

СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ

Афлитонов М.А.¹, Наумов С.Ю.¹, Артющкин С.А.², Безрукова Е.В.².

¹СПб ГБУЗ «Городская больница №40», 197706, Россия, г. Санкт-Петербург, г.

Сестрорецк, ул. Борисова, д. 8., Телефон/факс: +7 (812) 437-40-75, e-mail:

b40@zdrav.spb.ru

²ФГБОУ ВПО СЗГМУ И.И. Мечникова, 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д.41

Резюме.

Цель: Разработать и описать функцию придаточных пазух носа, представляя индивидуальный подход к функции каждого компертмента в отдельности как части общей системы восприятия и анализа мультимодальных воздушных сигналов.

Методы: были использованы общие логические методы (анализ, синтез, индукция, дедукция, аналогия).

Результаты: околоносовые пазухи представляют собой сенсорную систему воздушных сигналов, состоящую из нескольких отдельных компартментов с индивидуальными функциональными задачами. Лобная пазуха представляет собой вариометр. Клетки решетчатого лабиринта выполняют различные функции гигрометра или термометра. Верхнечелюстные и клиновидные пазухи действуют как **расходомеры**, позволяют вычислить скорость.

Выводы: Система включает в себя периферический отдел, состоящий из расположенных в костях лицевого черепа манометрических коробок (придаточных пазух носа) с приемниками давления (соустий пазух носа), афферентные проводящие пути, центры восприятия и анализа информации (ядра продолговатого мозга и таламуса, проекционную область коры).

Ключевые слова: околоносовые пазухи; сенсорная система воздушных сигналов; вариометр; гигрометр; термометр; расходометр;

SENSORY SYSTEM OF AIR SIGNALS

Aflitonov M. A.¹, Naumov S. U.¹, Artyushkin S. A.², Bezrukova E. V.².

¹*State Budgetary Public Health Institution "City Hospital No. 40", Saint- Petersburg, 197706, Sestroretsk, st. Borisova, d. 8., Phone/fax: +7 (812) 437-40-75, e-mail: b40@zdrav.spb.ru*

²*North-Western State Medical University named after I.I Mechnikov" under the Ministry of Public Health of the Russian Federation, 191015, Saint- Petersburg, st. Kirochnaya, 41*

Summary.

Objective: this article presents a new look at the function of paranasal sinuses, presenting a personalized approach to the function of each compartment individually as part of a common system of perception and analysis of multimodal air signals.

Methods: general logical methods were used (analysis, synthesis, induction, deduction, analogy).

Results: paranasal sinuses are a sensory air signal system consisting of several separate compartments with an individual functional task. Frontal sinus is a variometer. Ethmoid cells labyrinth performs various functions of a hygrometer or a thermometer. Maxillary and sphenoid sinuses acts as a flowmeters allows to calculate the velocity.

Conclusions: the system includes a peripheral department consisting of manometry boxes located in the bones of the facial skull (paranasal sinuses mucosae) with pressure receivers (openings of the sinuses), conducting department (pathways, nuclei of the medulla oblongata and thalamus), central department (projection area of the cortex).

Keywords. paranasal sinuses; sensory system of air signals; variometer; hygrometer; thermometer; flow meter.

Введение

В настоящее время не существует полного понимания функции воздушного лабиринта околоносовых пазух (ОНП). Сложность, закономерная вариабельность строения интактных ОНП, неоднозначность оценки принципов функционирования, привели к появлению противоречивых взглядов на их морфофункциональное устройство [1]. В свою очередь, это порождает появление разных подходов к хирургической коррекции патологии ОНП при функциональной эндоскопической синус хирургии (ФЭСХ) [2]. Отсутствие длительной и стабильной ремиссии при ФЭСХ хронических риносинуситов, определяет возможность переоценки функции околоносовых пазух. Вероятно, ОНП являются сенсорной частью системы восприятия и анализа

мультимодальных воздушных сигналов, анализирующую основные физические параметры вдыхаемого воздуха, (температура, влажность, скорость, расход, давление) [3].

Цель исследования

Разработать и описать сенсорную систему воздушных сигналов, показать функцию каждого компартмента в отдельности, как часть общей системы восприятия и анализа мультимодальных воздушных сигналов. Подтвердить в эксперименте разработанную гипотезу.

Материалы и методы

На основе обзора литературы сформирована рабочая гипотеза. Пазухи носа являются сенсорной системой воздушных сигналов (ССВС), состоящей из нескольких отдельных компартментов, выполняющих специализированные (адаптивные) функциональные задачи. Данная гипотеза представляет, как индивидуальное описание каждого компартмента, так и в составе комплексной сенсорной системы восприятия мультимодальных воздушных сигналов. Система включает в себя периферический отдел, состоящий из расположенных в костях лицевого черепа манометрических коробок (придаточных пазух носа) с приемниками давления (соустий пазух носа), афферентные проводящие пути, центры восприятия и анализа информации (ядра продолговатого мозга и таламуса, проекционную область коры). В настоящей статье мы рассмотрим потенциальный (гипотетический) механизм работы данной системы. Используются общие логические методы (анализ, синтез, индукция, дедукция, аналогия).

Экспериментальное подтверждение осуществлялось с помощью прямого измерения давления в верхнечелюстных пазухах у пациентов с синуситами, при помощи цифрового датчика дифференциального давления. Пациенты n=167, проходивших лечение в ЛОР отделении СПб ГБУЗ «Городская больница №40» в 2019 году, 98 мужчин, 54 женщины. Возраст от 22 до 54 лет, средний возраст $43,65 \pm 1,42$, с острыми синуситами в стадии разрешения гнойного процесса, подвергались прямому измерению давления внутри верхнечелюстных пазух в процессе плановой пункции при помощи подключения порта давления датчика к порту иглы Куликовского. Данные измерения давления внутри ВЧП записывались сериями режимов спокойного и форсированного дыхания с последующей компьютерной обработкой и построением диаграмм для сравнения полученных результатов. Цифровой комплекс прямого измерения давления внутри ОНП представлен цифровым пьезорезистивным датчиком воздушного давления (Honeywell

серии MPX), аналого- цифровой преобразователем, усилителем сигналов (в составе микроконтроллера ARM 32 + AT91SAM3X8EA), а также компьютером с набором программ обработки записанных сигналов. Расчеты средних величин давления на вдохе и выдохе при спокойном/ форсированном дыхании проводились с помощью программ MicrosoftExcel 2010, StatsoftStatistica 10.0. Оценка нормальности распределения проводилась с помощью теста Колмогорова – Смирнова.

Результаты и их обсуждение

Гипотеза

Сформированы общие принципы функционирования компартментов ССВС. Периферическое восприятие давления опосредовано манометрическими коробками (МК), приемниками воздушного давления (ПВД), эластичной мембраной, чувствительными элементами, дополнительным аппаратом. Манометрическая коробка представляет собой замкнутую мембранную полость, образованную непрерывными мягкими тканями пазухи. Для увеличения прогиба мембраны, гофра выполнена в виде эллипсоида сферы (или близкой к ней по форме). Имеет два составных элемента: неподвижный центр в области приемника воздушного давления (ПВД) и чувствительную подвижную часть - купол. Внутренняя полость манометрической коробки, через неподвижный центр, сообщается с источником измеряемого давления. При подаче давления внутрь коробки, купол мембраны делает двойной ход. Деформация купола улавливается чувствительными рецепторами мембраны и передается далее в проводящую часть. Величина прогиба мембраны зависит от ее площади, формы, толщины и уровня подаваемого давления. Деформация купола мембраны может происходить до тех пор, пока сила упругости мембраны не уравнивает разность давлений внутри коробки и вне ее. Повышение чувствительности мембраны обеспечивается несколькими способами. Уменьшение толщины мембраны, увеличивает прогиб при одном и том же давлении. Некоторые манометрические коробки соединены между собой внутренними полостями, повышая площадь и, следовательно, чувствительность. Они представляют из себя блоки манометрических коробок (септы внутри пазух). Для снижения времени прохождения сигнала и, соответственно, ускорения в получении результата измерения, пневмоканы отсутствуют, ПВД открываются сразу в манометрические коробки (рисунок 1,2,3,4) [4,5]. Приемниками воздушного давления являются соустья придаточных пазух носа, которые воспринимают полное и статическое давление. В синоназальной среде присутствуют

приемники двух типов: одни воспринимают полное и статическое давление, другие - только статическое давление. Конфигурационно приемники выполнены в двух типах: типа «капилляр» и типа «открытое горлышко». ПВД типа «капилляр» подает воздушное давление в полость пазухи с задержкой (рисунок 1), а ПВД типа «открытое горлышко» немедленно (рисунок 2).

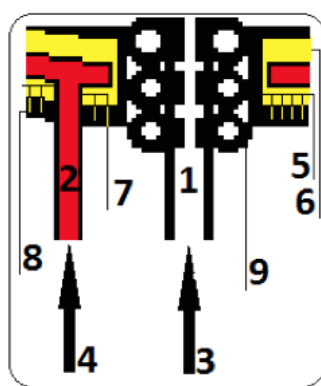


Рисунок 1. Схематическое изображение приемника воздушного давления, ПВД типа «капилляр» (1), сосудистый капилляр (2), источники давления (воздух 3, сосудистое русло 4), нервные окончания (5), эластичная мембрана (6), сенсорные элементы (7), манометрическая коробка (8)

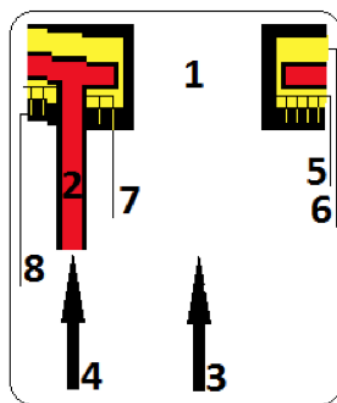


Рисунок 2. Схематическое изображение приемника воздушного давления, ПВД типа «открытое горлышко» (1), сосудистый капилляр (2), источники давления (воздух 3, сосудистое русло 4), нервные окончания (5), эластичная мембрана (6), сенсорные элементы (7), манометрическая коробка (8)

Эластичная мембрана представлена слизистой околоносовых пазух - слоем, выполненным из эластичного материала (эпителия) и надежно заключенного в менее пластичный корпус (кость). Прогиб этого слоя и помогает определить уровень давления. Данная мембрана

имеет несколько характеристик: тонкостенная, имеет жесткий центр, закреплена на подложке по внутренней поверхности пазухи.

Чувствительные элементы представлены свободными нервными окончаниями внутри слизистой которые изменяют свое электрическое сопротивление (импеданс) под действием деформирующей нагрузки. Нервные окончания находятся между гибкой подложкой и мембраной (эпителием), проникая в нее. Под давлением мембрана и подложка изгибаются, деформируя интегрированные в них нервные окончания. Сопротивление мембраны нервного окончания меняется, и соответственно меняется величина мембранного тока. Растяжение мембраны приводит к деформации нервных окончаний с увеличением поперечного сечения, в результате импеданс растет. При сжатии, наоборот. Так деформация преобразуется в изменение электрического сопротивления чувствительного окончания и далее в нервный сигнал (рисунок 3,4).

Дополнительный аппарат содержит многочисленную сосудистую сеть (капилляры), они создают напряжение внутри мембраны для обеспечения возможности деформации эпителиального слоя (двойного шага), как при повышении, так и при понижении давления (рисунок 3,4).

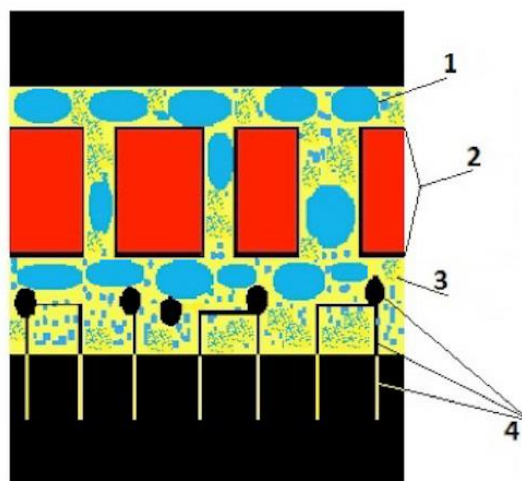


Рисунок 3. Схематическое изображение эпителиальной и субэпителиальной соединительной ткани со слизистой оболочки ОНП (осевой срез). Фибробластоподобные клетки (1), капилляры (2), пучки коллагеновых фибрилл (3), сенсорные элементы (4)

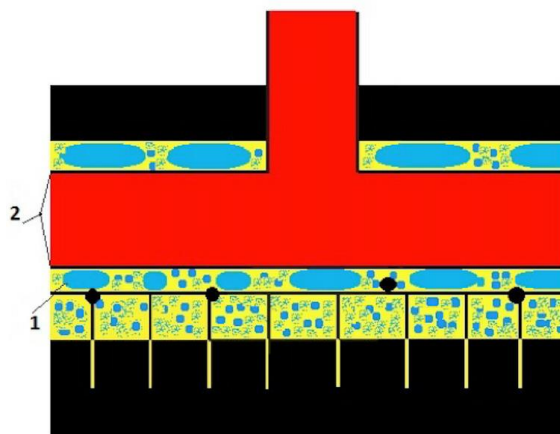


Рисунок 4. Схематическое изображение эпителиальной и субэпителиальной соединительной ткани со слизистой оболочки ОНП (сагиттальный срез). Фибробластоподобные клетки (1), капилляры (2), пучки коллагеновых фибрилл (3), сенсорные элементы (4)

Рассмотрев общие принципы работы манометрических коробок рецепторного поля ОНП, мы можем перейти к моделям работы отдельных компартментов (пазух).

Лобная пазуха является анализатором улавливающим скорость изменения статического давления и направление его изменения (вариометр). Принцип работы основан на измерении скорости изменения статического давления. Давление подводится к двум адресам (емкостям). В первой давление всегда стабильно (капиллярное русло подложки). Во вторую поступает (или из нее выходит) с задержкой, проходя на своем пути через специально суженный участок воздушной магистрали, ПВД типа «капилляр». Поэтому изменение давления в ней запаздывает, по сравнению с аналогичными изменениями в первой емкости. Изменение давления улавливается чувствительной мембраной. Таким образом, между этими двумя емкостями, при изменении статического давления постоянно существует разность давлений. Понятно, что она тем больше, чем больше скорость изменения (рисунок 5) [6,7].

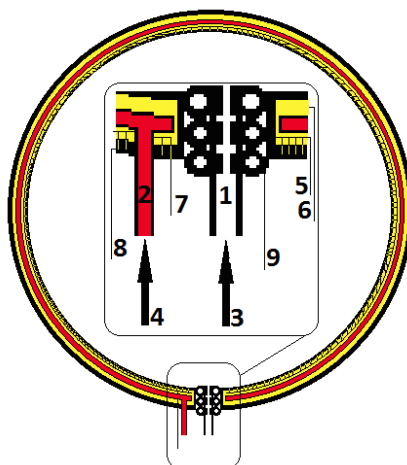


Рисунок 5. Схематическое изображение конфигурации лобной пазухи. ПВД типа «капилляр» (1), сосудистый капилляр (2), источники давления (воздух 3, сосудистое русло 4), нервные окончания (5), эластичная мембрана (6), сенсорные элементы (7), манометрическая коробка (8)

Верхнечелюстная и клиновидная пазухи выполняют совместную функцию. Принцип работы основан на измерении статического или полного атмосферных давлений. Давление подводится к двум адресам (емкостям). В первой давление всегда стабильно (капиллярное русло подложки создает напряжение внутри мембраны для обеспечения возможности деформации эпителиального слоя (двойного шага), как при повышении, так и при понижении давления). Во вторую поступает (или из нее выходит) без задержки (ПВД типа «открытое горлышко»). Поэтому изменение давления в ней пропорционально статическому или динамическому (в зависимости от фазы дыхания) давлению. На вдохе-верхнечелюстная пазуха выступает приемником статического давления, а клиновидная полного. На выдохе - верхнечелюстная пазуха выступает приемником полного давления, а клиновидная статического. Изменение давления улавливается чувствительной мембраной. Понятно, что оно тем больше, чем больше скорость потока воздуха. Таким образом, эти пазухи выступают в роли расходомеров так как позволяют вычислить скорость, а, следовательно, и расход (рисунок 6,7,8) [6,7].

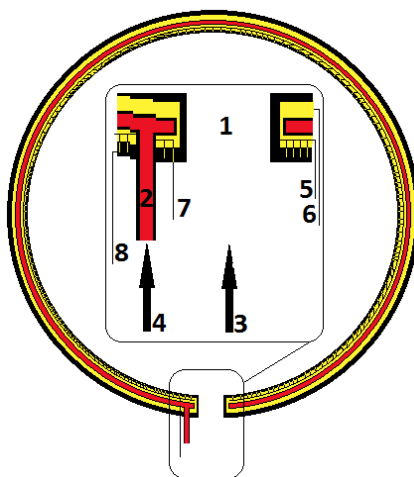


Рисунок 6. Схематическое изображение конфигурации верхнечелюстной и клиновидной пазух. ПВД типа «открытое горлышко» (1), сосудистый капилляр (2), источники давления (воздух 3, сосудистое русло 4), нервные окончания (5), эластичная мембрана (6), сенсорные элементы (7), манометрическая коробка (8)

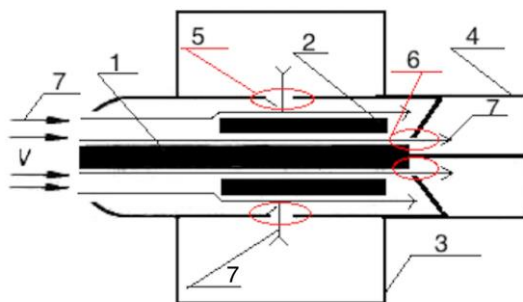


Рисунок 7. Схематическое изображение процессов, протекающих в верхнечелюстной и клиновидной пазухах на вдохе. Перегородка носа (1), средние раковины (2), верхнечелюстная пазуха (3), клиновидная пазуха (4), ПВД типа «открытое горлышко» в верхнечелюстной пазухе (5), ПВД типа «открытое горлышко» в клиновидной пазухе (6), источник и направление давления на вдохе (7).

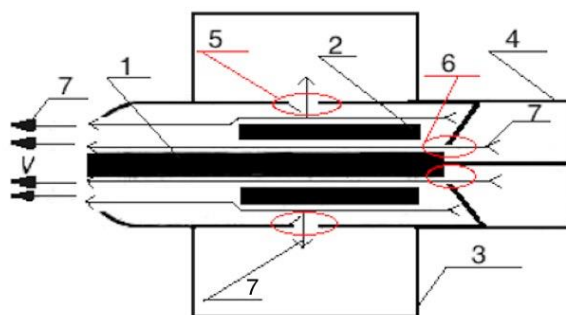


Рисунок 8. Схематическое изображение процессов, протекающих в верхнечелюстной и клиновидной пазухах на выдохе. Перегородка носа (1), средние раковины (2), верхнечелюстная пазуха (3), клиновидная пазуха (4), ПВД типа «открытое горлышко» в верхнечелюстной пазухе (5), ПВД типа «открытое горлышко» в клиновидной пазухе (6), источник и направление давления на выдохе (7).

Решетчатый лабиринт выполняет две функции: гигрометра и термометра (содержит клетки двух типов конфигурации). Тип «открытое горлышко» - с достаточно широким соустьем (как в клиновидной/верхнечелюстной пазухах) и типа «капилляр» (как в лобной пазухе) (рисунок 1,2,9).

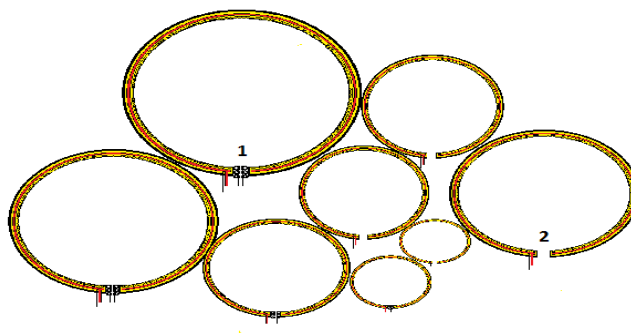


Рисунок 9. Схематическое изображение клеток решетчатого лабиринта с различными функциональными задачами. Термометр (ПВД типа «капилляр») (1), гигрометр (ПВД типа «открытое горлышко») (2)

Гигрометр имеет чувствительный элемент из мембраны, которая растягивается при повышении влажности и сжимается при понижении. Доступ воздуха обеспечивается его свободным прохождением через ПВД типа «открытое горлышко». Растяжение мембраны приводит к деформации нервных окончаний с ростом их длины и уменьшением поперечного сечения, в результате импеданс растет. При сжатии — наоборот. Так деформация преобразуется в изменение электрического сопротивления чувствительного окончания и далее — в нервный сигнал кодирующий показатели влажности окружающей среды. Показания такого гигрометра не зависят от температуры (может работать при отрицательных температурах) и скорости потока воздушной струи (рисунок 2,9). Принцип действия **манометрического термометра** основан на изменении давления в замкнутом объеме решетчатой клетки в зависимости от температуры воздушной смеси внутри нее. Основными частями манометрического термометра являются: манометрическая термо - коробка (замкнутая мембранная полость), ПВД типа «капилляр» и интегрированное рецепторное поле. При изменении температуры объем манометрической термо - коробки меняется, приводя к деформации мембраны и нервных окончаний, с последующим изменением импеданса и появлением афферентной сигнализации. Данный тип устройства датчика виброустойчив, не чувствителен к внешним магнитным полям (рисунок 1,9) [6,7].

Кондукторами проводящего отдела анализатора являются нейроны черепных нервов, nn.ethmoidales posterior et anterior from n.nasociliaris из n.opthalmicus. Центральный отдел ССВС включает в себя нижний отдел постцентральной извилины, предцентральной извилины, премоторную зону лобной доли, а также извилины височной доли.

Экспериментальная часть

Результаты прямого измерения давления внутри верхнечелюстных пазух показали наличие стойких паттернов изменения давления на вдохе и выдохе при спокойном и

форсированном дыхании. Примеры паттернов давления на вдохе и выдохе представлены на рисунке 10.

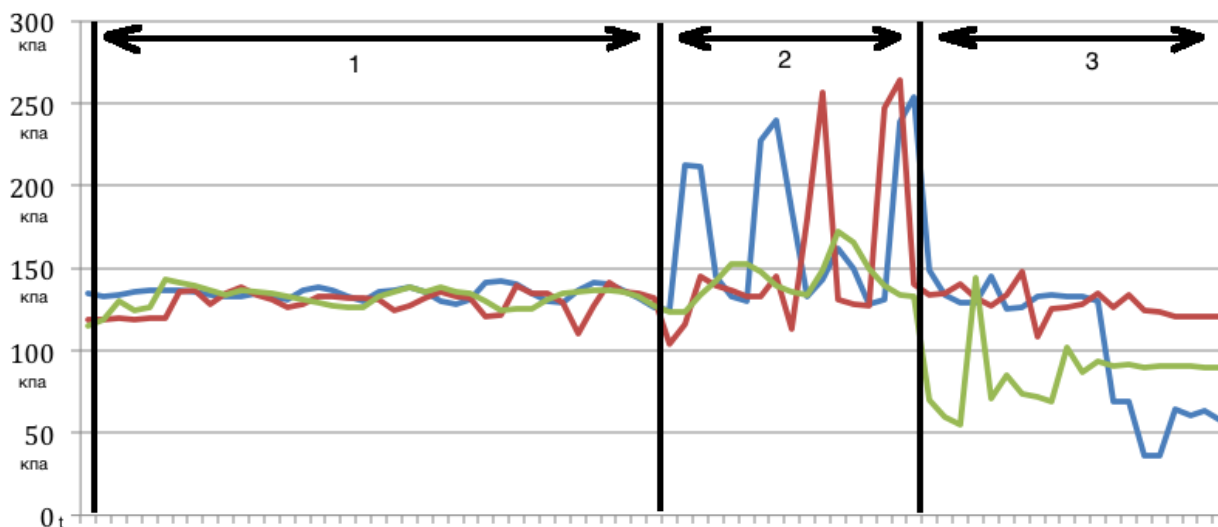


Рисунок 10. Примеры изменения паттернов давления внутри верхнечелюстных пазух в процессе акта дыхания. 1- спокойное дыхание, 2- форсированное дыхание, 3- удаление порта датчика из иглы куликовского.

Анализ среднего давления при спокойном дыхании установил превалирование пониженного давления внутри ВЧП (93кПа) в течение всех серий измерений у пациентов выборки (атмосферное 100 кПа). Среднее давление вдоха в течение всех серий измерений у пациентов выборки 133 кПа. Среднее давление выдоха в течение всех серий измерений у пациентов выборки 127 кПа. Уровни давления в фазах вдоха и выдоха были сопоставимы у пациентов всей выборки. Пики значений спокойного/форсированного, вдоха/выдоха различалась у всех пациентов, в соответствие с РГ признаками отека ВЧП.

Результаты экспериментальных данных достоверно показывают соответствие гипотетической модели представленных процессов в ВЧП, реальным физическим процессам, протекающим в верхнечелюстной пазухе на вдохе и выдохе при разных режимах функционирования.

Данная теория ССВС соответствует признакам сенсорной системы (содержит периферическую, проводниковую, центральную части). Присутствует принцип дублирования. Отвечает критерию фальсифицируемости Поппера (может быть опровергнута на основе изучения дыхательных вызванных потенциалов, индуцированных сигнализацией ее рецепторного отдела и прямого измерения давления внутри ОНП (подтверждено экспериментально)). Использование системы позволяет прогнозировать исходы многих процессов. Присутствует обратная связь между мозговыми анализирующими структурами и воспринимающим рецептивным аппаратом. ССВС

обладает высокой адаптацией к действию раздражителя. Специфической особенностью сенсорной системы воздушных сигналов является то, что значительная часть перерабатываемой в ней информации используется для автоматической регуляции функции дыхания, осуществляемой без сознательного контроля. При патологии импульсация несет информацию, достигающую сознания (надпороговая, актуальная афферентация) и обосновывающую жалобы на боли, дискомфорт, распирание, тяжесть, головные боли при изменении давления, влажности и температуры воздуха в окружающем пространстве [8].

Выводы

Разработана и описана сенсорная система регистрации воздушных сигналов, включающая периферический отдел, состоящий из расположенных в костях лицевого черепа манометрических коробок (придаточных пазух носа) с приемниками давления (соустий пазух носа), афферентные проводящие пути (нейроны черепных нервов, nn.ethmoidales posterior et anterior from n.nasociliaris из n.ophtalmicus), центры восприятия и анализа информации (ядра продолговатого мозга и таламуса, проекционную область коры). Получено экспериментальное подтверждение разработанной гипотезы ССВС на основе прямого измерения давления внутри верхнечелюстных пазух пациентов с синуситами.

Литература

1. Афлитонов, М.А. Современные аспекты иммунопатогенеза хронического полипозного риносинусита / Е. В. Безрукова, Н. М., Хмельницкая, М. А. Афлитонов // Российская оториноларингология. - 2017. -№ 3. - С. 16-23.
2. Афлитонов, М.А. Особенности метаболизма мелатонина при хроническом полипозном риносинусите на фоне полиморбидной сердечно-сосудистой патологии / М. А. Афлитонов, С. А. Артюшкин, С. А. Парцерняк, С. Ю. Наумов, А. С. Парцерняк, А. А. Топанова // Российская оториноларингология. - 2016. -№ 5. - С. 14-21.
3. Афлитонов, М.А. Физические маркеры оценки прогноза течения хронических риносинуситов / М. А. Афлитонов, Е. В. Безрукова, С. Ю. Наумов, С. А. Артюшкин // Head and Neck. - 2019. -№ 2. - С. 76.
4. Eckert, S. Velocity Measurement Techniques for Liquid Metal Flows / S. Eckert, A. Cramer, G. Gerbeth // J. Magnetohydrodynamics. Fluid Mechanics And Its Applications. - 2007. - Vol. 80. - P. 275 - 294.
5. Huo, L. Research of barometric altimeter and the method accuracy / L. Huo, G. Gerbeth // J. PLA Inst. Surv. Mapp. - 2002. - Vol. 22. - P. 21 - 25.
6. Tichy, H. Revisiting Theories of Humidity Transduction: A Focus on Electrophysiological Data / H. Tichy, M. Hellwig, W. Kallina, // Frontiers in physiology. - 2017. - Vol. 8. - P. 650-653.
7. Michalski, L. Temperature Measurement / L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski, J. McGhee // John Wiley & Sons. - 2002. - Vol. 16. - P. 75-29.
8. Афлитонов М.А. Роль мелатонина в развитии хронического полипозного риносинусита на фоне полиморбидной сердечно-сосудистой патологии [Текст]: дис... канд. мед. наук: 14.01.03/ Афлитонов Максим Александрович. – СПб., 2018. – 127 с.