

УДК 615.47

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.19

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В НОСОВОЙ ПОЛОСТИ ПРИ ДЫХАНИИ**Я. В. НОСОВА^{1*}, О. Г. АВРУНИН², И. С. ХУШАМ ФАРУК**¹ аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА² заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА³ преподаватель, медицинский колледж ИНАЙЯ, Эль-Рияд, САУДОВСКАЯ АРАВИЯ

*email: nyav007@gmail.com

АННОТАЦИЯ Статья посвящена определению степени травматизации слизистой оболочки носовой полости с турбулентным воздушным потоком. Прохождение воздуха через верхний носовой ход обеспечивает доставку молекул одориантатора в чувствительные области обонятельного анализатора. Изучение характеристик воздушного потока в верхнем носовом ходе позволяет определить границы пристеночного ламинарного подслоя и изучить назальную аэродинамику на микроуровне. Турбулентный поток способствует чрезмерному высушиванию слизистой оболочки носовой полости, что приводит к ее морфологической перестройке к субатрофическому процессу. Было обнаружено, что толщина ламинарного подслоя составляет около 1 мм, поэтому участок слизистой оболочки подвергается сушке с увеличением турбулентности течения в местах сужения носовой полости (обонятельной щели).

Ключевые слова: воздушный поток; обонятельная щель; ламинарный пограничный слой; слизистая оболочка; носовая полость; турбулентный поток

DETERMINATION OF MICROCHARACTERISTICS OF AIR FLOW IN THE NASAL CAVITY DURING BREATHING**Ya. NOSOVA^{1*}, O. AVRUNIN², H. I. FAROUK³**¹ Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE² Professor of Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE³ преподаватель, медицинский колледж ИНАЙЯ, Эль-Рияд, Саудовская Аравия

ABSTRACT The aim of the work is to determine the degree of traumatization of the mucous membrane of the nasal cavity by turbulent air flow. It should be noted that it is especially important to determine in the narrowing of the nasal cavity (olfactory gap), where the mucous membrane is subjected to drying with increasing turbulence of the air flow. Achieving this goal will increase the effectiveness of diagnosis and treatment of respiratory and olfactory disorders and will help to identify the pathogenesis of chronic rinological diseases. An important characteristic of nasal breathing is the distribution of air flow rates along the sections of the nasal cavity. When analyzing the existing approaches, it was determined that the main method of studying the aerodynamics of the nasal cavity is rhinomanometry. However, there is not always a clear correlation between anatomical and functional indicators, as well as subjective feelings of the patient and rhinomanometric data. The passage of air through the upper nasal passage ensures the delivery of odorivector molecules to sensitive areas of the olfactory analyzer. The study of the characteristics of the air flow in the upper nasal passage allows us to determine the boundaries of the near-wall laminar air sublayer and to study nasal aerodynamics at the micro level. Turbulent flow contributes to the excessive drying of the mucous membrane of the nasal cavity, leading to its morphological rearrangement towards the subatrophic process. It was found out that the thickness of the laminar layer is of the order of 1 mm, therefore the protuberances of the mucosa are subjected to drying with increasing turbulence of the flow at the sites of narrowing of the nasal cavity (olfactory gap). The prospect of work is the study of the characteristics of the boundary layer in typical pathologies in various respiratory regimes, which will improve the efficiency of diagnosis and treatment of respiratory and olfactory disorders and will help to identify the pathogenesis of chronic rinological diseases.

Keywords: air flow; olfactory cleft; laminar air sublayer; nasal cavity; mucous membrane; turbulent flow

Введение

Исследование обонятельного анализатора не только позволяет выявлять на ранних стадиях различные заболевания, но являться инструментом для оценки эффективности ринохирургического вмешательства, также полноценное восприятие запахов влияет на качество жизни человека. При

нарушениях обоняния становится невозможным выполнение пахучими веществами сигнальных функций: пищевой, половой, охранной, ориентировочной [1-3]. При этом значительно снижается качество жизни, увеличивается уровень риска при использовании бытовых газовых приборов.

Для некоторых авторов обонятельная щель соответствует обонятельной области, покрытой

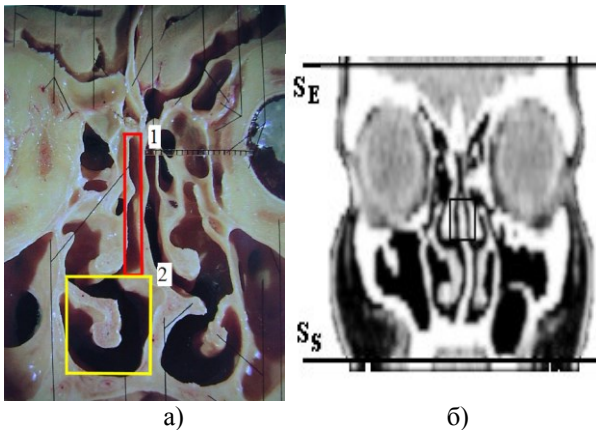
обонятельной слизистой оболочкой, с крибриформной пластинкой и 1 см² с каждой стороны, на боковой стенке носа и на перегородке.

Для большинства авторов обонятельная щель определяется в соответствии с физиологическим подходом с учетом воздушного потока. Кроме того, воздух проходит вдоль нижнего носового хода во время спокойного дыхания [4].

Таким образом, можно различать две физиологически различные зоны в полости носа (рис.1):

- широкая зона, обеспечивающая низкоскоростной поток воздуха: респираторная щель;
- узкая зона, обеспечивающая высокоскоростной поток воздуха в обонятельную область: обонятельная щель.

В этом понятии нижний предел обонятельной щели соответствует нижнему концу средней носовой раковины.



а) б)
Рис. 1 – Обонятельная щель

а) широкая зона, проводящая высокоскоростной воздушный поток: респираторная щель (a2); узкая зона, проводящая низкоскоростной поток воздуха в обонятельную область: обонятельная щель (a1)
б) мультипланарной реконструкции верхних дыхательных путей во фронтальной плоскости (обонятельная щель отмечена прямоугольником) [4]

Актуальными являются задачи связанные с прогнозированием и оценкой функциональных результатов эндоназального оперативного вмешательства, которыми в случае респираторно-обонятельных нарушений, являются условие прохождения воздуха через верхний носовой ход и восстановление обонятельной чувствительности.

Изменение направления основной воздушной струи при носовом дыхании ведет к постоянному раздражению определенных участков слизистой оболочки, (например участок слизистой оболочки полости носа, который содержит обонятельные рецепторы, так называемая обонятельная зона) что в последующем приведет к клеточной инфильтрации в этой области и затем к гипертрофии слизистой оболочки.

Цель работы

Целью работы является определение степени травматизации слизистой оболочки полости носа турбулентным воздушным потоком. Следует заметить, что это особенно важно определять в местах сужения носовой полости (обонятельная щель), где слизистая оболочка подвергается высушиванию при увеличении турбуликации воздушного потока. Достижение поставленной цели позволит повысить эффективность диагностики и лечения дыхательно-обонятельных нарушений и будет способствовать выявлению патогенеза хронических ринологических заболеваний.

При анализе существующих подходов было определено, что основным методом исследования аэродинамики полости носа является риноанометрия. Однако не всегда есть четкая корреляция между анатомическими и функциональными показателями, а также субъективными ощущениями пациента и риноанометрическими данными [5-12].

Изложение основного материала

Важной характеристикой носового дыхания является распределение скоростей потока воздуха по сечениям носовой полости.

Для ламинарного режима в сечении с радиусом a получим параболическую зависимость скоростей W от расстояния от центра r .

$$W = 2W_{cp} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right),$$

где W_{cp} – средняя скорость, r – расстояние от центра, a – радиус.

Для турбулентного режима скорость определяется так:

$$U = U_{max} \left(\frac{r}{a} \right)^{0.9\sqrt{\lambda}},$$

U_{max} – максимальная скорость, λ – коэффициент потерь.

С увеличением скорости воздушного потока (при форсированном дыхании – физическая нагрузка, сужение носового хода) толщина ламинарного пограничного слоя будет уменьшаться, слизистая оболочка будет подвергаться воздействию высокоскоростного турбулентного течения. Обонятельная зона узкая, поэтому турбулизация воздушного потока будет способствовать высушиванию слизистой оболочки, и как следствие морфологическая перестройка. Турбулизация воздушного потока будет способствовать высушиванию отдельных областей слизистой оболочки носовой полости, и как следствие

травматизация слизистой с последующей морфологической перестройкой отдельных областей.

Каким бы ни был закон распределения скоростей в сечении турбулентного потока, скорость у стенки равна 0, увеличиваясь к оси потока. Следовательно, должен существовать низкоскоростной слой, толщина которого зависит от Re , а скорость увеличивается от 0 до 90 % скорости ядра потока (рис.2) [5-7].

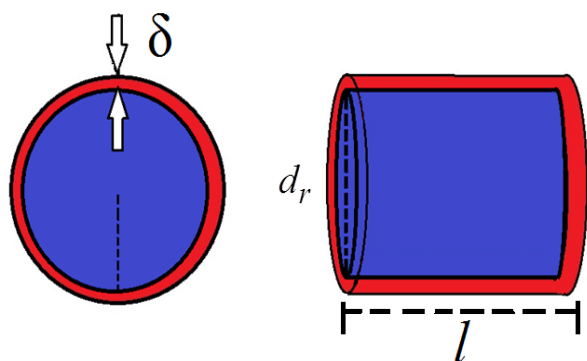


Рис. 2 – Схематическое изображение турбулентного ядра потока (синий цвет) и ламинарного пограничного слоя (красный цвет)

Число Рейнольдса Re , по значению которого определяется режим течения воздуха, вычисляется по формуле:

$$Re = \frac{V \cdot d_r}{\nu}$$

где V – средняя скорость воздуха в носовой полости (задается для разных режимов дыхания – спокойного (0,3 л/с), нормального (1 л/с), форсированного (2 л/с));

ν – коэффициент динамической вязкости что равно для воздуха при нормальных условиях $1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с.; d_r – гидравлический или эквивалентный диаметр, который для каналов сложной формы, которыми и являются носовые ходы, определяется их формулы:

$$d_r = \frac{4S}{P}$$

где S – средняя площадь сечения носового хода; P – периметр сечения носового хода.

Толщина ламинарного пограничного слоя, который выстилает стенки носовой полости можно вычислить как

$$\delta = \frac{32,4 \cdot d_r}{Re^{0,875}} \tag{1}$$

При этом можно видеть, что толщина ламинарного пограничного слоя нелинейно уменьшается с увеличением числа Рейнольдса в соответствии с формулой (1), то есть снижается при увеличении гидравлического диаметра носовой полости и скорости воздушного потока – фактически от режима носового дыхания.

Обсуждение результатов

Так как толщина ламинарного пограничного слоя зависит от гидравлического диаметра носа и числа Рейнольдса, то можно построить соответствующую зависимость (рис.3). Значения типичных гидравлических диаметров равны 4, 5 и 6 миллиметров [8-11].

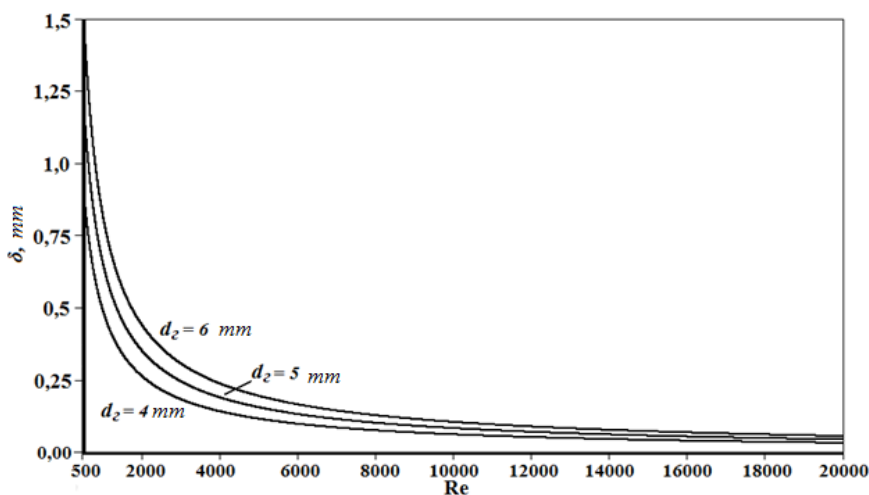


Рис. 3 – График зависимости толщины ламинарного пограничного слоя от числа Рейнольдса при типичных гидравлических диаметрах носовой полости

Определение шероховатости слизистой оболочки осуществляется на основе томографических данных и рассчитывается по формуле:

$$\Delta_i = l_{i+1} - l_i + \left(\frac{I_{i+1} - I_i}{I_{max}} h \right),$$

l_i и l_{i+1} – толщина слизистой оболочки на i -м и $i+1$ – м томографических срезах носовой полости, соответственно;

I_i и I_{i+1} – уровни интенсивности на границе между слизистой оболочкой и воздухом на i -м и $i+1$ фронтальном томографических срезах, соответственно;

I_{max} – максимальный уровень интенсивности на КТ-изображении;

h – пространственное разрешение КТ-изображений.

Пример распределения микронеровностей вдоль заданной линии на участке томографического изображения представлен на рисунке 4.

При сравнении толщины пограничного ламинарного слоя и величины шероховатости можно судить о степени травматизации слизистой оболочки полости носа в обонятельной области.

Существует три состояния:

- $\Delta_i < \delta_i$ – отсутствует негативное влияние (рис.4, зона 1, 4). Выступы слизистой полностью находятся в ламинарном пограничном слое;
- $\Delta_i \approx \delta_i$ – выступы слизистой оболочки находятся вблизи границы ламинарного пограничного слоя воздушного потока (рис.4, зона 2), при дальнейшем повышении интенсивности дыхания или сужении участка носовой полости будет присутствовать негативное влияние потока на слизистую оболочку, которое связано с турбулентным высушиванием;
- $\Delta_i > \delta_i$ – устанавливается негативное влияние, связанное с турбулентным высушиванием слизистой оболочки воздушным потоком (рис.5, зона 3).

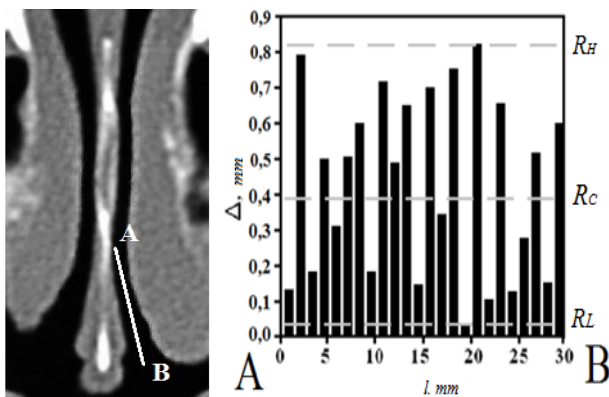


Рис. 4 – Распределение микронеровностей на участке АВ

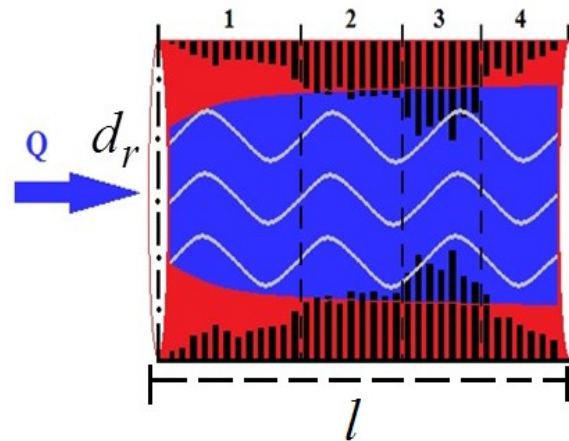


Рис. 5 – Схематическое представление отношения толщины пограничного ламинарного слоя и внутренних микровыступов носовой полости

Таким образом, в настоящем исследовании предпринята попытка объяснить механизм негативного воздействия воздушного потока на слизистую оболочку полости носа. Данный механизм приводит к субатрофическому изменению слизистой оболочки. Это полностью коррелируется с технической аэродинамикой, где выход поверхности трубы за пределы ламинарного слоя приводит к явлению эрозии. Толщина ламинарного пограничного слоя существенно зависит от конфигурации носовой полости и режима дыхания.

Выводы

Прохождение воздуха через верхний носовой ход обеспечивает подачу молекул одоривектора к чувствительным участкам обонятельного анализатора. Исследование характеристик воздушного потока в верхнем носовом ходе позволяет определить границы пристеночного ламинарного подслоя воздуха и изучить назальную аэродинамику на микроуровне как раз в районе верхней носовой ходы – самой узкой области носовой полости. Турбулентный поток способствует чрезмерному высушиванию слизистой оболочки полости носа, приводя к ее морфологической перестройки в сторону субатрофического процесса.

Выяснено что толщина ламинарного слоя составляет порядка 1 мм, поэтому выступы слизистой оболочки подвергаются высушиванию при увеличении турбулизации потока в местах сужения носовой полости (обонятельная щель).

Перспективой работы является изучение характеристик пограничного слоя при типичных патологиях в различных режимах дыхания, что позволит повысить эффективность диагностики и лечения дыхательно-обонятельных нарушений и будет способствовать выявлению патогенеза хронических ринологических заболеваний.

Список литературы

1. **Manesse, C.** Dysosmia-Associated Changes in Eating Behavior / **C. Manesse, C. Ferdenzi, M. Sabri, et al.** // *Chem. Percept.* – 2017. – 10: 104. – doi:10.1007/s12078-017-9237-3.
2. **Nosova, Ya.** Biotechnical system for integrated olfactometry diagnostics / **Ya. V. Nosova, O. G. Avrunin, V.V. Semenets** // *Innovative technologies and scientific solutions for industries.* – 2017. – No. 1 (1). – P.6 4 – 68. – doi:10.30837/2522-9818.2017.1.064.
3. **Boesveldt, S.** Gustatory and olfactory dysfunction in older adults: a national probability study / **S. Boesveldt, S. T. Lindau, M. K. McClintock, T. Hummel, J. N. Lundström** // *Rhinology.* – 2011. – 49 (3). – P. 324 – 330. – doi: 10.4193/Rhino10.155.
4. **Henrot, P.** To rediscover the olfactory cleft / **P. Henrot, P. Gallet, B. Grignon, T. Georgel, R. Jankowski** // *European Society of Radiology.* – 2010. – C-1701. – doi:10.1594/ecr2010/C-1701.
5. **Tavakola, M. M.** Deposition fraction of ellipsoidal fibers in a model of human nasal cavity for laminar and turbulent flows / **M. M. Tavakola, E. Ghahramanib, O. Aboualib, M. Yaghoubibc, G. Ahmadid** // *Journal of Aerosol Science.* – 2017. – Volume 113. – P. 52-70. – doi: 10.1016/j.jaerosci.2017.07.008.
6. **Curle, N.** The Laminar Boundary Layer Equations / **N. Curle** // *Courier Dover Publications.* – 2017. – 176 p.
7. **Lee, J. H.** Unsteady flow characteristics through a human nasal airway / **Jong-Hoon Lee, Yang Na, Sung-Kyun Kim, Seung-Kyu Chung** // *Respiratory Physiology & Neurobiology.* – 2010. – Volume 172, Issue 3. – P. 136-146. – doi:10.1016/j.resp.2010.05.010.
8. **Avrunin, O.** Extended of diagnostic capabilities for the Rhinomanometry method / **O. Avrunin, N. Shushlyapina, J. Ivanchenko** // Chapter 5.1 (315-321 p) in Spatial aspects of socio-economic systems' development: the economy, education and health care. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. – *Publishing House WSZiA.* – 2015. – 380 p.
9. **Nosova, Ya.** The use of statistical characteristics of measured signals to increasing the reliability of the rhinomanometric diagnosis / **Ya. Nosova, N. Shushliapina, S. V. Kostishyn, L. G. Koval, Z. Omiotek, et al.** // *Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments.* – 2016. – 100312M. – doi:10.1117/12.2248364.
10. **Ismail, H. F.** The Role of Paranasal Sinuses in the Aerodynamics of the Nasal Cavities / **H. F. Ismail, E. Osman, A. K. AL-Omari, O. G. Avrunin** // *International Journal of Life Science and Medical Research.* – 2012. – Vol. 2, 3. – P. 52-55. – doi:10.5963/LSMR0203004.
11. **Лукьянов, Г. Н.** Моделирование конвективных потоков в каналах нерегулярной формы на примере полости носа и околоносовых пазух человека / **Г. Н. Лукьянов, А. А. Воронин, А. А. Рассадина** // *Журнал технической физики.* – 2017. – том 87, вып. 3. – doi: 10.21883/JTF.2017.03.44256.1919.
12. **Farouk, H.** An attempt of the Determination of Aerodynamic Characteristics of Nasal Airways / **H. Farouk, A. Khaleel, O. Avrunin** // *Advances in Intelligent and Soft. Computing: Image Processing and*

Communications. Challenges 3. – Springer, 2011. – Vol. 102. – S. 311-322.

Bibliography (transliterated)

1. **Manesse, M., Ferdenzi, C., Sabri, M., et al.** Dysosmia-Associated Changes in Eating Behavior. *Chem. Percept.* 2017, **10**: 104, doi:10.1007/s12078-017-9237-3.
2. **Nosova, Ya., Avrunin, O. G., Semenets, V. V.** Biotechnical system for integrated olfactometry diagnostics *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 2017, No. **1** (1), 64 – 68, doi:10.30837/2522-9818.2017.1.064.
3. **Boesveldt, S., Lindau, S. T., McClintock, M. K., Hummel, T., Lundström, J. N.** Gustatory and olfactory dysfunction in older adults: a national probability study. *Rhinology*, 2011, **49** (3), 324 – 330, doi: 10.4193/Rhino10.155.
4. **Henrot, P., Gallet, P., Grignon, B., Georgel, T., Jankowski, R.** To rediscover the olfactory cleft. *European Society of Radiology*, 2010, C-1701, doi:10.1594/ecr2010/C-1701.
5. **Tavakola, M. M., Ghahramanib E., Aboualib, O., Yaghoubibc, M., Ahmadid, G.** Deposition fraction of ellipsoidal fibers in a model of human nasal cavity for laminar and turbulent flows *Journal of Aerosol Science*, 2017, **113**, 52-70, doi: 10.1016/j.jaerosci.2017.07.008.
6. **Curle N.** The Laminar Boundary Layer Equations. *Courier Dover Publications*, 2017, 176.
7. **Lee, J. H., Na, Ya., Kim, S.-K., Chung, S. K.** Unsteady flow characteristics through a human nasal airway. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 2010, **172**, 3, 136-146, doi:10.1016/j.resp.2010.05.010.
8. **Avrunin, O., Shushlyapina, N., Ivanchenko, J.** Extended of diagnostic capabilities for the Rhinomanometry method. Chapter 5.1 (315-321 p) in Spatial aspects of socio-economic systems' development: the economy, education and health care. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. *Publishing House WSZiA*, 2015, 380.
9. **Nosova, Ya. Shushliapina, N., Kostishyn, S. V., Koval, L. G., Omiotek, Z., et al.** The use of statistical characteristics of measured signals to increasing the reliability of the rhinomanometric diagnosis. *Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2016, 100312M, doi:10.1117/12.2248364.
10. **Ismail, H. F., Osman, E., AL-Omari, A. K., Avrunin, O. G.** The Role of Paranasal Sinuses in the Aerodynamics of the Nasal Cavities. *International Journal of Life Science and Medical Research*, 2012, **2**, 3, 52-55, doi:10.5963/LSMR0203004.
11. **Luk'yanov, H. N., Voronin, A. A., Rassadyna, A. A.** Modelyuvannya konvektyvnykh potokiv v kanalakh neregulyarnoyi formy na prykladi porozhnyny nosa i navkolonosovykh pazukh lyudyny. *Zhurnal tekhnichnoyi fizyky*, 2017, **87**, 3, doi: 10.21883/JTF.2017.03.44256.1919.
12. **Farouk, H., Khaleel, A., Avrunin, O.** An attempt of the Determination of Aerodynamic Characteristics of Nasal Airways. *Advances in Intelligent and Soft. Computing: Image Processing and Communications. Challenges 3*, Springer, 2011, **102**, 311-322.

Сведения об авторах (About authors)

Носова Яна Витальевна – аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники; г. Харьков, Украина; e-mail: nyav007@gmail.com.

Yana Nosova – Scientific Degree (Ph. D.), Docent/Professor, Position, Affiliation, Company, City, Ukraine; e-mail: nyav007@gmail.com.

Аврунин Олег Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, г. Харьков, Украина; e-mail: oleh.avrunin@nure.ua.

Oleh Avrunin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of Biomedical Engineering, Kharkov, Ukraine; e-mail: oleh.avrunin@nure.ua.

Фарук Хушам Исмаил – преподаватель, медицинский колледж ИНАЙЯ, Эль-Рияд, Саудовская Аравия; e-mail: info@inaya.edu.sa.

Husham Farouk Ismail – teacher, medical college INAIA, Riyadh, Saudi Arabia; e-mail: info@inaya.edu.sa.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Носова, Я. В. Определение микрохарактеристик воздушного потока в носовой полости при дыхании / **Я. В. Носова, О. Г. Аврунин, Х. И. Фарук** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 122-127. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.19.

Please cite this article as:

Nosova, Ya., Avrunin, O., Farouk, H. Determination of microcharacteristics of air flow in the nasal cavity during breathing. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 122-127, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.19.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Носова, Я. В. Визначення мікрохарактеристик повітряного потоку в носовій порожнині при диханні / **Я. В. Носова, О. Г. Аврунин, Х. И. Фарук** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 122-127. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.19.

АНОТАЦІЯ Стаття присвячена визначенню ступеня травматизації слизової оболонки носової порожнини з турбулентним повітряним потоком. Прохід повітря через верхній носовий хід забезпечує доставку молекул одоривертора в чутливі області нюхового аналізатора. Вивчення характеристик повітряного потоку в верхньому носовому проході дозволяє визначити межі пристінкового ламінарного повітряного підслою та вивчити назальну аеродинаміку на мікрорівні. Турбулентний потік сприяє надмірному висушуванню слизової оболонки носової порожнини, що призводить до її морфологічної перебудови до субтрофного процесу. Було виявлено, що товщина ламінарного підслою становить близько 1 мм, тому прошарок слизової оболонки піддається сушці із збільшенням турбулентності течії в місцях звуження носової порожнини (нюхової щілини).

Ключові слова: повітряний потік; нюхова щілина; ламінарний пристінковий шар; слизова оболонка; носова порожнина; турбулентний потік

Поступила (received) 02.05.2018