Прикладні аспекти: кваліметрія

УДК 612.215.4:616-71:616-073.178

А.Л. Ерохин[1], И.П. Захаров[1], И.В. Прасол[1], А.С. Нечипоренко[1], О.Г. Гарюк[2]

[1] *Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*
[2] *Харьковская медицинская академия последипломного образования, Харьков*

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПЕРЕДНЕЙ АКТИВНОЙ РИНОМАНОМЕТРИИ

Рассмотрены вопросы диагностики функции носового дыхания с помощью метода передней активной риноманометрии. Проанализированы схемы измерения дифференциального давления. Проведен расчет неопределенности данных риноманометрических измерений.

Ключевые слова: *передняя активная риноманометрия, дифференциальное давление, объективная оценка, неопределенность измерений.*

Введение

По данным медицинской статистики, около 10% населения Украины страдают затруднением дыхания. Причиной затрудненного дыхания могут быть как острые, так и хронические воспалительные заболевания носа и околоносовых пазух, вазомоторный, аллергический и полипозный риниты, различные опухолевые процессы в полости носа, посттравматические искривления носовой перегородки.

Для объективной диагностики таких нарушений в основном используются методы томографии (КТ и МРТ), исследования носового воздушного потока (ПАРМ, ЗАРМ, ПР, ринорезистометрия и др.) и акустическая риноманометрия [1]. Выделяют два основных метода риноманометрического исследования: активный и пассивный. Активная риноманометрия, с физиологической точки зрения, является наиболее адекватным способом получения данных в виде соотношения между расходом воздушного потока через носовую полость и внутриносовым дифференциальным давлением. В зависимости от того, на каком участке движения воздушного потока регистрируется дифференциальное давление, различают активную переднюю и заднюю риноманометрию [2, 3]. Среди методов объективной оценки носового дыхания активная риноманометрия является основным и наиболее клинически значимым методом диагностики. В соответствии с рекомендациями международного комитета по объективной оценке носового дыхания (ISOANA), передняя активная риноманометрия - основной общепринятый метод объективного исследования носового воздушного потока [4].

Однако 23 % пациентов с проблемой затрудненного дыхания оценивают результаты диагностики как неудовлетворительные. С одной стороны это обусловлено недостаточной эффективностью дифференциальной диагностики, поскольку результаты риноманометрических измерений зависят от расы [5], возраста, пола, индекса массы тела, и роста [6]. Другая сторона проблемы – техническое обеспечение измерений, неопределенность которых также влияют на достоверность принятия решения.

Целью статьи является оценка неопределенности измерения дифференциального давления при проведении передней активной риноманометрии.

Физические основы измерения дифференциального давления

Измеряемые величины при проведении риноманометрического исследования по методу ПАР – это дифференциальное давление между хоаной и подмасочным пространством и расход воздушного потока. Измеряемые параметры регистрируются синхронно. Измерение давления в носоглотке осуществляется в одной обтурированной половине носа. Эта половина исключается из акта дыхания. Поэтому измерение проводится для каждой половины носа отдельно, исследуются вдох и выдох. Структурная схема риноманометра приведена на (рис. 1).

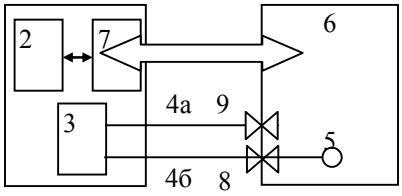

Рис. 1. Структурная схема риноманометра

© А.Л. Ерохин, И.П. Захаров, И.В. Прасол, А.С. Нечипоренко, О.Г. Гарюк

Она включает в себя: измерительный модуль (1), состоящий из расходомера (2) и датчика дифференциального давления (3) с фильтром (7) и маску (6), связанную с измерительным модулем соединительными шлангами (4, а, б). На маске имеется гермоввод (8) и точка забора подмасочного давления (9), а под маской − фиксирующий элемент для гибкого трубопровода (5).

В разных литературных источниках измерение дифференциального давления производится поразному. Например в [7] это измерение между обтурированной половиной носа и фильтром, в [8] измерение между обтурированной половиной носа и трубкой или датчиком измерения расхода воздушного потока. Согласно нашим исследованиям, при таких измерениях возникают дополнительные потери за счет присутствия динамической составляющей давления на участке измерения. Такую динамическую составляющую можно учесть только при помощи использования дополнительных устройств калибровки.

В данной работе предлагается, используя основные принципы гидромеханики, осуществлять измерение дифференциального давления Δp между носоглоткой и подмасочным пространством, а именно в зоне над спинкой носа, где скорость воздушного потока равна нулю.

Дифференциальное давление определяется по формуле 1:

$$\Delta p = p_0 - p_{ст}, \qquad (1)$$

где p_0 и $p_{ст}$ - давления, измеряемые в точках 5 и 9 (рис. 1).

Согласно уравнению Бернулли [9] существуют потери давления между носоглоткой и подмасочным пространством, которые можно описать в соответствии с формулой:

$$\Delta p = K \cdot \dot{V}^2, \qquad (2)$$

где K – коэффициент потерь, $\dot{V}$ – расход воздушного потока.

Таким образом, исключаются дополнительные потери на участке измерения дифференциального давления.

Методика измерений

Измерения осуществляются с помощью разработанного прибора «Optimus» [10], внешний вид которого представлен на рис. 2.

Прибор имеет следующие технические характеристики: отображаемый диапазон измерения расхода воздуха ±1200 см^3/с, дифференциального давления ±1200 Па, частота опроса измерительных каналов − 100 Гц. Прибор прошел метрологическую аттестацию (свидетельство государственной метрологической аттестации № 05/0612).

Рис. 2. Риноманометр «Optimus»

Измерительный модуль прибора представляет собой электронное микропроцессорное устройство, предназначенное для измерения физических величин малого дифференциального давления и двунаправленного потока воздуха с их первичной обработкой и дальнейшей передачей в ЭВМ. Функционально модуль состоит из первичных преобразователей давления и потока, цепей аналоговой и цифровой обработки сигнала, цепей питания и преобразования интерфейса. Подробное описание схемы прибора приведено в работе [10].

Графические зависимости измеряемых величин расхода воздушного потока и дифференциального давления от времени приведены на рис. 3.

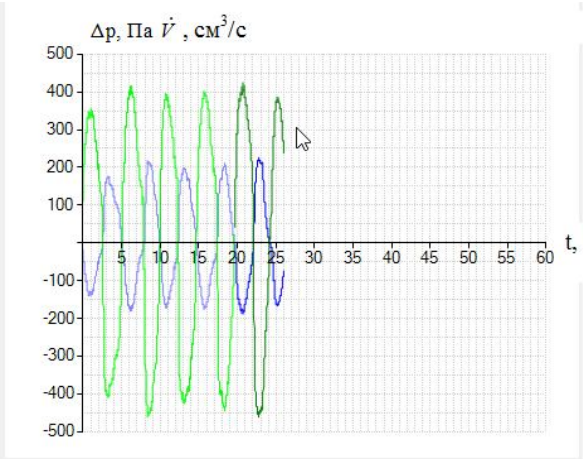

Рис. 3. Риноманометрические данные

По результатам измерения рассчитывается основной диагностический параметр – внутриносовое сопротивление [11], согласно которому оценивают степень затруднения дыхания.

В большинстве случаев в клинической практике выполняется расчет коэффициента носового сопротивления по формуле

$$R = \Delta p / \dot{V} \qquad (3)$$

Согласно рекомендациям международного комитета по стандартизации объективной оценки носового дыхания коэффициент носового сопротивления или носовое сопротивление воздушному потоку R150 определяется при фиксированном дифференциальном давлении 150 Па [12].

Степень обструкции классифицируется по значению носового сопротивления R_{150} в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Оценка степени обструкции одной стороны носа при риноманометрии при 150 Па

Степень обструкции	Объемная скорость, см^3/с	Сопротивление, Па/см^3/с
Нет обструкции	> 500	< 0,3
Слабая обструкция	300–500	0,3–0,5
Умеренная обструкция	180–300	0,5–0,8
Выраженная обструкция	<180	>0,8

Предложенная схема измерения дифференциального давления дает возможность исключить все возможные путевые потери давления и осуществить забор давления в зоне с нулевой скоростью потока. Все это полностью исключает искажение измеряемых данных.

Расчет неопределенностей результатов измерений

Уравнение измерения носового сопротивления (3) дает возможность записать выражение для суммарной стандартной неопределенности:

$$u_c(R) = \sqrt{c_{\Delta p}^2 u^2(\Delta p) + c_{\dot V}^2 u^2(\dot V)}\ , \qquad (4)$$

где $u^2(\Delta p)$, $u^2(\dot V)$ − стандартные неопределенности измерения соответственно дифференциального давления Δp и расхода воздушного потока $\dot V$; $c_{\Delta p}$, $c_{\dot V}$ − соответствующие коэффициенты чувствительности, причем:

$$c_{\Delta p} = \frac{\partial R}{\partial \Delta p} = \frac{1}{\dot V}\ , \qquad (5),$$

$$c_{\dot V} = \frac{\partial R}{\partial \dot V} = -\frac{\Delta p}{\dot V^2}\ . \qquad (6)$$

Стандартные неопределенности $u(\Delta p)$, $u(\dot V)$ получаем из свидетельства о государственной метрологической аттестации на прибор, в котором приведены границы допустимой относительной погрешности измерения расхода воздуха ($\delta_p \pm 3$ %) и границы допустимой приведенной погрешности измерения давления ($\gamma_p \pm 0{,}25$ %), в предположении о равномерном законе распределения внутри границ по формулам:

$$u(\Delta p)=\Delta p\frac{\delta_p}{\sqrt{3}\cdot 100}\ , \qquad (7)$$

$$u(\dot V)=\dot V_{max}\frac{\gamma_p}{\sqrt{3}\cdot 100}\ . \qquad (8)$$

Подставляя выражения (5)-(8) в (4), имеем

$$u_c(R) = \frac{R}{\sqrt{3}100}\sqrt{\delta_p^2+\gamma_{\dot V}^2\frac{\dot V_{max}^2}{\dot V^2}}\ . \qquad (9)$$

Расширенную неопределенность измерения носового сопротивления находим по формуле:

$$U(R)=ku_c(R)\ , \qquad (10)$$

где коэффициент охвата k будет вычисляться для уровня доверия 0,95 для трапецеидального закона распределения [13].

Бюджет неопределенности приведен в табл. 2.

Таблица 2

Бюджет неопределенности измерения носового сопротивления

Входные величины	Значения входных величин	Стандартные неопределенности	Коэффициенты чувствительности	Вклады неопределенности
Δp	$\widehat{\Delta p}$	(7)	(5)	$c_{\Delta p}u(\Delta p)$
$\dot V$	$\widehat{\dot V}$	(8)	(6)	$c_{\dot V}u(\dot V)$
Измеряемая величина	Результат измерения	Суммарная стандартная неопределенность	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность
R	(3)	(9)	k	(10)

Выражения (9) и (10) прямо пропорциональны R, поэтому их лучше выражать в относительном виде.

Относительная суммарная стандартная $\tilde u_c(R)$ и расширенная $\tilde U(R)$ неопределенности (в процентах) будут равны:

$$\tilde u_c(R) = \frac{u_c(R)}{R}100\% = \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{\delta_p^2+\gamma_{\dot V}^2\frac{\dot V_{max}^2}{\dot V^2}}\ ; \qquad (11)$$

$$\tilde U(R)=\frac{U(R)}{R}\cdot 100\%=k\tilde u_c(R)\ . \qquad (12)$$

Из приведенных выражений нетрудно увидеть, что неопределенность измерения одного и того же сопротивления будет разной для разных значений $\dot V$ и не будет зависеть от Δp. Были проведены расчеты зависимости $\tilde U(R)$ при изменении $\dot V$ от 50 до 800 см^3/с. Результаты расчетов приведены на рис. 4.

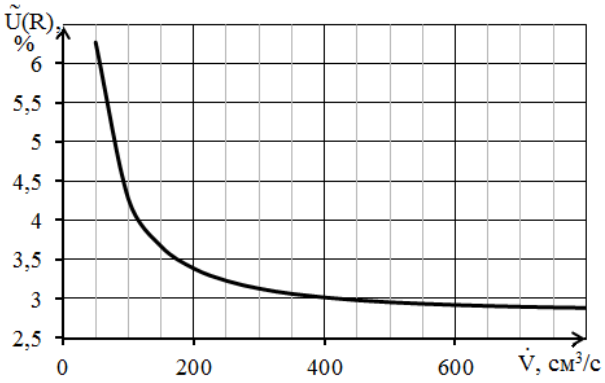

Рис. 4. Зависимость Ũ(R)

Из рисунка видно, что максимум относительной расширенной неопределенности (6,3 %) достигается при минимальном расходе воздушного потока $\dot{V}$=50 см^3/с.

Выводы

1. Предложена новая методика измерения дифференциального давления при проведении передней активной риноманометрии, которая базируется на основных принципах гидромеханики и позволяет полностью исключить путевые потери давления.

2. Установлено, что относительная неопределенность измерения одного и того же сопротивления будет разной для разных значений расхода воздушного потока $\dot{V}$ и не будет зависеть от дифференциального давления Δp.

3. В результате расчетов неопределенности измерений выявлено, что максимум относительной расширенной неопределенности (6,3 %) достигается при минимальном расходе воздушного потока $\dot{V}$=50 см^3/с.

Список литературы

1. Clement, P. A. Standardisation Committee on Objective Assessment of the Nasal Airway. Consensus report on acoustic rhinometry and rhinomanometry / P.A. Clement, F. Gordts // Rhinology – 2005. - № 43, P. 169–179.

2. Thulesius, H. L., Rhinomanometry in clinical use. A tool in the septoplasty decision making process.: doctoral dissertation, clinical sciences / H.L. Thulesius – 2012. – 67 p.

3. Бых А.И. Диагностические возможности современной риноманометрии / А.И. Бых, Т.Г. Силантьева, О.Г. Аврунин // Сборник научных трудов научно – методического семинара Наука и образование. – Хмельницкий - Рим. – ХНУ, 2011. – С. 88-89.

4. Clement, P.A. Committee report on standardization of rhinomanometry / P.A. Clement // Rhinology – 1984. №22(3). – P. 151-155.

5. Canbay, E.I. A comparison of nasal resistance in white, Caucasians and blacks / E.I. Canbay, S.N. Bhatia // Am J Rhinology – 1997. № 11, P. 73-75.

6. Crouse, U. Effects of age, body mass index, and gender on nasal airflow rate and pressures / U. Crouse, M.T. Laine-Alava // Laryngoscope. – 1999, № 109. – P. 1503-1508.

7. Vogt K. 4-Phase-Rhinomanometry Basics and Practice / K. Vogt A.A. Jalowayski // Rhinology, supplement, - 2010, № 21, p.1-50.

8. Patent US 6,565,517, A61B 5/00 Apparatus and methods for rhinomanometry / Brabrand S. (USA), 20.05.2003

9. Баєв, Б.С. Гідравліка та гідравлічні системи літальних апаратів: навч, посібник / Б.С. Баєв, В.В. Чмовж; - Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. Ин-т», 2001. — 126 с.

10. Нечипоренко, А.С. Технические аспекты риноманометрии / А.С. Нечипоренко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т.4, № 9(64). – С. 11-14.

11. Hilberg, O. PAR. The objective assessment of nasal patency / O. Hilberg, P.A. Clement, A.S. Jones, D.E. Phillips, F.J.M. Hilgers // Diseases of the head and neck, nose and throat. – 1998. – P. 719-742.

12. Naito, K. Comparison of calculated nasal resistance from Rohrer's equation with measured resistance at delta P 150Pa / K. Naito, T. Mamiya, Y. Mishima, Y. Kondo, S. Miyata and S. Iwata // Rhinology –1998, № 36(1). – P. 28-31.

13. Захаров И.П., Кукуш В.Д. Теория неопределенности в измерениях / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Х.: Консум, 2002 – 256 с.

Поступила в редколлегию 3.03.2014

Рецензент: д-р физ.-мат. наук проф. А.И. Бых, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ТИСКУ ПРИ ПЕРЕДНІЙ АКТИВНІЙ РИНОМАНОМЕТРІЇ

А.Л. Єрохін, І.П. Захаров, І.В. Прасол, А.С. Нечипоренко, О.Г. Гарюк

Розглянуто питання діагностики функції носового дихання за допомогою методу передньої активної риноманометрії. Проаналізовано схеми вимірювання диференційного тиску. Проведено розрахунок невизначеності даних риноманометрічеcкіх вимірювань.

Ключові слова: *передня активна риноманометрія, диференційний тиск, об'єктивна оцінка, невизначеність вимірювань.*

UNCERTAINTY OF DIFFERENTIAL PRESSURE MEASUREMENT AT ACTIVE RHINOMANOMETRY

A.L. Yerokhin, I.P. Zakharov, I.V. Prasol, A.S. Nechyporenko, O.G. Garyuk

The problems of diagnosis nasal breathing function using the active anterior rhinomanometry were examined. Analysis of schemes differential pressure measurement was held. The uncertainty of rhinomanometry's measurement data was calculated.

Keywords: *active anterior rhinomanometry, differential pressure, objective assessment, uncertainty of measurement.*