

УДК 004.932:616-089.844

# РАСЧЕТ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПОКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ РИНОПЛАСТИКИ

Ю. В. Книгавко

Младший научный сотрудник\*

E-mail: yukni@mail.ru

О. Г. Аврунин

Профессор\*

E-mail: gavrun@list.ru

Х. И. Фарук

Аспирант\*

E-mail: bykh@kture.kharkov.ua

\*Кафедра биомедицинской инженерии

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

*У статті описується метод розрахунку функціональних показників, які визначають достатність або недостатність вентиляції легенів при диханні носом і, тим самим, наявність або відсутність показань для проведення ринопластики у пацієнтів з вродженими або набутими структурними патологіями верхніх дихальних шляхів*

*Ключові слова: ринопластика, верхні дихальні шляхи, аеродинамічний опір, сегментація зображення*

*В статье описывается метод расчета функциональных показателей, которые определяют достаточность или недостаточность вентиляции легких при дыхании носом и, тем самым, наличие или отсутствие показаний для проведения ринопластики у пациентов с врожденными или приобретенными структурными патологиями верхних дыхательных путей*

*Ключевые слова: ринопластика, верхние дыхательные пути, аэродинамическое сопротивление, сегментация изображения*

## 1. Введение

Некоторые факторы, например, травмы, врожденные дефекты и др. могут приводить к тому, что те или иные анатомические структуры носа изменяются, причем в ряде случаев такие изменения приводят и к изменению функциональных параметров, характеризующих дыхание. В отоларингологии такие изменения могут быть основанием для проведения ринопластики. Обычно поступление воздуха в легкие обеспечивается дыханием через нос. Однако в некоторых случаях (например, травмы, воспаления верхних дыхательных путей и др.) для обеспечения поступления необходимого количества воздуха человек вынужден использовать и рот. Такой вариант обеспечения дыхания нефизиологичен. Это связано с тем, что при дыхании носом воздух проходит через полости с участками, имеющими большую площадь сечения, вследствие чего обеспечивается медленное движение воздуха на этих участках дыхательной системы, что, в свою очередь, обуславливает эффективный захват пылевых частиц и микроорганизмов [1] с последующим их обезвреживанием и выведением, а также прогрев поступающего воздуха в холодное время года.

Использование рта для дыхания приводит к попаданию холодного воздуха, пыли и болезнетворных микроорганизмов в трахею, бронхи и легкие, что часто является причиной респираторных заболеваний.

Функциональность системы воздухопроводящих путей носа (ВПН) определяется тем, могут ли они обеспечить необходимый человеку расход воздуха, т.е. объемную скорость тока воздуха [2] (или иначе – объем воздуха, проходящего через сечение ВПН за единицу времени) при той разности давлений на концах ВПН, при которой легкие, создающие эту разность давления, могут длительно работать без усталости.

Если нет, то функция ВПН недостаточна, что является показанием к ринопластике.

## 2. Актуальность темы

Причиной затруднений с дыханием носом при изменениях вышеупомянутых анатомических структур является изменение (увеличение) аэродинамического сопротивления (АС) некоторых участков дыхательных путей.

В связи с этим, актуальной является задача оценки указанного АС, каковая оценка может быть получена на основе анализа результатов компьютерного томографического исследования головы пациента.

Измеряя на изображениях последовательно полученных томографических срезов (с малым шагом между ними) значения площадей и периметров ВПН, можно, тем самым, получить информацию, необходимую для расчета величины АС [3, 4].

### 3. Оценка физиологических параметров дыхания

Расчет усложняется тем, что при ламинарном движении воздуха и при турбулентном его движении формулы расчета АС различаются. Есть данные [5-7] о том, что в области ноздрей и хоан движение воздуха является турбулентным. Вместе с тем, движение воздуха в полостях раковин является медленным, что позволяет предполагать ламинарный характер этого движения (по крайней мере, в норме). Кроме того, в различных функциональных состояниях (сон, бодрствование, физическая активность, эмоциональные нагрузки и др.) частота дыхания, а значит, и расход воздуха может принимать существенно различные значения. Поэтому вопрос о характере движения воздуха в различных участках ВПН в тех или иных функциональных состояниях нуждается в дополнительном исследовании.

При вдыхании воздуха он проходит через парные (левые и правые) системы воздухопроводящих путей, состоящих из ноздрей, полостей раковин и хоан. АС полостей раковин в норме мало по сравнению с другими отделами ВПН, однако в некоторых случаях и его надо учитывать.

Рассмотрим одну из указанных парных систем ВПН (например, левую).

Пусть в этой системе плоскости компьютерных срезов, разделяющих участки ВПН, будут перпендикулярны прямой, проходящей через геометрические центры полости ВПН в начале ноздри и полости ВПН в конце хоаны.

АС некоторого участка ВПН зависит от длины, площади поперечного сечения и гидравлического диаметра этого участка, плотности воздуха, а также коэффициента, определяющего гидравлическое трение в рассматриваемом участке.

Пусть  $\Delta A_{i,л}$  аэродинамическое сопротивление  $i$ -го участка левого воздухопроводящего пути. Если пренебречь местными сопротивлениями, то для определения величины  $\Delta A_{i,л}$  можно использовать следующую формулу:

$$\Delta A_{i,л} = \frac{\lambda_i \rho \Delta L_i}{2 d_{гi} S_i^2}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - коэффициент Дарси (коэффициент гидравлического трения) в  $i$ -м слое;

$\rho$  - плотность воздуха;

$\Delta L_i$  - толщина  $i$ -го слоя;

$S_i$  - средняя по слою площадь полости в  $i$ -м слое;

$d_{гi}$  - гидравлический диаметр этой полости в  $i$ -м слое.

Если сечение полости не круглое, величину  $d_3$  можно рассчитать по формуле:

$$d_{гi} = \frac{4S_i}{\Pi_i}, \quad (2)$$

где  $\Pi_i$  - длина периметра полости в  $i$ -м слое.

Используя выражение (2), формулу (1) можно преобразовать к виду:

$$\Delta A_{i,л} = \frac{\lambda_i \rho \Delta L_i \Pi_i}{8S_i^3}. \quad (3)$$

Основной проблемой при дальнейших расчетах является то, что величина  $\lambda$  зависит от того, является ли движение воздуха в данном слое ламинарным или турбулентным. Кроме того, сама зависимость между расходом воздуха в этом слое и АС этого слоя также зависит от ламинарности или турбулентности движения воздуха, причем характер этого движения а priori неизвестен.

В связи с этим общий алгоритм расчета при компьютерном определении функциональной состоятельности ВПН может быть следующим:

1) задаемся расходом воздуха ( $Q$ ), необходимым человеку при активной деятельности;

2) предполагаем, что  $Q_{л} = Q_{п} = \frac{Q}{2}$  (здесь индексы «л» и «п» относятся к левым и правым ВПН соответственно);

3) зная значения расхода воздуха для левых и правых ВПН, определяем для каждого слоя характер движения воздуха;

4) исходя из известного характера движения воздуха, вычисляем для каждого слоя значения параметра  $\lambda$  и величину  $\Delta A_i$ ;

5) используя вычисленные значения  $\Delta A_i$ , определяем значения  $\Delta p_i$ , т.е. величины изменения давления в каждом слое;

6) суммируя отдельно величины  $\Delta p_i$  вдоль левого и правого ВПН, находим расчетные значения  $\Delta P_{л}$  и  $\Delta P_{п}$ , т.е. общие разности давления на левом и правом ВПН.

Если эти значения совпадают ( $\Delta P_{л} = \Delta P_{п}$ ), то это значит, что левые и правые ВПН эквивалентны и величины  $Q_{л}$  и  $Q_{п}$  выбраны правильно. Если, что более вероятно, они не совпадают, то это значит, что величины  $Q_{л}$  и  $Q_{п}$  выбраны неправильно и должны быть изменены. Так, если  $\Delta P_{л} > \Delta P_{п}$ , то  $Q_{л}$  должно быть уменьшено на некоторую величину  $\Delta Q$ , а  $Q_{п}$  - увеличено на эту же величину  $\Delta Q$ . После этого должен быть пересчитаны величины  $\Delta P_{л}$  и  $\Delta P_{п}$ . Если они опять не совпадают, необходимо снова изменить значения  $Q_{л}$  и  $Q_{п}$  и снова рассчитать значения величин  $\Delta P_{л}$  и  $\Delta P_{п}$ . Такой перерасчет должен производиться до тех пор, пока модуль разности величин  $\Delta P_{л}$  и  $\Delta P_{п}$  не станет допустимо малой величиной.

Проце всего при перерасчете принимать  $\Delta Q_{j+1} = \pm \frac{\Delta Q_j}{2}$ , где  $j$  - номер итерации при подборе необходимых значений  $Q_{л}$  и  $Q_{п}$ . Разумеется величина  $\frac{\Delta Q_j}{2}$  должна быть положительной для того ВПН, для которого величина  $\Delta P$  меньше, и отрицательной - для того, для которого  $\Delta P$  больше.

Теперь рассмотрим процедуру определения характера движения воздуха в слое и вычисления величины  $\Delta p_i$  для этого слоя.

Исходя из принятого для данного ВПН значения величины  $Q$  и определенного с помощью компьютерного расчета значения  $S_i$ , вычисляем усредненную по сечению скорость ( $v_i$ ) движения воздуха в  $i$ -м слое по формуле:

$$v_i = \frac{Q}{S_i}. \quad (4)$$

Затем для этого слоя вычисляем значения числа Рейнольдса ( $Re_i$ ) по формуле:

$$Re_i = \frac{v_i d_{vi}}{\nu} = \frac{4v_i S_i}{\nu \Pi_i}, \tag{5}$$

где  $\nu$  - кинематическая вязкость воздуха.

Если полученное значение числа Рейнольдса больше критического значения (т.е.  $Re_i > Re_{кр}$ , где  $Re_{кр} = 2300$  - критическое значение числа Рейнольдса), то движение воздуха в данном слое является турбулентным. Если же  $Re_i < Re_{кр}$ , то движение воздуха является ламинарным.

Теперь значение величины  $\lambda_i$  для  $i$ -го слоя может быть рассчитано либо по формуле  $\lambda_i = \frac{64}{Re_i}$ , если движение воздуха ламинарное, либо по формуле  $\lambda_i = \frac{0,32}{(Re_i)^{0,25}}$ , если движение воздуха турбулентное.

Определив значение величины  $\lambda_i$ , можно вычислить и величину  $A_i$ .

Следующим шагом должно стать вычисление величины  $\Delta p_i$ , т.е. перепада давления в  $i$ -м слое. Если величина расхода воздуха в этом воздухопроводящем пути равна  $Q$ , то значение величины  $\Delta p_i$  рассчитывается либо по формуле  $\Delta p_i = Q \cdot A_i$ , если движение воздуха в этом слое является ламинарным, либо по формуле  $\Delta p_i = Q^2 \cdot A_i$ , если движение является турбулентным.

Пусть как в левом, так и в правом ВПН число слоев, ограниченных соседними срезами, равно  $N$ . Тогда общее значение величины  $\Delta P$  для одного из парных ВПН можно вычислить по формуле:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N \Delta p_i. \tag{6}$$

Формула (6) с учетом предыдущих выкладок решает задачу вычисления общего перепада давления на каждом из парных ВПН при заданном расходе воздуха, после чего применение вышеописанной итерационной процедуры позволяет вычислить общее для обоих ВПН значение  $\Delta P$  и, тем самым, установить наличие или отсутствие показаний для проведения ринопластики.

**4. Определение геометрических характеристик ВПН по данным компьютерной томографии**

Оценка геометрических характеристик верхних дыхательных путей осуществляется за счет программного анализа виртуальных трехмерных моделей, построенных по результатам компьютерной обработки томографических данных головы пациента (рис. 1, 2) [8, 9].

Выделение и разметка элементов изображения срезов, соответствующих ВПН происходило за счет пороговой заливки четырехсвязных областей, производимой после ручного задания начальных точек заливки. Данная операция возможна благодаря тому, что поглощение рентгеновского излучения в элементах объема (а, следовательно, и яркость соответствующего

вокселя), заполненных воздухом значительно ниже, чем в мягких или твердых тканях головы человека. Поскольку носовые ходы связаны с пазухами через особые ходы и соустья, после операции заливки связанных воздухоносных областей пазухи также оказываются сегментированы.

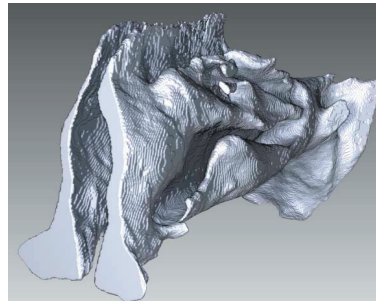


Рис. 1. Трехмерная полигональная модель ВПН

Поэтому для того, чтобы те элементы томографического объема, которые не соответствуют носовым ходам, не являлись подмножеством сегментированных вокселей, необходимо после окончания заливки проводить операцию интерактивного удаления областей, представляющих придаточные пазухи и соустья, либо задавать положение особых ограничителей, которые не позволяют наращивать сегментированную область внутрь пазух носа.

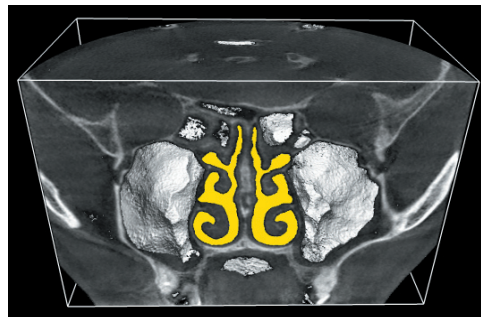


Рис. 2. Объемная визуализация ВПН по данным компьютерной томографии

После завершения программной сегментации ВПН проводится автоматизированный подсчет количества сегментированных вокселей в срезах фронтальной проекции (рис. 3).

N=119	N=168	N=217	N=266	N=315
N=364	N=413	N=462	N=511	N=562

Рис. 3. Результаты сегментации ВПН на томографических срезах головы во фронтальной проекции

Результаты подсчета распределения площади ВПН (S) в зависимости от среза (N) представлены графиком на рис. 4. Данный график иллюстрирует практически монотонно возрастающую величину площади сечения ВПН в коронарной проекции с увеличением номера среза.

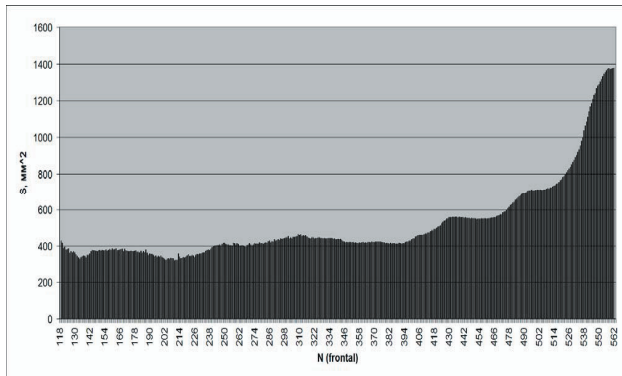


Рис. 4. График распределения площади сегментированных ВПН на коронарных томографических срезах (зависимость S от N)

Аналогичный график был построен и для срезов сагитальной проекции томографического датасета (рис. 5).

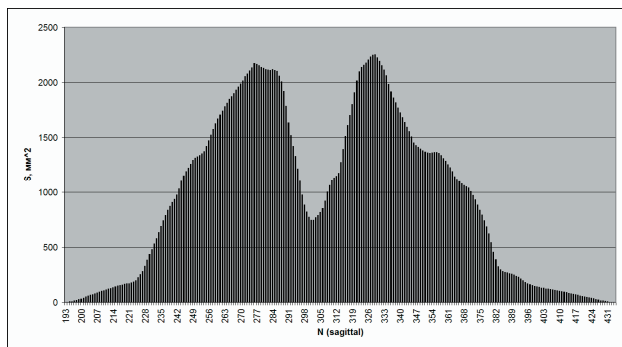


Рис. 5. График распределения площади сегментированных ВПН на срезах сагитальной проекции (зависимость S от N)

Симметричность графика позволяет оценить эквивалентность левых и правых носовых ходов, обнаружить искривления носовой перегородки, а также убедиться в отсутствии пространственных патологий верхних дыхательных путей, влияющих на структуру ВПН.

## 5. Выводы

Пластические вмешательства в области носа человека зачастую должны учитывать не только эстетические предпочтения оперируемого в отношении его будущей внешности, но также и функциональные параметры дыхания пациента [10].

Комплексная оценка физиологических характеристик дыхания, а также оценка геометрии верхних дыхательных путей должна лежать в основе новых разрабатываемых методов компьютерного планирования вмешательств в области носа человека при подготовке к операциям, показаниями к которым являются травмы и структурные патологии дыхательного аппарата человека.

Перспективой работы является создание программного обеспечения, выполняющего расчет аэродинамической модели верхних дыхательных путей по результатам обработки томографических данных и интеграция данного программного обеспечения с программными комплексами, реализующими компьютерное предоперационное планирование вмешательств в области носа и верхних дыхательных путей.

## Литература

1. Yu G. Fluid Flow and Particle Diffusion in the Human Upper Respiratory System [Текст] / G. Yu, Z. Zhang, R. Lessman // *Aerosol Science and Technology*. – 1993. - С. 146-158.
2. Hanh I. Velocity Profiles Measured for Airflow Through a Large-Scale Model of the Human Nasal Cavity [Текст]/ I. Hanh, P. Scherer, M. Mozell // *Modeling in Physiology*. – 1993. – С. 2273-2287.
3. Keyhani, K. Numerical simulation of airflow in the human nasal cavity [Текст] / K. Keyhani, P.W. Sherer, M.M. Mozell // *Journal of biomechanical engineering*.- 1995.- С. 429-441.
4. Naftali, S. Transport Phenomena in the Human Nasal Cavity: A computational Model [Текст] / S. Naftali, R.C. Schrotter, R.J. Shiner, D. Elad // *Annals of Biomedical Engineering*. -1998. – С. 831-839.
5. Пискунов, В.С. Исследование аэродинамики воздушного потока в полости носа [Текст] / В.С. Пискунов // *Рос. Ринолог.* – 2000. - №2. – С. 12-15.
6. Elad, D. Analysis of Air Flow Patterns in the Human Nose [Текст] / D. Elad, R. Liebenthal, S. Eivan, B.I. Wenig // *Medical & Biological Engineering & Computing*. -1993. -С. 585-592.
7. Yu, G. Computer Simulation of the Flow Field and Particle Deposition by Diffusion in 3D Human Airway Bifurcation [Текст] / G. Yu, Z. Zhang, R. Lessman // *Aerosol Science and Technology*. – 1996. - С. 338-352.
8. Кукуня, Л.А. Трехмерная визуализация в компьютерной томографии: взгляд в будущее [Текст]/ Л.А. Кукуня // *Український медичний часопис*.– 2000.– №3(17).– С. 84-86.
9. Поммерт, А. Визуализация объема в медицине [Текст] / Поммерт А., Пфлессер Б., Риермер М. // *Открытые системы*. – 1996. - №5(19). – С. 56-61.
10. Аврунин, О.Г. Принципы компьютерного планирования функциональных оперативных вмешательств [Текст] / О.Г. Аврунин // *Технічна електродинаміка, тем. Випуск «Силова електроніката енергоефективність»*.-2011.-№2.- С. 293-298.