

УДК 616.214-073.756.8.004

*Н.О. Шушляпина, О.Г. Аврунин**

Харьковский национальный медицинский университет

**Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ НОСОВЫХ ХОДОВ ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Представлены характерные размеры поперечных сечений носовой полости (по данным КТ) соответствующими гидравлическими диаметрами и рассмотрен характер их изменения по длине носовых ходов при различных режимах дыхания (по данным риноманометрии). Введено понятие гидравлического диаметра, которое характеризует отношение площади сечения к его периметру. Максимумы значений гидравлического диаметра наблюдаются при щелевидной форме сечения на входе в носовую полость и при почти круглой на выходе в носоглотку (у хоан), что объясняется малыми периметрами данных сечений по сравнению со срединными, особенно выраженными в обонятельной области. Наибольшая турбулизация потока наблюдается при входе и выходе из носовых ходов, непосредственно в самой полости носа происходит уменьшение турбулентности, что связано с увеличением периметра сечений воздушного канала и соответствующим уменьшением их гидравлических диаметров.

Ключевые слова: гидравлический диаметр, полость носа, риноманометрия, компьютерная томография.

При принятии клинических решений необходимо руководствоваться наиболее достоверными данными эффективности методов диагностики и лечения. На сегодняшний день существует проблема обеспечения функциональной диагностики заболеваний верхних дыхательных путей количественными характеристиками, основанными на объективных дополнительных методах исследования [1–4]. При этом на первый план выходит знание физических характеристик дыхания, без которых невозможно диагностировать нарушение носового дыхания и связанное с ним нарушение обоняния [5, 6]. Поэтому на современном этапе актуальными являются задачи расширения диагностических возможностей методов исследований для получения максимально объективной информации о состоянии носовой полости и обоснование целесообразности применения численных критериев при дифференциальной диагностике дыхательно-обонятельных нарушений.

Частой причиной затруднения носового дыхания является нарушение анатомической структуры полости носа, в результате чего изменяется сопротивление воздушному потоку, и в большинстве случаев в сторону его

увеличения [2–4]. Кроме того, в различных функциональных состояниях (физическая активность, сон и т. д.) расход и связанный с ним характер движения воздуха могут принимать различные значения. Поэтому вопрос о режиме движения воздуха в различных участках носовой полости нуждается в дополнительных исследованиях.

Довольно часто клиницисты оценивают нарушения дыхательной функции только по данным риноманометрии и компьютерной томографии [3, 7, 8]. Первый метод позволяет получить усредненные значения действующих перепада давления и расхода воздуха в носовой полости. Второй метод позволяет оценить архитектуру внутриносовых структур. Однако результаты этих исследований, как правило, рассматриваются обособленно, что не позволяет на основе объединения их результатов получить действующие значения скоростей потока в каждом сечении носовой полости. Поэтому дополнение результатов анатомического картирования показателями дыхания особенно актуально при планировании функциональных ринохирургических вмешательств, которые должны быть направлены на коррекцию анатомических структур

© Н.О. Шушляпина, О.Г. Аврунин, 2015

носовой полости, создающих наибольшее сопротивление воздушному потоку [2, 8, 9]. Кроме того, следует учитывать, что проведение хирургического планирования функциональных вмешательств невозможно без точного определения аэродинамических характеристик верхних дыхательных путей с учетом их сложнейшей пространственной конфигурации. Поэтому целесообразно представить характерные размеры поперечных сечений носовой полости (по данным КТ) соответствующими гидравлическими диаметрами и рассмотреть характер их изменения по длине носовых ходов при различных режимах дыхания (по данным риноманометрии). Понятие гидравлического диаметра, характеризующее отношение площади сечения к его периметру, было введено при описании течения жидкостей и газов для представления среднего геометрического размера каналов, форма поперечного сечения которых отличается от круглой [10].

Материал и методы. Под наблюдением в отоларингологической клинике ХНМУ находились 11 больных в возрасте от 18 до 60 лет с обонятельными нарушениями респираторного генеза, у которых исследовали нос и придаточные пазухи с помощью конусно-лучевой КТ. Исходными данными служили наборы томографических срезов (dataset). Расчеты проводились для каждого носового канала. Пациенты с полипозным риносинуситом, а также перенесшие неоднократные оперативные вмешательства в полости носа и околоносовых пазухах, были исключены из исследования.

Пространственное разрешение томограмм составляло 0,4 мм в аксиальной плоскости при расстоянии между срезами 2 мм. При построении живых сечений использовали мультипланарные реконструкции во фронтальной проекции. Режим течения воздуха (по данным риноманометрии) определяли с помощью безразмерного числа Рейнольдса [10]

$$Re = (V \cdot d_g) / \nu, \quad (1)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, который при нормальных атмосферных условиях составляет $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$;

V – скорость течения воздуха в канале, которую можно определить из знания расхода воздуха (по данным риноманометрии) по формуле

$$V = Q/S, \quad (2)$$

где Q – расход воздуха через носовой канал; d_g – гидравлический диаметр, определяемый по формуле [10]

$$d_g = 4S/\Pi, \quad (3)$$

где S – площадь сечения канала;

Π – периметр носового канала.

По числу 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 выполнены мультипланарные реконструкции сечений носового канала, перпендикулярных движению воздуха, определены их площади и периметры, проведен расчет числа Рейнольдса. Выполнено сравнение величин с критическим значением (условный порог режима течения воздуха).

Результаты и их обсуждение. Мультипланарная реконструкция томографических данных в плоскости, перпендикулярной носовым ходам, приведена на рис. 1.



Рис 1. Мультипланарная реконструкция полости носа в плоскости, перпендикулярной носовым ходам

На следующем этапе проведена сегментация КТ-изображений воздухоносных полостей верхних дыхательных путей, основной проблемой которой является отделение воздухоносных пазух непосредственно от носовых ходов (для исключения наложения КТ-изображений решетчатого лабиринта на обонятельную зону верхнего носового хода). Результаты автоматизированной сегментации

скорректировали с помощью интерактивного удаление областей, принадлежащих придаточным пазухам носа. Далее вычисляли площади и периметры сечений носовых каналов, вычисляемых для каждой мультипланарной реконструкции.

Результаты сегментации характерных сечений носового хода (для левой стороны носа) и их периметров приведены на рис. 2 и 3. Конфигурация сечений носового канала на входе имеет щелевидно-эллиптическую форму, далее

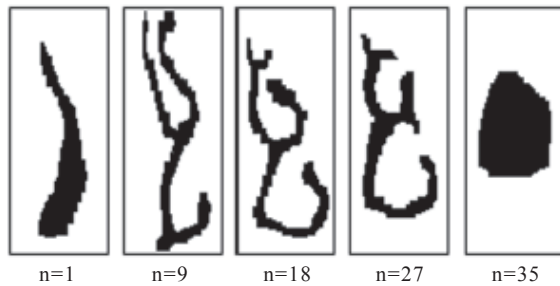


Рис. 2. Площади характерных сечений носового канала

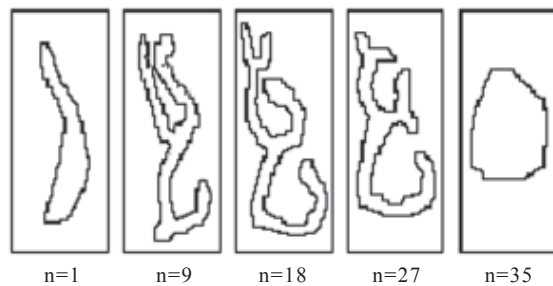


Рис. 3. Периметры характерных сечений носового канала

условно разделяется на нижний, средний и верхний носовые ходы, которые на выходе в носоглотку объединяются в широкое овальное отверстие – хоану. Данные получены по результатам обработки 35 фронтальных мультипланарных реконструкций, выполненных с шагом 2 мм (общая длина носовой полости составляет 7 мм).

Выполнен анализ полученных геометрических характеристик сечений носового хода. Площади S сечений носового канала практически монотонно возрастают от значения 70 мм^2 на входе в носовой канал до максимальной – площади хоаны, составляющей более 200 мм^2 (рис. 4). Исходя из уравнения неразрывности (постоянства расхода в каждом сечении) согласно формуле (2), можно сделать вывод, что скорость воздуха будет наи-

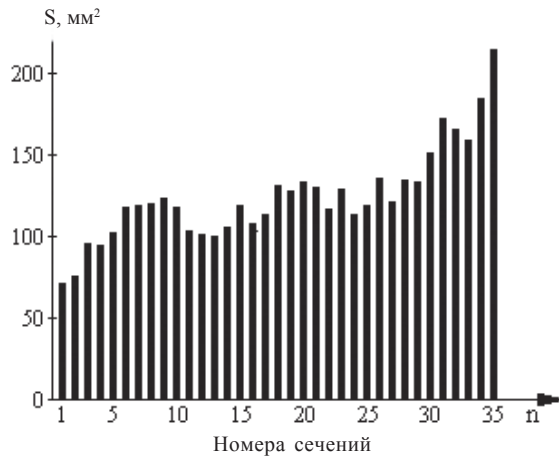


Рис. 4. Распределение площадей сечений воздушных ходов по длине носовой полости

меньшей в задних отделах носовой полости (у хоан).

На рис. 5 показано распределение периметров Π сечений носового канала. В соответствии с конфигурацией сечений носового канала периметр сечений имеет максимум приблизительно в середине длины канала (что свидетельствует о наиболее сложной конфигурации носовых ходов в средней части носовой полости) и снижается при приближении к хоане. Максимальное значение периметра составляет 118 мм.

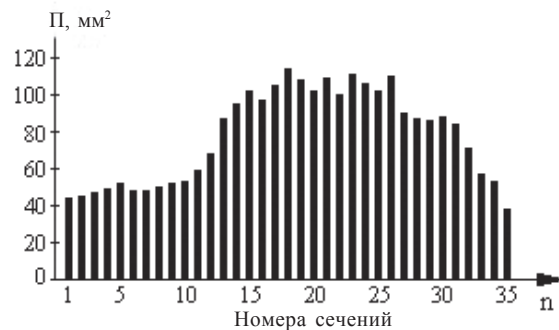


Рис. 5. Распределение периметров сечений воздушных ходов по длине носовой полости

На рис. 6 показано распределение гидравлического диаметра d_2 по сечениям носового канала, рассчитанного по формуле (3). Как видно из рис. 6, на входе и выходе из носовой полости гидравлический диаметр достигает максимального значения; минимум значения гидравлического диаметра наблюдается в центральных сечениях, что связано с большой изрезанностью канала. Глобальный максимум гидравлического диаметра составляет примерно 20 мм на уровне хоаны.

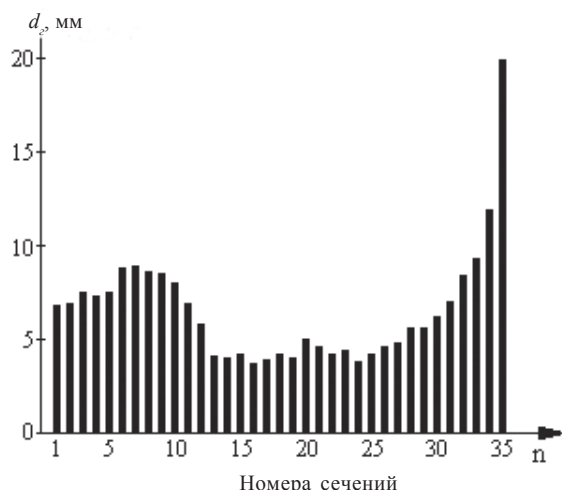


Рис. 6. Распределение гидравлических диаметров сечений воздушных ходов по длине носовой полости

С учетом формул (2) и (3) число Рейнольдса (1) можно определить как $Re=4Q/(v \cdot \Pi)$, то есть число Рейнольдса зависит только от расхода воздуха и периметра. Задаваясь расходом воздуха в носовом канале в диапазоне реальных значений от 0,3 до 2 л/с [2, 3] и определив предварительно периметры сечений каналов, проводим расчет чисел Рейнольдса. 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 приведены на рис. 7. Расходу 0,3 л/с соответствует режим спокойного дыхания, 1 л/с – форсированного, 2 л/с – максимально форсированного. Пунктиром обозначено критическое значение 2300 (для воды). Диапазон значений чисел Рейнольдса при этом составляет от 650 до 13500. Поток является ламинарным при $Re < Re_{кр}$ и турбулентным – в противном случае. Критическое значение числа Рейнольдса для каналов круглого сечения составляет $Re_{кр} = 1600-2300$ [7, 8].

То, что максимумы значений гидравлического диаметра наблюдаются при щелевидной форме сечения на входе в носовую полость и при почти круглой на выходе в носоглотку (у хоан), объясняется малыми периметрами данных сечений, по сравнению со средними, особенно выраженными в обонятельной области. При анализе изменения числа Рейнольдса по сечениям (рис. 7) можно сделать вывод, что наибольшие турбулентности возникают при входе и выходе из носо-

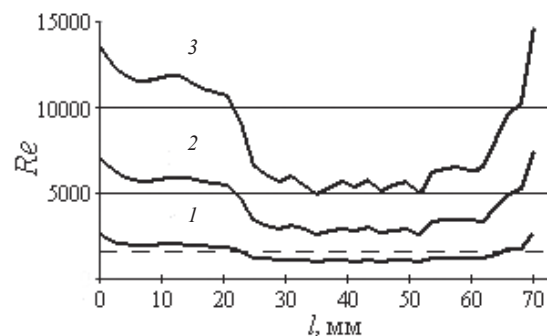


Рис. 7. График изменения чисел Рейнольдса в зависимости от длины l носового канала при расходе воздуха 0,3 (1), 1 (2) 2 (3) л/с

вых ходов. В области входа в полость носа и в области хоан режим движения воздуха турбулентный, а собственно в полости носа и особенно в обонятельной области – ламинарный. При спокойном дыхании режим течения воздуха в верхних дыхательных путях можно считать условно-ламинарным, а при форсированном дыхании – турбулентным.

Выводы

Оценка аэродинамических характеристик воздушного потока показывает, что наибольшая турбулентность потока наблюдается при входе и выходе из носовых ходов, непосредственно в самой полости носа происходит уменьшение турбулентности, что связано с увеличением периметра сечений воздушного канала и соответствующим уменьшением их гидравлических диаметров. Только при спокойном дыхании режим течения воздуха в верхних дыхательных путях можно считать условно-ламинарным, а при форсированном дыхании поток исключительно турбулентный. С помощью оценки конфигурации носовых ходов можно обеспечить функциональный подход, который будет учитываться при восстановлении носовых структур и создании условий для физиологической аэродинамики. Научный и клинический материал подтверждает доказательность этого направления и создает условия для разработки методов хирургического вмешательства в дыхательно-обонятельной области, обеспечивающих физиологическое носовое сопротивление и максимальное сохранение слизистой оболочки естественным путем.

Принимая во внимание методы функциональной диагностики, хирург всегда может правильно выбрать адекватный способ ри-

нохирургического вмешательства, не нарушая основной принцип медицины: не навредить.

В перспективе следует определить зависимость нарушения обоняния от гидравличес-

кого диаметра сечений носового канала, а также выявить возможную оптимальную конфигурацию анатомических структур обонятельной области.

Литература

1. Станкевич Н.Я. Лучевая диагностика повреждений и заболеваний околоносовых пазух / Н.Я. Станкевич // Новости лучевой диагностики. – 1998. – № 4. – С. 8–9.
2. Keyhani K. Numerical simulation of airflow in the human nasal cavity // K. Keyhani, P.W. Sherer, M.M. Mozell // J. Biomechanical Engineering. – 1995. – Vol. 117. – P. 429–441.
3. Козлов В.С. Акустическая ринометрия и передняя активная риноманометрия в исследовании носового цикла / В.С. Козлов, Л.Л. Державина, В.В. Шиленкова // Российская ринология. – 2002. – № 1. – С. 4–11.
4. Безшапочний С.Б. Ендоскопічна ендоназальна функціональна хірургія: достоїнства, недоліки, перспективи / С.Б. Безшапочний, В.В. Лобурець // Ринологія. – 2002. – № 2. – С. 3–10.
5. Digital volume tomography (DVT) measurements of the olfactory cleft and olfactory fossa / D. Savvateeva, C. Güldner, T. Murthum, et al. // Acta Otolaryngol. – 2010. – Vol. 130 (3). – P. 398–404.
6. Морозова С.В. Физиологические и клинические аспекты носового дыхания / С.В. Морозова, А.М. Митюк // Современная педиатрия. – 2013. – № 54. – С. 19–24.
7. 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.
8. Говорун М.И. Основные принципы оценки качества хирургического вмешательства в полости носа / М.И. Говорун, К.В. Герасимов, Ф.А. Садыхов // Журнал вушних, носовых и горловых хвороб. – 2006. – № 5. – С. 97.
9. Аврунин О.Г. Динамическая модель процесса прохождения воздуха через носовую полость / О.Г. Аврунин, Н.И. Белецкий, А.И. Березняков // Біофізичний вісник. – 2009. – № 23 (2). – С. 102–105.
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.

Н.О. Шушляпіна, О.Г. Аврунін

ВИВЧЕННЯ КОНФІГУРАЦІЇ НОСОВИХ ХОДІВ ЗА ДАНИМИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТОМОГРАФІЇ

Наведено характерні розміри поперечних перетинів носової порожнини (за даними комп'ютерної томографії) відповідними гідравлічними діаметрами і розглянуто характер їх зміни за довжиною носових ходів при різних режимах дихання (за даними риноманометрії). Введено поняття гідравлічного діаметра, що характеризує відношення площі перетину до його периметра. Максимуми значень гідравлічного діаметра спостерігаються при щілоподібній формі перетину на вході в носову порожнину та при майже круглій – на виході в носоглотку (у хоан), що пояснюється малими периметрами даних перетинів у порівнянні зі серединними, які особливо виражені в нюховій ділянці. Найбільша турбулізація повітряного потоку спостерігається при вході і виході з носових ходів, безпосередньо в самій порожнині носа відбувається зменшення турбулентності, що пов'язано зі збільшенням периметра перетинів повітряного каналу та відповідним зменшенням їх гідравлічних діаметрів.

Ключові слова: гідравлічний діаметр, носова порожнина, риноманометрія, комп'ютерна томографія.

N.O. Shuslyapina, O.G. Avrunin

STUDY OF NASAL AIRWAYS CONFIGURATION FROM COMPUTER TOMOGRAPHY DATASET

The characteristic dimensions of the cross-sections of the nasal cavity (from CT-dataset) with corresponding hydraulic diameters and consider their variation along the length of the nasal passages with different modes of breathing (according rhinomanometry) are described. Introduced the concept of hydraulic diameter, which characterizes the ratio of cross-sectional area to the perimeter. The maximum value of the hydraulic diameter is observed near the slot-shaped cross-section at the entrance to the nasal cavity and nearly circular – at the nasopharynx (near choanal holes) due to the small perimeters of these sections compared with median sections, especially in the olfactory region of nasal cavity. Evaluation of the aerodynamic characteristics of air flow shows that the largest flow turbulence observed at the inlet and outlet of the nasal passages, directly in the nasal cavity is showed a reduction of turbulence, which is associated with an increase in the perimeter of the cross sections of the air channel and a corresponding decrease of their hydraulic diameters.

Key words: hydraulic diameter, nasal cavity, rhinomanometry, computer tomography.

Поступила 25.11.14