоретическое исследование на основе разработанной модели позволило сделать выводы:

- погрешность Δ измерений УВП обратно пропорциональна чувствительности его чувствительности ξ и прямо пропорциональна погрешности Δ_t временного преобразования, которая, в свою очередь, имеет меньшие значения при большей скорости изменения давления $p(t)$ в ИК;
- изменение параметров УВП с целью повышения ξ часто приводит к повышению Δ_t , и наоборот;
- каждому сочетанию угла α при вершине базирующей призмы и диаметра d измерительного сопла соответствует рациональное значения l_p смещения l измерительного сопла от линии касания боковой поверхности призмы и измерительной детали наибольшего диаметра D_{\max} в рассматриваемом измерительном диапазоне, которое позволяет обеспечить наибольшую чувстви-

тельность ξ УВП и вычисляется из соотношения $F_{3\max} = 0,4 F_c$;

- уменьшение угла α при вершине базирующей призмы, диаметра d измерительного сопла приводит к снижению погрешности Δ измерений за счет повышения чувствительности ξ УВП;
- уменьшение объема V ИК до рационального значения V_p приводит к снижению погрешности Δ измерений за счет повышения чувствительности ξ УВП, а дальнейшее увеличение V приводит к повышению погрешности Δ измерений вследствие возрастания погрешности Δ_t временного преобразования;
- повышение верхней границы p_B интервала $[p_H; p_B]$ изменения давления в ИК в процессе временного преобразования способствует снижению погрешности Δ измерений за счет одновременно повышения чувствительности ξ УВП и снижения погрешности Δ_t временного преобразования;
- повышение нижней границы p_H интервала $[p_H; p_B]$ до рационального значения p_{HP} приводит к снижению погрешности Δ измерений за счет существенного снижения погрешности Δ_t временного преобразования, а при дальнейшем повышении p_H величина Δ возрастает вследствие уменьшения чувствительности ξ УВП;

Установлено рациональное сочетание параметров, позволяющее обеспечить требуемую погрешность Δ измерений в заданном измерительном диапазоне: смещение L_p измерительного сопла из отношения $F_{3\max} = 0,4 F_c$; $\alpha = 30^\circ \dots 45^\circ$; $d = 1$ мм; $V = 15 \dots 20$ см³; $p_p = 240$ кПа; $p_H = 110 \dots 120$ кПа.

Поток воздуха в измерительном зазоре движется в непосредственной близости к поверхностям измеряемого зубка и базирующей призмы, поэтому выдвинуто предположение о смешанном характере дросселирования воздуха в измерительном зазоре. Часть потока прилипает к этим поверхностям и движется в ламинарном режиме, в результате чего возрастают скорость движения потока и расход M . Другая часть потока истекает в атмосферу в турбулентном режиме. Так как при разработке математической модели принято допущение о турбулентном характере дросселирования воздуха в измерительном зазоре, для ее уточнения в выражение (2), описывающее расход M воздуха через турбулентный дроссель, введен поправочный функционал $\psi(h)$, зависящий от величины h , характеризующей относительное расположение измерительного сопла и зубка.

Экспериментальное исследование предложенного устройства временного преобразования

Для оценки работоспособности рассматриваемого УВП, вычисления поправочного функционала $\psi(h)$ и установления погрешности Δ измерений при рациональном сочетании параметров УВП, установленных в ходе теоретического исследования, изготовлен

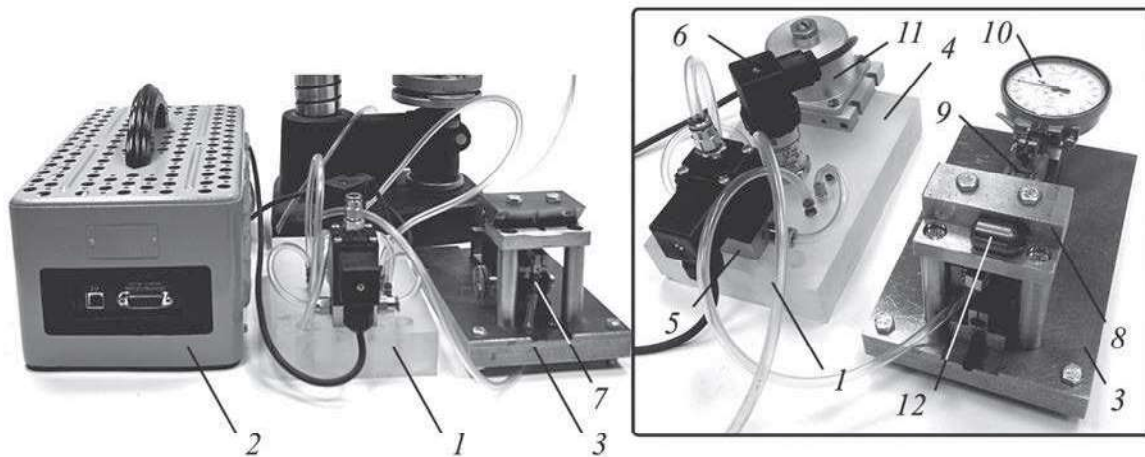


Рис. 4. Опытный образец УВП: 1 – модуль временного преобразования, 2 – электронный модуль, 3 – измерительная оснастка, 4 – пневматическая монтажная плата, 5 – клапан, 6 – ПП, 7 – измерительное сопло, 8 – базировочная призма, 9 – механизм микроперемещений, 10 – индикаторная головка, 11 – камера переменного объема, 12 – измеряемый зубок
 Fig. 4. Experimental unit: 1 – Temporal Conversion Module, 2 – electronic module, 3 – gauge, 4 – pneumatic plate, 5 – valve, 6 – pressure transducer, 7 – nozzle, 8 – basing V-Block, 9 – microdisplacement mechanism, 10 – dual gage, 11 – variable volume chamber, 12 – target TCI

опытный образец (рис. 4). Его конструкция обеспечивает варьирование уровней основных конструктивных параметров: угла α при вершине, диаметра d и смещения l измерительного сопла, объема V ИК. Изготовлено два набора цилиндрических эталонов для оценки погрешности Δ УВП в измерительных диапазонах $D = 6,00 \dots 6,22$ мм и $D = 10,00 \dots 10,22$ мм. Функции БУ, компараторов и таймера выполняет ЭВМ со специально разработанным программным обеспечением [6], получающая сигнал $u(t)$ ПП, преобразованный в цифровую форму блоком АЦП. Программное

обеспечение [9] позволяет варьировать уровни величин p_B и p_H . Для стабилизации уровня рабочего давления p_p устройство оснащено блоком фильтра со стабилизатором ФСВ6-1/6-337.

В ходе экспериментального исследования для различных сочетаний вышеуказанных параметров УВП получены интервальные оценки $\pm 3\sigma$ погрешности Δ измерений на основе выборок по 400 результатов \hat{D} .

Полученные опытные данные подтверждают выводы теоретического исследования, а также позволяют

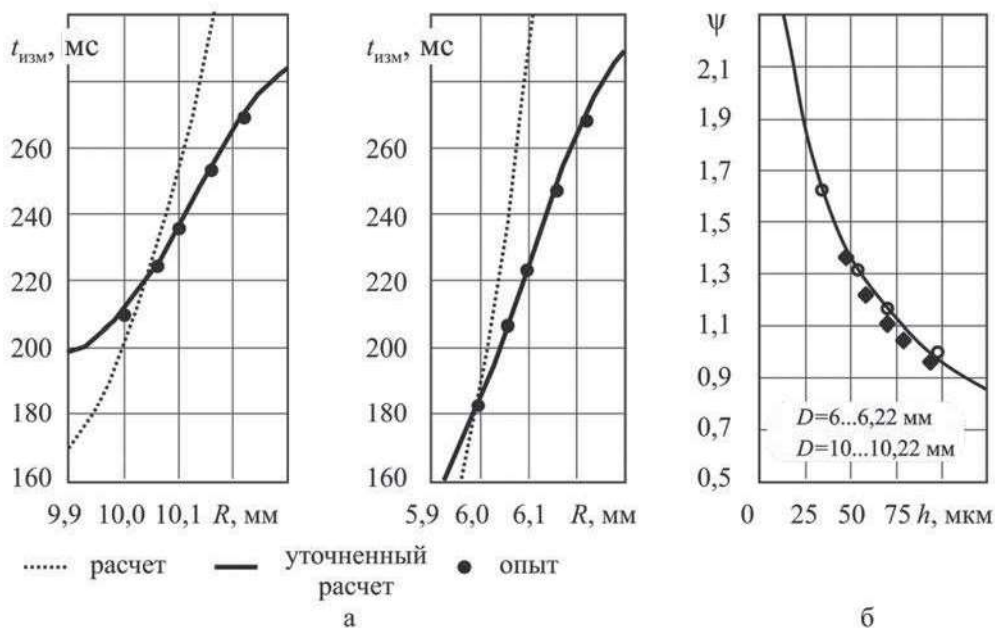


Рис. 5. Статические характеристики (а) УВП и поправочный функционал (б)
 Fig. 5. Calibration curves (a) of the device and the correction function (b)

количественно оценить зависимости погрешности Δ измерений от параметров УВП и уточнить рациональные значения некоторых из них: $V = 16,6 \text{ см}^3$; $p_H = 110 \text{ кПа}$; $p_P = 230 \text{ кПа}$. Экспериментально установлено, что установленное в ходе теоретического исследования и уточненное опытным путем рациональное сочетание параметров УВП позволяет обеспечить погрешность Δ измерений не более $\pm 0,27 \text{ мкм}$ в измерительном диапазоне $D = 6,00 \dots 6,22 \text{ мм}$ и $\pm 0,45 \text{ мкм}$ в диапазоне $D = 10,00 \dots 10,22 \text{ мм}$, что делает целесообразным использование предложенного УВП в составе автоматических устройств для сортировки цилиндрических зубков по величине диаметра перед селективной сборкой буровых коронок.

Сравнение опытных статических характеристик с расчетными (рис. 5а) показывает, что в действительности ИК опустошается быстрее, что свидетельствует о том, что фактический расход M воздуха через измерительное сопло превышает расчетные значения. Таким образом, на основании экспериментальных данных сделан вывод об адекватности предположения о смешанном характере дросселирования потока сжатого воздуха в измерительном зазоре и о том, что расход M воздуха при таком истечении выше, чем при истечении через турбулентный дроссель.

Поправочный функционал $\psi(h)$ вычислен как отношение $t_{\text{изм}}^T / t_{\text{изм}}^{\text{Э}}$ теоретической оценки $t_{\text{изм}}^T$ результата $t_{\text{изм}}$ временного преобразования диаметра D , полученной с использованием разработанной модели, и соответствующего опытного значения $t_{\text{изм}}^{\text{Э}}$. Отношения $t_{\text{изм}}^T / t_{\text{изм}}^{\text{Э}}$ вычислены в измерительных диапазонах $D = 6,00 \dots 6,22 \text{ мм}$ и $D = 10,00 \dots 10,22 \text{ мм}$ и аппроксимированы (рис. 5б) функцией вида $\psi(h) = ah^b$, где $a = 7,418$ и $b = 0,451$ – коэффициенты регрессии. Статические характеристики по уточненной таким образом модели (рис. 5а) принадлежат к вычисленным при доверительной вероятности $p = 0,95$ доверительным интервалам опытных значений $t_{\text{изм}}$. Теоретические оценки $\pm 0,493 \text{ мкм}$ и $\pm 0,563 \text{ мкм}$ погрешности Δ на основе уточненной модели процесса временного преобразования несколько превышают опытные значения $\pm 0,27 \text{ мкм}$ и $\pm 0,45 \text{ мкм}$, что идет в запас расчета. На этих основаниях сделан вывод о том, что уточненная математическая модель адекватно описывает процесс временного преобразования и может быть использована для количественной оценки погрешности Δ измерений УВП.

Заключение

Экспериментально подтверждено, что предложенное УВП обеспечивает погрешность Δ измерений не более $\pm 0,27 \text{ мкм}$ в измерительном диапазоне $D = 6,00 \dots 6,22 \text{ мм}$ и $\pm 0,45 \text{ мкм}$ в диапазоне $D = 10,00 \dots 10,22 \text{ мм}$, что обуславливает целесообразность использования его в составе автоматических устройств для сортировки цилиндрических зубков по величине диаметра перед селективной сборкой

буровых коронок, а также для измерения диаметров цилиндрических деталей в других областях промышленности.

Разработанная и уточненная математическая модель процесса временного преобразования, в которой учтен смешанный характер дросселирования воздуха в измерительном зазоре, позволяет на этапе проектирования оценить влияние параметров УВП на погрешность Δ измерений и установить рациональное сочетание параметров для ее минимизации в заданном измерительном диапазоне.

Список источников

- [1] ГОСТ 8.051–81. ГСИ. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм.
- [2] Jermak Cz. J., Rucki M. Air Gauging: Still Some Room for Development // AASCIT Communications. 2015. V. 2, N. 2. P. 29–34.
- [3] Rucki M., Barisik B., Varga G. Air gauges as a part of the dimensional inspection systems // Measurement. 2010. N. 43. P. 83–91.
- [4] Пневмоэлектронное устройство для контроля и сортировки деталей по линейным размерам / А. А. Плешаков, А. Ю. Горелова, М. Г. Кристаль. Патент на полезную модель RUS 154374 МПК G01B13/00 – ВолгГТУ 20.08.2015.
- [5] Залманзон Л. А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М.: Изд-во академии наук СССР, 1961. 250 с.
- [6] Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2014616406 (РФ). Программа управления устройством для сортировки деталей на группы по линейным размерам / Плешаков А. А., Чан К. Т., Горелова А. Ю. Измайлов А. Д., Кристаль М. Г. – 2014.

Плешаков Алексей Андреевич, аспирант каф. АПП, akrense@yandex.ru, Россия, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28, Волгоградский государственный технический университет

Кристаль Марк Григорьевич, д-р техн. наук, проф. каф. АПП, crysmar@mail.ru, Россия, 400005 Волгоград пр. им. Ленина 28 Волгоград, Волгоградский государственный технический университет