

ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НОСОВОЙ ПОЛОСТИ

Андрей Ерохин¹⁾, Алина Нечипоренко¹⁾, Виталий Чмовж²⁾, Олег Гарюк³⁾

¹⁾ ХНУР, 61166 Украина, г. Харьков, просп. Ленина, 14, e-mail: alinanechiporenko@gmail.com

²⁾ НАУ им. Н.Е. Жуковского „ХАИ“, 61070 Украина, г. Харьков, ул. Чкалова, 17,
e-mail: v.chmovzh@khai.edu

³⁾ ХМАПО, 61176 Украина, г. Харьков, ул. Корчагинцев, 58, e-mail: o.garyuk@gmail.com

Резюме: Рассмотрен усовершенствованный подход к определению коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости. Данный коэффициент учитывает режимы течения в процессе дыхания, а также индивидуальные анатомо-физиологические особенности носовой полости человека. Проведено оценивание суммарной стандартной неопределенности величины коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости.

Ключевые слова: риноманометрия, расход воздушного потока, коэффициент гидродинамического сопротивления, число Рейнольдса, стандартная неопределённость

1. Введение и постановка задачи.

Нарушение носового дыхания – самая распространенная причина обращения за отоларингологической помощью. Носовое дыхание в отличие от дыхания через рот является физиологичным, и его нарушение отражается на различных функциях организма. В носовой полости осуществляется химический анализ (функция обоняния), воздух очищается, увлажняется и обогревается, так же здесь находится первая линия защиты от инфекций. Большинство из этих функций связаны с особенностями прохождения воздушной струи через нос, а именно с носовой аэродинамикой. [1].

Для объективной оценки носового дыхания в современной оториноларингологии наиболее широко используется метод передней активной риноманометрии (ПАРМ) [2 – 4]. В большинстве случаев в клинической практике выполняется расчёт диагностических параметров: коэффициентов носового сопротивления и коэффициентов Рехрера [5]. Однако данные коэффициенты имеют размерность, что снижает их диагностическую ценность и не позволяет систематизировать биологические показатели нормы для полости носа. В работе [6] предложен подход к определению коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости, который учитывает режимы течения в процессе дыхания, а также индивидуальные анатомо-физиологические особенности носовой полости любого человека.

Целью данной работы является оценка нео-

пределенности измерений при вычислении коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости.

2. Методика измерений.

Измерения осуществляются по методу ПАРМ с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса «Optimus» [7], внешний вид которого представлен на рис. 1

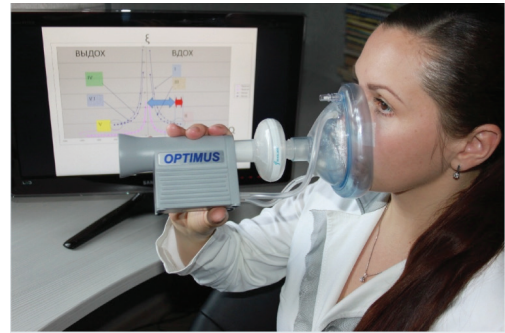


Рис. 1. Программно-аппаратный комплекс для риноманометрических измерений

Графические зависимости измеряемых величин расхода воздушного потока и дифференциального давления от времени приведены на рис. 2.

На основании проведенных измерений строится графическая зависимость дифференциального давления от величины расхода воздуха [8]. Данная зависимость наиболее полно с точки

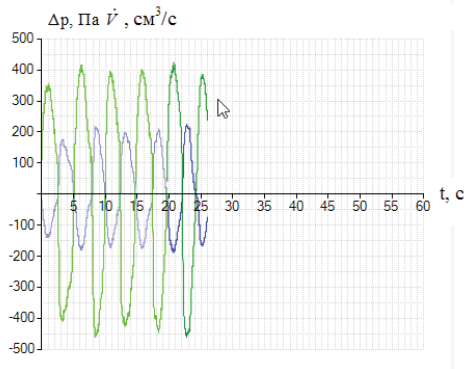


Рис. 2. Риноманометрические данные

зрения гидромеханики и физики явления описывается формулой Рехнера:

$$\Delta p = k_1 Q + k_2 Q^2, \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент ламинарного потока и k_2 – коэффициент турбулентного потока.

Однако существенным недостатком данного подхода является наличие размерности коэффициентов, что снижает диагностическую ценность и не позволяет выработать показатели нормы.

3. Расчет коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости.

В работе [6] предложена методика расчета коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости, в соответствии с которой расчет производится по формуле:

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\rho_2 v_{cp}^2} = \frac{A}{Re} + B. \quad (2)$$

Коэффициенты A и B рассчитываются по формулам:

$$A = k_1 \frac{\pi d_{эКВ}^3}{2 v_2 \rho_2}, \quad (3)$$

$$B = k_2 \frac{\pi^2 d_{эКВ}^4}{8 \rho_2}.$$

Получим зависимость $\zeta = f(Re)$, график которой приведен на рис. 3.

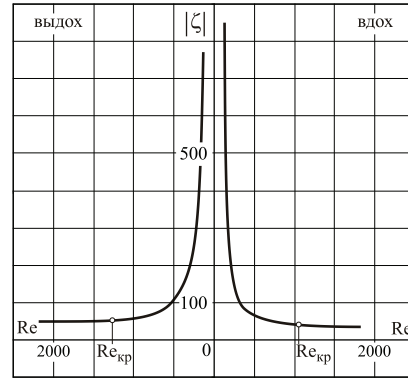


Рис. 3. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от числа Рейнольдса

Из работы [9] известно, что коэффициенты и – безразмерные константы, а, следовательно, и гидродинамический коэффициент сопротивления носовой полости ζ тоже величина безразмерная.

4. Расчет неопределенностей результатов измерений.

Оценивание неопределенности измерений проведем в соответствии с базовым алгоритмом, описанным в работе [10].

Составим модельное уравнение, для чего в уравнение (2) подставим коэффициенты A и B согласно (3), в результате имеем:

$$\zeta = \frac{2S_H^2}{\rho} \left(\frac{k_1}{Q} + k_2 \right). \quad (4)$$

Уравнение для расчета коэффициента гидродинамического сопротивления (3) дает возможность получить выражение для суммарной стандартной неопределенности при отсутствии корреляции между результатами измерения входных величин:

$$u_c(\zeta) = \sqrt{c_s^2 u^2(s_H) + c_\rho^2 u^2(\rho) + c_{k_1}^2 u^2(k_1) + c_Q^2 u^2(Q) + c_{k_2}^2 u^2(k_2)}, \quad (5)$$

где $u^2(s_H)$, $u^2(\rho)$, $u^2(k_1)$, $u^2(Q)$, $u^2(k_2)$ стандартные неопределенности измерения соответственно площади поперечного сечения S_H , плотности воздуха ρ , коэффициентов ламинарного k_1 и турбулентного k_2 режимов течения, величины

максимального расхода воздушного потока Q ; c_s ,

c_p , c_{k_1} , c_{k_2} , c_Q - соответствующие коэффициенты чувствительности, причем:

$$c_s = \frac{\partial \zeta}{\partial S} = \frac{4S_H}{\rho} \left(\frac{k_1}{Q} + k_2 \right); \quad (6)$$

$$c_p = \frac{\partial \zeta}{\partial \rho} = -\frac{2S_H^2}{\rho} \left(\frac{k_1}{Q} + k_2 \right); \quad (7)$$

$$c_{k_1} = \frac{\partial \zeta}{\partial k_1} = \frac{2S_H^2}{\rho} \frac{1}{Q}; \quad (8)$$

$$c_{k_2} = \frac{\partial \zeta}{\partial k_2} = \frac{2S_H^2}{\rho}; \quad (9)$$

$$c_Q = \frac{\partial \zeta}{\partial Q} = -\frac{2S_H^2}{\rho} \frac{k_1}{Q^2}. \quad (10)$$

Для нахождения значений коэффициентов k_1 , k_2 используется метод наименьших квадратов. Подробно вычисление стандартных неопределённостей данных коэффициентов приведено в работе [7].

Стандартную неопределённость, $u(Q)$ получаем из свидетельства о государственной метрологической аттестации на прибор, в котором приведены границы допустимой относительной погрешности измерения расхода воздуха ($\delta_p \pm 3\%$) в предположении о равномерном законе распределения внутри границ по формуле:

$$u(Q) = Q \frac{\delta_p}{\sqrt{3} \cdot 100}. \quad (11)$$

Стандартную неопределённость $u(\rho)$ также исходя из предположения о равномерном законе распределения внутри границ рассчитываем по формуле:

$$u(\rho) = \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{2\sqrt{3}}, \quad (12)$$

где ρ_1 - плотность вдыхаемого воздуха при температуре окружающей среды, ρ_2 - плотность выдыхаемого воздуха. Из работы [11] известно, что не зависимо от температуры вдыхаемого воздуха, средняя температура выдыхаемого воздуха равна 33°C . Величину плотности воздушного потока получаем из справочной литературы.

При расчёте стандартной неопределённости измерения площади поперечного сечения S_n вос-

пользуемся формулой:

$$u(S_n) = \sqrt{u_A^2(S_{n_i}) + u_B^2(S_{n_i})}, \quad (13)$$

где $u_A(S_{n_i})$ - стандартная неопределённость типа А, $u_B(S_{n_i})$ - стандартная неопределённость типа В.

Для вычисления стандартной неопределённости типа А воспользуемся формулой:

$$u_A(S_{n_i}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (S_{n_i} - S_n)^2}. \quad (14)$$

Измерение площади поперечного сечения осуществляется с помощью встроенной функции, которая позволяет пользователю выделять требуемое сечение и проводить замеры (рис. 4).



Рис. 4. Визуализация анатомических структур носовой полости и околоносовых пазух

Расчёт стандартной неопределённости типа В произведем по формуле:

$$u(S_n) = S_n \frac{\delta_s}{\sqrt{3} \cdot 100}, \quad (15)$$

где δ_s - погрешность измерения площади поперечного сечения программного средства, которая не превышает $0,0001\%$ [12].

В результате вычислений получаем величину суммарной стандартной неопределённости расчёта коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости равную $u_c(\zeta) = 0,004371$.

5. Выводы.

В работе представлена методика обработки риноманометрических данных, которая позволяет перейти к безразмерным коэффициентам гидродинамического сопротивления, определяющим

аэродинамику носовой полости, для выработки показателей нормы. Применение данного подхода позволяет повысить эффективность диагностики лор-заболеваний, связанных с нарушением функции носового дыхания.

Проведено оценивание суммарной стандартной неопределенности величины коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости, которая должна учитываться при оценке соответствия его значения границам для нормы и патологии.

6. Литература

[1] P. Wheeler, S. Wheeler. *Vasomotor rhinitis*. Am. Fam. Physician, 2005 no. 72(6), pp. 1057–62.

[2] H. L. Thulesius. *Rhinomanometry in clinical use. A tool in the septoplasty decision making process*, Ph.D. dissertation, Department of Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery, Clinical Sciences, Lund University Sweden, 2012.

[3] D. Demirbas, C. Cingi, H. Cakli, E. Kaya. *Use of rhinomanometry in common rhinologic disorders*, Expert Rev. Med. Devices, 2011, no. 8(6), pp. 769–777.

[4] L. Malm, R. G. v. Wijk, C. Bachert. *Guidelines for nasal provocations with aspects on nasal patency, airflow, and airflow resistance. International Committee on Objective Assessment of the Nasal Airways, International Rhinologic Society, Rhinology*, 2000, vol. 38(1), pp. 1-6, March.

[5] F. Rohrer. *The flow resistance in the human respiratory tract*, European Journal of Physiology, 1915, no. 162, pp. 225-295.

[6] В. В. Чмовж, О. Г. Гарюк, А. С. Нечипоренко. *Аэродинамика носовой полости человека*, Матеріали 20-ї між народної науково-технічної конференції Гідроаеромеханіка в інженерній практиці, 2015, 26-29 травня, с.70 – 72.

[7] А. Л. Ерохин, И.П. Захаров, А.С. Нечипоренко, И. Г. Перова, О. Г. Гарюк *Выбор диагностического параметра при выполнении риноманометрических измерений*, Метрологія та прилади, 2014, № 1(45), с. 66 – 69.

[8] K. Vogt, A. A. Jalowayski, W. Althaus, C. Cao, D. Han, W. Hasse, H. Hoffrichter, R. Mosges, J. Pallanch, K. Shah-Hosseini, K. Peksis, K. D. Wernecke, L. Zhang and P. Zaporoshenko.

4-Phase- Rhinomanometry (4PR) – basics and practice, 2010 Rhinology Suppl. 21, pp. 1-50

[9] Б. С. Басв, В. В. Чмовж. *Гідравліка та гідравлічні системи літальних апаратів*, Навчальний посібник, Харків, Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, 2001, с. 73 - 75.

[10] И. П. Захаров. *Неопределенность измерений для чайников и начальников*. Учебное пособие, издание 2-е переработанное, Санкт-Петербург, политехника-Сервис, 2014, 51 с.

[11] И. В. Хелимская. *Первый опыт измерения температуры выдыхаемого воздуха для ранней диагностики обструктивных заболеваний лёгких*, Дальневосточный медицинский журнал, 2010 no. 4, pp. 18-20.

[12] В. В. Яхеев, В. А. Мишанов. *Методика использования программы Autocad в определении прочностных и деформационных характеристик горных пород прибором БУ-39*. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), № 1, 2006, с. 158-161.

Сведения об авторах.

Андрей Леонидович Ерохин

Образование - инженер-конструктор (1988). Д.т.н. (2006), профессор (2007); профессор кафедры программной инженерии Харьковского национального университета радиозлектроники.

Алина Сергеевна Нечипоренко

Образование – инженер-электроник (2001) К.т.н. (2009), доцент кафедры биомедицинской инженерии, докторант кафедры программной инженерии Харьковского национального университета радиозлектроники.

Виталий Витальевич Чмовж

Образование – инженер-механик (1992) К.т.н. (1999), профессор (2015), заведующий кафедрой аэрогидродинамики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

Олег Григорьевич Гарюк

Образование – врач-педиатр (1992) К.м.н. (2003), доцент, доцент кафедры оториноларингологии и детской оториноларингологии Харьковской медицинской академии последипломного образования.

ASSESSMENT OF UNCERTAINTY WHILE CALCULATING OF HYDRODYNAMIC RESISTANCE COEFFICIENT OF A NASAL CAVITY

Andriy Yerokhin ¹⁾, Alina Nechiporenko ¹⁾, Vitaliy Chmovzh ²⁾, Oleg Garyuk ³⁾

¹⁾ KhNURE, 14 Lenina, Ave., Kharkiv, 61160 Ukraine *e-mail: alinanechiporenko@gmail.com*

²⁾ NAU, 17 Chkalova, str., Kharkiv, 61070, Ukraine, *e-mail: v.chmovzh@khai.edu*

³⁾ KhMAPE, 58 Korchagintsev St., Kharkiv, 61176, Ukraine, *e-mail: o.garyuk@gmail.com*

Abstract: The improved method of receiving hydrodynamic resistance coefficient of a nasal cavity was described. This coefficient takes into account the regimes of flow in the course of breath and also specific anatomico-physiological features of a person's nasal cavity. The assessment of total standard uncertainty of calculation hydrodynamic resistance coefficient was conducted.

Key words: Rhinomanometry, airflow, hydrodynamic resistance coefficient, Reynold's number, standard uncertainty

References

- [1] **P. Wheeler, S. Wheeler.** *Vasomotor rhinitis.* Am. Fam. Physician, 2005 no. 72(6), pp. 1057–62.
- [2] **H. L. Thulesius.** *Rhinomanometry in clinical use. A tool in the septoplasty decision making process.* Ph.D. dissertation, Department of Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery, Clinical Sciences, Lund University Sweden, 2012.
- [3] **D. Demirbas, C. Cingi, H. Cakli, E. Kaya.** *Use of rhinomanometry in common rhinologic disorders,* Expert Rev. Med. Devices, 2011, no. 8(6), pp. 769–777.
- [4] **L. Malm, R. G. v. Wijk, C. Bachert.** *Guidelines for nasal provocations with aspects on nasal patency, airflow, and airflow resistance.* International Committee on Objective Assessment of the Nasal Airways, International Rhinologic Society, Rhinology, 2000, vol. 38(1), pp. 1-6, March.
- [5] **F. Rohrer.** *The flow resistance in the human respiratory tract,* European Journal of Physiology, 1915, no. 162, pp. 225-295.
- [6] **V. V. Chmovzh, O. G. Garyuk, A. S. Nechiporenko.** *Aerodinamika nosovoy polosti cheloveka,* Materiali 20-ï mizh narodnoï naukovo-tekhnichnoï konferentsii Gidroayeromekhanika v inzheneriy praktitsi, 2015, 26-29 travnya, s.70 – 72.
- [7] **A. L. Yerokhin, I.P. Zakharov, A.S. Nechiporenko, I. G. Perova, O. G. Garyuk** *Vybor diagnosticheskogo parametra pri vypolnenii rinomanometricheskikh izmereniy,* Metrologiya ta priladi, 2014, № 1(45), s. 66 – 69.
- [8] **K. Vogt, A. A. Jalowayski, W. Althaus, C. Cao, D. Han, W. Hasse, H. Hoffrichter, R. Mosges, J. Pallanch, K. Shah-Hosseini, K. Peksis, K. D. Wernecke, L. Zhang and P. Zaporoshenko.** *4-Phase- Rhinomanometry (4PR) – basics and practice,* 2010 Rhinology Suppl. 21, pp. 1-50
- [9] **B. S. Baev, V. V. Chmovzh.** *Gidravlika ta gidravlichni sistemi lital'nikh aparativ,* Navchal'nyy posibnik, Kharkiv, Natsional'niy ayerokosmichniy universitet “Kharkivskiy aviatsiyniy institut”, 2001, s. 73 - 75.
- [10] **I. P. Zakharov.** *Neopredelemnost' izmereniy dlya chaynikov i nachal'nikov.* Uchebnoye posobiye, izdaniye 2-ye pererabotannoye, Sankt-Peterburg, politekhnika-Servis, 2014, 51 s.
- [11] **I. V. Khelims kaya.** *Pervyy opyt izmereniya temperatury vydykhaemogo vozdukh dlya ranney diagnostiki obstruktivnykh zabollevaniy lyogkikh,* Dal'nevostochnyy meditsinskiy zhurnal, 2010 no. 4, pp. 18-20.
- [12] **V. V. Yakheyev, V. A. Mishanov.** *Metodika ispol'zovaniya programmy Autocad v opredelenii prochnostnykh i deformatsionnykh kharakteristik gornyykh porod priborom BU-39.* Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), № 1, 2006, s. 158-161.

ОЦЕНЯВАНЕ НА НЕОПРЕДЕЛЕНОСТТА ПРИ ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ХИДРОДИНАМИЧНОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА НОСНАТА КУХИНА

Андрей Ерохин¹⁾, Алина Нечипоренко¹⁾, Виталий Чмовж²⁾, Олег Гарюк³⁾

¹⁾ ХНУР, 61166 Украйна, г. Харков, просп. Ленина, 14, *e-mail: alinanechiporenko@gmail.com*

²⁾ НАУ Н.Е. Жуковского „ХАИ“, 61070 Украйна, г. Харков, ул. Чкалова, 17,

e-mail: v.chmovzh@khai.edu

³⁾ ХМАПО, 61176 Украйна, г. Харков, ул. Корчагинцев, 58, *e-mail: o.garyuk@gmail.com*

Резюме: Разгледан е усъвършенстван метод за определяне на коефициента на хидродинамичното съпротивление на носната кухина. Този коефициент отчита режима на потока в процеса на дишане, както и индивидуалните анатомично-физиологични особености на човешката носна кухина. Извършена е оценка на сумарната стандартна неопределеност на коефициента на хидродинамичното съпротивление на носната кухина.

Ключови думи: риноманометрия, разход на въздушния поток, коефициент на хидродинамичното съпротивление, число на Рейнолдс, стандартната неопределеност