

УДК 612.215.4;616-71

А.Л. Ерохин<sup>1</sup>, А.С. Нечипоренко<sup>1</sup>, В.В. Чмовж<sup>2</sup>, О.Г. Гарюк<sup>3</sup>, Е.В. Линник<sup>1</sup><sup>1</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков<sup>2</sup> Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков<sup>3</sup> Харьковская медицинская академия последипломного образования, Харьков

## ОЦЕНИВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НОСОВОЙ ПОЛОСТИ

*Рассмотрены вопросы диагностики функции носового дыхания. Проведен расчет коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости. Данный коэффициент учитывает режимы течения воздушного потока 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 неопределенность.

### Введение

Нарушение носового дыхания является причиной различных патологических изменений, как местных (связанных с нарушением пневматизации околоносовых пазух) так и общих (связанных с нарушением мозгового кровообращения). Иногда оно может служить пусковым механизмом ряда болезненных симптомов, таких как частые головные боли, хроническая усталость, нарушение концентрации внимания, глазные боли. Носовое дыхание в отличие от дыхания через рот является физиологичным, поэтому 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 расчет 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. При вычислении диагности-

ческих коэффициентов необходимо определять границы нормы и патологии. Для оценки соответствия значений коэффициентов границам для нормы и патологии необходимо проводить расчет неопределенности измерений. В работе [7] показано, что если интервал неопределенности находится внутри области допустимых значений, то принимается решение о соответствии, и наоборот, если интервал неопределенности находится внутри области недопустимых значений, то принимается решение о несоответствии.

**Целью данной работы** является оценка неопределенности измерений при вычислении коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости.

### Методика измерений

Измерения осуществляются по методу ПАРМ с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса «Optimus» (свидетельство государственной регистрации № 14777/2015 от 12.06. 2015 г.). Основные характеристики и принцип работы программно-аппаратного комплекса описаны в работе [7].

Графические зависимости измеряемых величин расхода воздушного потока и дифференциального давления от времени приведены на рис. 1.

На основании проведенных измерений строится графическая зависимость дифференциального давления от величины расхода воздуха (рис. 2) [8].

Данная зависимость наиболее полно с точки зрения гидромеханики и физики явления описывается формулой Рехрера:

$$\Delta p = k_1 \dot{V} + k_2 \dot{V}^2, \quad (1)$$

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

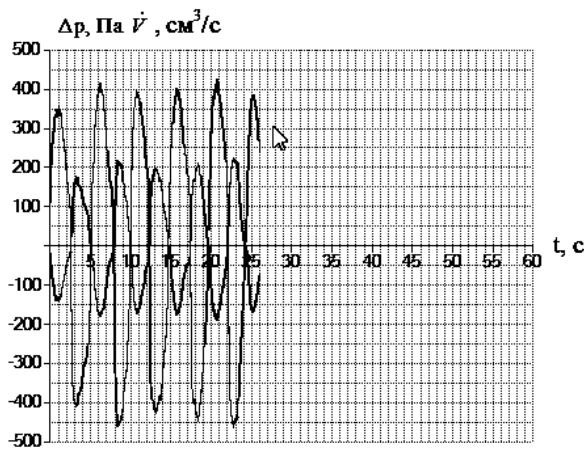


Рис. 1. Риноманометрические данные

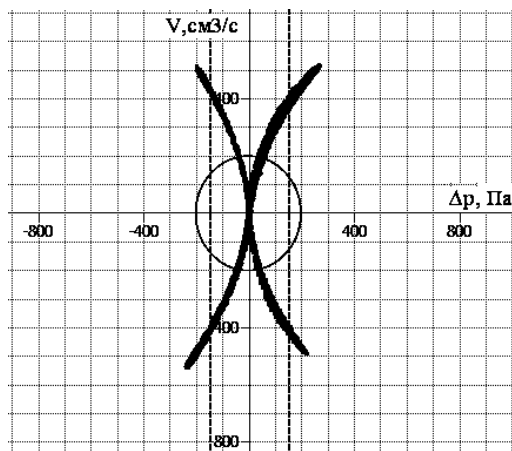


Рис. 2. График зависимости дифференциального давления от расхода воздуха

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

### 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:

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\rho V_{cp}^2} = \frac{A}{Re} + B, \quad (2)$$

где  $\Delta p$  – дифференциальное давление,  $\rho$  – плотность воздушного потока,  $V_{cp}$  – средняя скорость потока через ноздрю,  $A$  и  $B$  – безразмерные константы,  $Re$  – число Рейнольдса. Коэффициенты  $A$  и  $B$  рассчитываются по формулам:

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

$$B = k_2 \frac{\pi^2 d_{эКВ}^4}{8\rho},$$

где  $d_{эКВ}$  – эквивалентный диаметр ноздри,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздушного потока.

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

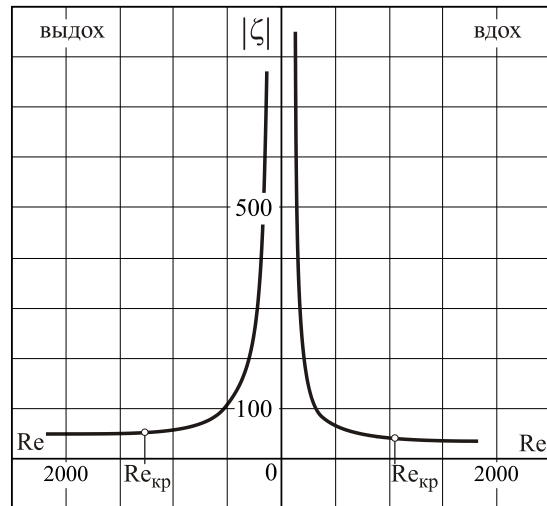


Рис. 3. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от числа Рейнольдса

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

### 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:

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

где  $S_H$  – площадь поперечного сечения ноздри.

В данном случае результат измерений выражается через другие величины, поэтому необходим расчет суммарной стандартной неопределенности. Уравнение для расчета коэффициента гидродинамического сопротивления (4) 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  $\rho$ , коэффициентов ламинарного  $k_1$  и турбулентного  $k_2$  режимов течения, величины максимального расхода воздушного потока  $Q$ ;  $c_s$ ,  $c_\rho$ ,  $c_{k_1}$ ,  $c_{k_2}$ ,  $c_Q$  – соответствующие коэффициенты чувствительности, причем:

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

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

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

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

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

Для нахождения значений коэффициентов  $k_1$ ,  $k_2$  используется метод наименьших квадратов.

Подробно вычисление стандартных неопределенностей данных коэффициентов приведено в работе [7].

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

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

Стандартную неопределенность  $u(\rho)$  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  $\rho_1$  – плотность вдыхаемого воздуха при температуре окружающей среды,  $\rho_2$  – плотность выдыхаемого воздуха.

Из работы [11] известно, что не зависимо от температуры вдыхаемого воздуха, средняя температура выдыхаемого воздуха равна 33 °С. Величину плотности воздушного потока получаем из справочной литературы.

При расчете стандартной неопределенности измерения площади поперечного сечения ноздри  $S_H$  воспользуемся формулой:

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

где  $u_A(S_{H_i})$  – стандартная неопределенность типа А,  $u_B(S_{H_i})$  – стандартная неопределенность типа В.

Для вычисления стандартной неопределенности типа А воспользуемся формулой:

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

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

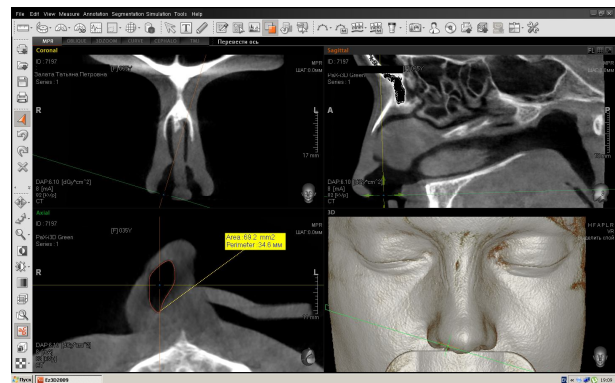


Рис. 4. Визуализация анатомических структур носовой полости и околоносовых пазух в программном пакете Ez3D2009

Расчет стандартной неопределенности типа В произведем по формуле:

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

где  $\delta_s$  – погрешность измерения площади поперечного сечения программного средства, которая не превышает 0,0001% [12, 13].

Расширенную неопределенность измерения коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости находим по формуле

$$U(\zeta) = k u_c(\zeta), \quad (16)$$

где  $k$  – коэффициент охвата, вычисляемый для уровня доверия 0,95 для трапецидального закона распределения [14].

Расчеты были проведены для величин площади поперечного сечения  $S_H=81\text{мм}^2$  и максимального

расхода воздушного потока  $Q=450 \text{ см}^3/\text{с}$ . Таким образом, оценивание расширенной неопределенности измерений  $\zeta$  показало, что разброс ее значений находится в пределах  $\pm 0,00882942$ .

## 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 и расширенной неопределенностей величины коэффициента гидродинамического сопротивления носовой полости, которые должны учитываться при оценке соответствия его значения границам для нормы и патологии.

## Список литературы

1. Wheeler P. Vasomotor rhinitis / P. Wheeler, S. Wheeler // *Am. Fam. Physician*, 2005. – No. 72(6). – P. 1057-62.
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. Demirbas D. Use of rhinomanometry in common rhinologic disorders / D. Demirbas, C. Cingi, H. Cakli, E. Kaya // *Expert Rev. Med. Devices*. – 2011. – No. 8(6). – P. 769-777.
4. 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.
5. Röhrer F. Der Stromungswiderstand in der menschlichen Atemwegen / F. Röhrer // *Pflügers Arch Ges Physiology*. – 1915. – № 162. – P. 225-295.
6. Чмовж В.В. Аэродинамика носовой полости человека / В.В. Чмовж, О.Г. Гарюк, А.С. Нечипоренко //

*Матеріали 20-ї міжнародної науково-технічної конференції Гідроаеромеханіка в інженерній практиці, 2015, 26-29 травня. – С. 70-72.*

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

8. Vogt K. 4-Phase- Rhinomanometry (4PR) – basics and practice / 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, P. Zaporoshenko // *Rhinology*. – 2010. – Suppl. 21. – P. 1-50.

9. Баев Б.С. Гідравліка та гідравлічні системи літальних апаратів: навчальний посібник / Б.С. Баев, В.В. Чмовж. – Х.: Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", 2001. – 126 с.

10. Захаров И.П. Неопределенность измерений для чайников и начальников: учебное пособие, издание 2-е переработанное / И.П. Захаров. – Санкт-Петербург: Политехника-Сервис, 2014. – 51 с.

11. Хелимская И.В. Первый опыт измерения температуры выдыхаемого воздуха для ранней диагностики обструктивных заболеваний легких / И.В. Хелимская // *Дальневосточный медицинский журнал. – 2010. – № 4. – P. 18-20.*

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

13. Моисеева И.Л. Сравнительная характеристика программ-просмотрщиков конусно-лучевой компьютерной томографии / И.Л. Моисеева // *X-RAY ART. – № 1. – С. 46-51.*

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

Поступила в редколлегию 27.08.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТА ГІДРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ НОСОВОЇ ПОРОЖНИНИ

А.Л. Єрохін, А.С. Нечипоренко, В.В. Чмовж, О.Г. Гарюк, О.В. Лінник

Розглянуто питання діагностики функції носового дихання. Проведено розрахунок коефіцієнта гідродинамічного опору носової порожнини. Даний коефіцієнт враховує режими течії повітряного потоку в процесі дихання, а також індивідуальні анатомо-фізіологічні особливості носової порожнини людини. Проведено оцінювання сумарної стандартної і розширеної невизначеностей величини коефіцієнта гідродинамічного опору носової порожнини.

**Ключові слова:** риноманометрія, витрата повітряного потоку, коефіцієнт гідродинамічного опору, число Рейнольдса, стандартна невизначеність.

## ASSESSMENT OF CALCULATION RESULTS OF HYDRODYNAMIC RESISTANCE COEFFICIENT OF A NASAL CAVITY

A.L. Yerokhin, A.S. Nechiporenko, V.V. Chmovzh, O.G. Garyuk, O.V. Linnik

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 uncertainty of calculation hydrodynamic resistance coefficient was conducted.

**Keywords:** rhinomanometry, airflow, hydrodynamic resistance coefficient, Reynold's number, standard uncertainty.