

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В ПОЛОСТИ НОСА

О.Г. Аврунин

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Кафедра БМЭ, ХНУРЭ, пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166, Украина
тел. (057) 7021-364, E-mail: gavrun@list.ru

Annotation – Possibilities of CT-imaging for functional diagnostic of nasal respiration are described. The method of evaluation a hydraulically diameter and a Reynolds number of nasal airflow is proposed. Possibilities and perspectives of this method for diagnostic of nasal diseases and surgery planning of septoplasty are discussed.

Key words – CT-imaging, sinonasal diseases, Reynolds number, nasal airway, nasal aerodynamic, rhinomanometry.

ВВЕДЕНИЕ

Своевременная диагностика нарушений функций верхних дыхательных путей способствует устранению причин хронических заболеваний носа и околоносовых пазух, которыми по данным статистики страдает более 7% взрослого населения даже в высокоразвитых странах [1]. В рамках концепции доказательной медицины существует проблема обеспечения функциональной диагностики верхних дыхательных путей количественными параметрами и критериями, основанными на объективных инструментальных методах исследования [1-4]. Причем, если методы интраскопической визуализации с успехом применяются в диагностике заболеваний носа и околоносовых пазух [5-6], то функциональные исследования аэродинамики носа (риноманометрия) крайне редки и не являются стандартом по сравнению, например, со спирометрией при исследовании функции легких.

Поэтому на современном этапе актуальными задачами являются расширение диагностических возможностей методов обследований для получения максимально объективной информации об исследуемом органе и обоснование целесообразности применения данных методов при диагностике конкретных патологий.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей современной реконструктивной эндоринопластики является восстановление нормальной дыхательной функции носа. Оперативное вмешательство, как правило, направлено на улучшение воздушной проводимости носа и устранение участков носовой полости, имеющих наибольшее сопротивление воздушному потоку [2-4]. При этом проведение хирургического планирования невозможно без точного определения аэродинамических характеристик верхних дыхательных путей. Первостепенной задачей при этом является точное определение режима течения воздуха в носовой полости, от знания которого будут зависеть дальнейшие этапы хирургического планирования, связанные с определением объема вмешательства и локализации структур, подлежащих хирургическому воздействию.

Верхние дыхательные пути являются анатомическим образованием со сложнейшей пространственной конфигурацией воздухоносных каналов - носовых ходов. Поэтому представляет интерес рассмотрение характера изменения гидравлического диаметра по длине носового канала.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведение аэродинамических расчетов выполнялось по исходным томографическим данным, полученным с помощью спирального рентгеновского компьютерного томографа Somatom+ (Siemens) при стандартной укладке пациента. В результате томографического обследования пациента формируется набор дискретных значений коэффициентов линейного ослабления рентгеновского излучения ткани в элементе объема (вокселе) конечного размера с координатами (i, n, k) .

Полученная воксельная модель представляется пространственной дискретной функцией интенсивности $V(i, n, k) \in [0, 255]$ при $i \in [0..i_{max}-1]$, $n \in [0..n_{max}-1]$, $k \in [0..k_{max}-1]$. Выходными данными при этом являются наборы изображений томографических срезов $B_k(i, j) = V(i, j, k)$, выполненных в аксиальной проекции параллельно плоскости основания черепа при фиксированном k для каждого среза. Пример аксиального томографического среза на уровне носовой полости приведен на рис.1. Пространственное разрешение h_Z составляло 2 мм по Z -координате (расстояние между срезами) и $h_{XY} = 0,4$ мм - в аксиальной плоскости XOY .

Режим течения воздуха определяется с помощью безразмерного числа Рейнольдса [7, 8]:

$$Re = \frac{v \cdot d_2}{\nu}, \quad (1)$$

где v – скорость течения воздуха в канале;
 ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха;
 d_2 – гидравлический диаметр, определяемый по формуле:

$$d_2 = \frac{4S}{\Pi}, \quad (2)$$

где S – площадь сечения канала;
 Π – смоченный периметр носового канала.

В зависимости от значения числа Рейнольдса можно определить режим течения воздуха (ламинарный или турбулентный), знание которого необходимо для расчета местных аэродинамических сопротивлений в носовой полости и, соответственно, планирования оперативного вмешательства по устранению критических участков.

Для определения режима течения воздуха в полости носа необходимо выполнить построение сечений носового канала, перпендикулярных движению воздуха, определить их площади и смоченные периметры, провести расчет числа Рейнольдса и сравнить его величину с критическим значением.



Рис. 1

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения геометрических характеристик сечений носового канала выполнялось построение мультипланарных реконструкций томографических данных во фронтальной плоскости – перпендикулярно течению воздуха в носовой полости: $C_n(i, k) = V(i, n, k)$ при фиксированном n для каждого среза. Схематические изображения плоскостей исходных аксиальных томографических срезов B_k и мультипланарных фронтальных реконструкций C_n приведены на рис.2.

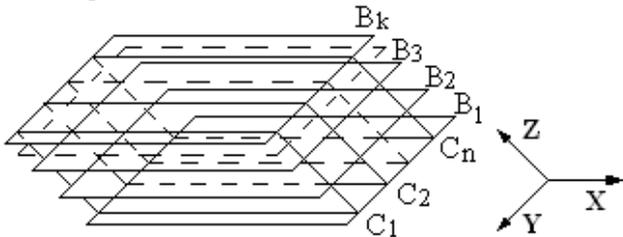


Рис. 2

Иллюстрация мультипланарной реконструкции в плоскости, перпендикулярной носовым ходам, приведена на рис.3.



Рис. 3

Следующим этапом проводилась сегментация воздухоносных полостей верхних дыхательных путей. Учитывая, что воздух имеет существенно меньшую плотность по сравнению с мягкими тканями и костными структурами, сегментацию целесообразно проводить пороговым методом путем определения порогового значения T интенсивности, соответствующего обла-

стям минимальной плотности (конкретные значения порога зависят от выбранного окна и режима визуализации). Результатом процесса сегментации сечений носового канала является построение в автоматическом режиме для каждой мультипланарной реконструкции $C_n(i, k)$ N бинарных характеристических функций вида:

$$H_n(j, k) = \begin{cases} 1; & \text{при } C_n(j, k) < T; \\ 0; & \text{при } C_n(j, k) \geq T, \end{cases} \quad (3)$$

$$m \in [1, N], \quad N = \frac{l}{h_{XY}},$$

где l – длина носового хода в мм (составляет в среднем порядка 70 мм).

На полученных в результате сегментации по формуле (3) изображениях происходило интерактивное удаление областей, принадлежащих придаточным пазухам носа, и их соустьям. Далее проводилось вычисление площадей и смоченных периметров сечений носовых каналов, вычисляемых для каждой реконструкции по формулам:

$$S = M_S \cdot h_{XY}^2, \quad (4)$$

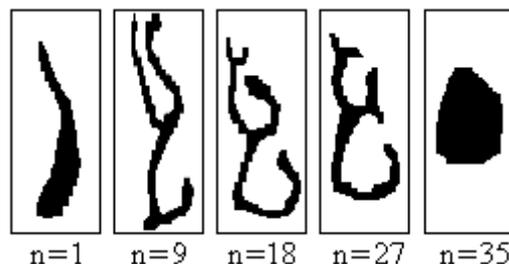
$$P = M_P \cdot h_{XY}, \quad (5)$$

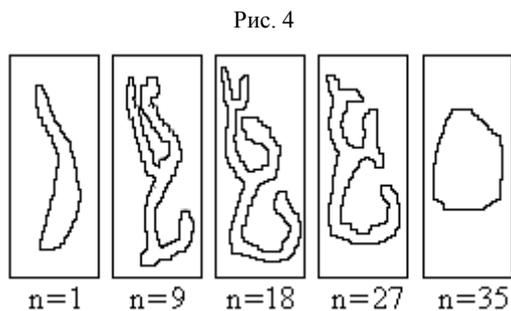
где M_S – количество элементов изображения, принадлежащих сечению носового канала;

M_P – количество элементов изображения, принадлежащих смоченному периметру сечения носового канала. Расчеты проводились по формулам (4) и (5) с учетом масштабного коэффициента, компенсирующего различие пространственного разрешения по соответствующим координатам при построении мультипланарных реконструкций. При определении количества элементов изображения, принадлежащих смоченному периметру M_P , в каждом сечении носового канала проводилась локальная обработка сегментированных изображений дифференцирующим скользящим окном вида:

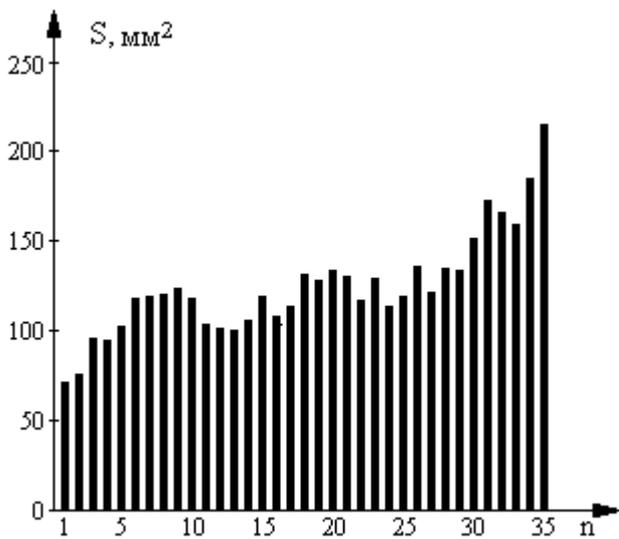
$$F = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

с последующим инвертированием. Результаты сегментации характерных сечений носового хода (для левой стороны носа) и их смоченных периметров приводятся на рис.4 и рис.5 соответственно (n – номера сечений). При этом конфигурация сечений носового канала на входе имеет щелевидно-эллиптическую форму, далее условно разделяется на нижний, средний и верхний носовые ходы, которые на выходе в носоглотку объединяются в широкое овальное отверстие – хоану.



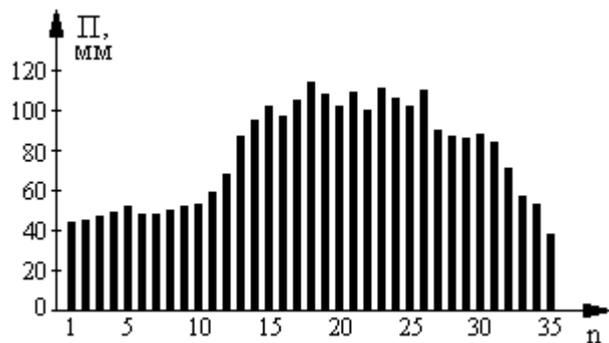


Проведем анализ полученных геометрических характеристик сечений носового хода. Как видно из изображенного на рис.6 распределения площади S сечений носового канала по 35 срезам, выполненных с шагом 2 мм, площадь сечений практически монотонно возрастает от значения 70 мм^2 на входе в носовой канал до максимальной - площади хоаны, составляющей более 200 мм^2 .



На рис.7 приводится график распределения смоченного периметра Π по сечениям носового канала. В соответствие с конфигурацией сечений носового канала (см. рис.5) смоченный периметр сечений имеет максимум приблизительно в середине длины канала, и снижается при приближении к хоане (см. рис.7). Максимальное значение смоченного периметра составляет 118 мм.

На рис.8 приводится график изменения гидравлического диаметра d_c по сечениям носового канала, рассчитанного по формуле (2). Как видно из рис.8 на входе и выходе из носового канала гидравлический диаметр достигает максимального значения; минимум значения гидравлического диаметра наблюдается в центральных сечениях. Глобальный максимум гидравлического диаметра составляет порядка 20 мм на уровне хоаны.



При этом представляет интерес сравнение полученных гидравлических диаметров с аналогичными параметрами для характерных объектов: плоской щели:

$$h_c \ll l_c, \quad (7)$$

где h_c - высота щели, l_c - длина щели,

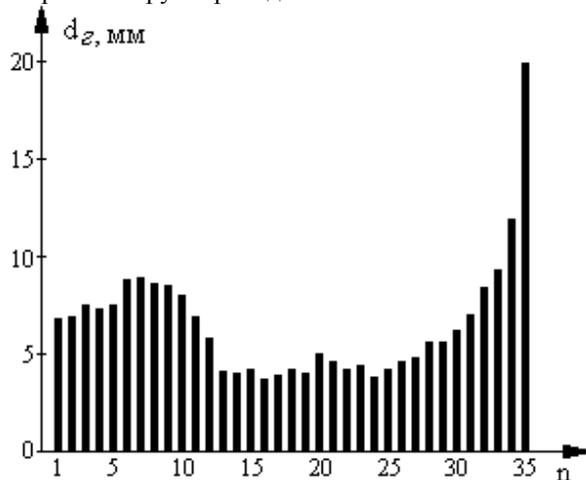
а гидравлический диаметр d_{zc} щели равен удвоенной ее высоте (2):

$$d_{zc} = \frac{4h_c \cdot l_c}{2 \cdot h_c + 2l_c} \approx 2h_c; \quad (8)$$

трубопровода круглого сечения, для которого гидравлический диаметр d_{zm} равен диаметру d_m этого трубопровода:

$$d_{zm} = \frac{4\pi \cdot d_m^2}{4\pi \cdot d_m} = d_m. \quad (9)$$

Так, входное сечение носового канала (при $n=1$) можно считать плоской щелью: $l_c=34 \text{ мм}$, $h_c=4,8 \text{ мм}$; $l_c / h_c \approx 7$, $d_{zc} \approx 9,6 \text{ мм}$, что сопоставимо с непосредственно рассчитанным значением $d_z=7 \text{ мм}$ (см. рис.8). Для круглого сечения на выходе носового хода (при $n=35$) диаметр и, соответственно, гидравлический диаметр составляют 15 мм, что так же сопоставимо с непосредственно рассчитанным значением $d_z=19,5 \text{ мм}$ (см. рис.8). Это позволяет использовать для определения аэродинамических сопротивлений стандартные методики расчета трубопроводов.



При расчете числа Рейнольдса (1) значение коэффициента ν кинематической вязкости воздуха определяется по формуле:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (10)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости воздуха, значение которого при нормальных атмосферных условиях по ГОСТ 19862: температуре 20°C и давлении 760 мм рт. ст. составляет $1,81 \cdot 10^{-5}$ Н·с/м² [7, 8]; ρ - плотность воздуха, значение которой при нормальных условиях составляет $1,205$ кг/м³.

Таким образом, значение коэффициента ν кинематической вязкости воздуха при нормальных атмосферных условиях составляет согласно (10) $1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Следует отметить, что коэффициент кинематической вязкости воздуха в 15 раз больше, чем у воды.

Скорость течения воздуха по носовому каналу определяется по формуле:

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (11)$$

где Q - расход воздуха через носовой канал.

С учетом формул (2) и (11) число Рейнольдса (1) можно определить следующим образом:

$$Re = \frac{v \cdot d_e}{\nu} = \frac{Q \cdot 4S}{S \cdot \nu \cdot \Pi} = \frac{4Q}{\nu \cdot \Pi}. \quad (12)$$

После подстановки значения коэффициента кинематической вязкости (10) в формулу (12) получаем формулу для вычисления числа Рейнольдса:

$$Re = 2,7 \cdot 10^5 \frac{Q}{\Pi}. \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что число Рейнольдса зависит только от расхода воздуха и смоченного периметра. Задавая расход воздуха в носовом канале в диапазоне реальных значений от 0,3 до 2 л/с [2, 3] и определив предварительно периметры сечений каналов согласно формуле (5), проводим расчет чисел Рейнольдса. На рис. 9 приведены графики изменения чисел Рейнольдса в зависимости от длины l носового канала при расходе воздуха 0,3 л/с – кривая 1, 1 л/с – кривая 2 и 2 л/с – кривая 3. Расходу 0,3 л/с соответствует режим спокойного дыхания, 1 л/с – форсированного, 2 л/с – максимально форсированного. Диапазон значений чисел Рейнольдса при этом составляет от 650 до 13500. Поток является ламинарным при $Re < Re_{кр}$ и турбулентным – в противном случае. Для труб круглого сечения и резиновых рукавов $Re_{кр} = 1600 \dots 2300$ [7-8].

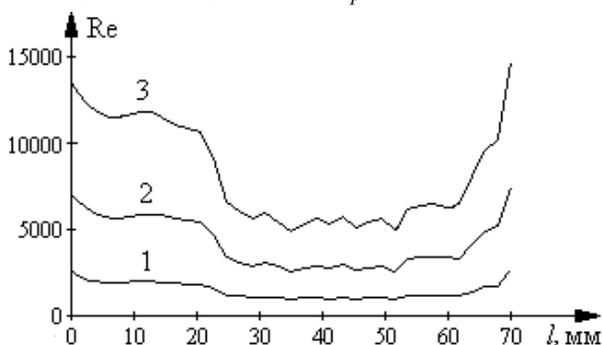


Рис. 9
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для хирургического планирования ринопластики необходимо знать режим течения воздуха в носовой

полости. При этом актуальной задачей является изучение характера изменения гидравлического диаметра носового канала, что вызвано переменным характером его поперечных сечений по длине и их сложной анатомической формой. Максимумы значений гидравлического диаметра (см. рис. 8) наблюдаются при щелевидной форме сечения на входе в носовой канал и при почти круглой - на выходе в носоглотку, что объясняется малыми смоченными периметрами данных сечений, по сравнению со срединными, которые условно разделяются на носовые ходы. При анализе изменения числа Рейнольдса по сечениям (см. рис. 9) можно сделать вывод, что наибольшие турбулентности возникают при входе и выходе из носового канала. При спокойном дыхании режим течения воздуха в верхних дыхательных путях можно считать ламинарным, при форсированном – турбулентным. Расчеты проводились для каждого носового канала при обследовании 17 пациентов в оториноларингологическом отделении Харьковской областной клинической больницы.

Перспективой работы является разработка методов хирургического планирования ринопластики, позволяющих на основе анатомического и функционального картирования верхних дыхательных путей определять объем вмешательства и расположение структур, подлежащих хирургическому воздействию.

[1] Станкевич Н. Я. *Лучевая диагностика поврежденных и заболеваний околоносовых пазух* // Новости лучевой диагностики.- 1998.- № 4.- С. 8-9.

[2] Keyhani K., Sherer P.W., Mozell M.M. *Numerical simulation of airflow in the human nasal cavity*// Journal of biomechanical engineering.- 1995.- Vol. 117.- P. 429-441.

[3] Козлов В.С., Державина Л.Л., Шиленкова В.В. *Акустическая ринометрия и передняя активная ринометрия в исследовании носового цикла*// Российская ринология.- 2002.- № 1.- С. 4-11.

[4] Безшапочний С.Б., Лобурец В.В. *Ендоскопічна ендоназальна функціональна хірургія: достоїнства, недоліки, перспективи*// Ринологія.- 2002.- № 2.- С. 3 - 10.

[5] Щурук Г.З. *Можливості використання комп'ютерної томографії з об'ємною реконструкцією в діагностиці захворювань порожнини носа, навколоносових пазух і лицьового черепа* // Журнал вушних, носових і горлових хвороб.- 2001.- № 2.- С. 64 - 69.

[6] Гарюк Г.И., Меркулов А.Ю. и др. *Опыт применения спиральной компьютерной томографии с последующей виртуальной эндоскопией для планирования малоинвазивных хирургических вмешательств в ринологии* // Ринологія.- 2004.- № 3.- С. 32-34.

[7] *Справочник по гидравлическим расчетам*. Под ред. П.Г. Киселева. Изд. 5-е. М., «Энергия», 1974. – 312 с.

[8] *Элементы и устройства пневмоавтоматики высокого давления. Отраслевой каталог*. Под ред. А.И. Кудрявцева.- М. ВНИИгидропривод: ВНИИТЭМР.- 1990.- 184 с.