

На правах рукописи

МАРЧУК ВАЛЕНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ВЕРХНИХ
ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЯХ У ЛИЦ С ЗУБОЧЕЛЮСТНЫМИ
АНОМАЛИЯМИ**

3.1.7. Стоматология (медицинские науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России).

Научный руководитель:

Доктор медицинских наук, профессор

Польма Людмила Владимировна

Официальные оппоненты:

Арсенина Ольга Ивановна – доктор медицинских наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный медицинский исследовательский центр «Центральный научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, отделение клинической и госпитальной ортодонтии, заведующая отделением

Проскокова Светлана Владимировна – доктор медицинских наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, кафедра ортопедической стоматологии, заведующая кафедрой

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» Федерального медико-биологического агентства

Защита состоится 17 сентября 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 21.2.016.06 в ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации (по адресу: 127006, г. Москва, ул. Долгоруковская, д. 4.)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России (127206, г. Москва, ул. Вучетича, д.10, стр. 2) и на сайте <https://dissov.msmsu-portal.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор медицинских наук,
профессор

Атрушкевич Виктория Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Научный интерес к вопросу о взаимосвязи между зубочелюстными аномалиями и дыхательной системой возник еще в конце XIX века и не снижается до сих пор (Angle E.H. 1907, Арсенина О.И. 2023, Вишневецкая С.В. 2005, Пантелеева Е.В. 2009, Хубулава Н.З. 2009, Маркова М.В. 2010, Пиксайкина К.Г. 2015, Глушко А.В. 2013, Laird A. 2015, Котов И.И. 2016, Iwasaki T. 2019).

Теория функциональной матрицы Мосса гласит, что «рост и развитие структур челюстно-лицевой области напрямую зависит от окружающих тканей» (Moss M.L. 1962). На основании этого исследователи предположили, что существует взаимосвязь между пространством верхних дыхательных путей и морфологией челюстно-лицевой области (Linder-Aronson S. 1970, Moore A. 1972).

Имеются сведения, что при дистальной окклюзии уменьшены размеры ротоглотки (El H. 2011, 2013, Indriksone I. 2014, Oh H. 2011, Cabral Q.R. 2017, Nath A. 2019, Alhammad A. 2019). Уменьшение просвета дыхательных путей у детей, например, при увеличении небной и глоточной миндалин, является провоцирующим фактором для развития ротового дыхания, что в свою очередь приводит к сужению и скученности зубных рядов (Арсенина О.И. 2016, 2015, 2014, Пантелеева Е.В. 2009, Евдокимова Н.А. 2009). Различные аномалии окклюзии, в том числе дистальная, являются предрасполагающим фактором для развития синдрома обструктивного апноэ сна как у детей, так и у взрослых (Хубулава Н.З. 2009, Котов И.И. 2016, Garg R.K. 2017, Neelapu K. 2017).

При лечении зубочелюстных аномалий врачи-ортодонты прибегают к процедурам, способным повлиять на размеры дыхательных путей как негативным, так и благоприятным образом. Расширение верхней челюсти, лечение мезиальной окклюзии с помощью протракционной маски и лечение дистальной окклюзии функциональными аппаратами достоверно увеличивают размеры дыхательных путей (Caprioglio A. 2014, Пиксайкина К.Г. 2015, Vinha P.P. 2015, Iwasaki T. 2017, Pavoni C. 2017, Xiang M.L. 2017, Hur J.S. 2017, Lee W.C.

2017). Имеются противоречивые данные о влиянии на дыхательные пути таких вмешательств, как удаление премоляров, ретракция резцов, дистализация верхнего и нижнего зубного ряда, ортогнатические операции (Chen Y. 2012, 2014, Hsieh Y.J. 2015, Котов И.И. 2016, Shah D.H. 2016, Kurtzner K. 2016, He J. 2016, Christovam I.O. 2016, Zheng Z. 2017, Park J.H. 2018, Louro R.S. 2018, Shavakhi M. 2019, Ng J.H. 2019).

Взаимосвязь между характеристиками потока воздуха и анатомическими особенностями дыхательных путей у детей с разными аномалиями окклюзии демонстрировалась с помощью математического моделирования аэродинамических процессов (Iwasaki T. 2017, 2019). Однако дыхательные пути значительно увеличиваются в размерах до 20 лет (Schendel S.A. 2012, Chiang C.C. 2012), в связи с чем возникает необходимость в полноценной характеристике влияния анатомических особенностей челюстно-лицевой области на поток воздуха в дыхательных путях у взрослых пациентов.

Степень разработанности темы

В зарубежной и отечественной литературе нет единого мнения об анатомических и функциональных особенностях верхних дыхательных путей у пациентов с зубочелюстными аномалиями, нет данных об аэродинамических параметрах в верхних дыхательных путях у взрослых пациентов с зубочелюстными аномалиями.

Цель исследования

Совершенствование методов оценки состояния верхних дыхательных путей в ходе ортодонтической диагностики пациентов с зубочелюстными аномалиями.

Задачи исследования:

1. Определить морфологические особенности глотки у лиц с нормальной, дистальной и мезиальной окклюзией на основании данных лучевой диагностики.
2. Изучить связь анатомии челюстно-лицевой области и аэродинамики воздушного потока в верхних дыхательных путях с помощью математического моделирования.

3. Определить особенности зубочелюстной системы, связанные с изменением проходимости верхних дыхательных путей.
4. Проанализировать информативность цефалометрических параметров глотки на основании тесноты их связи с аэродинамикой воздушного потока.

Научная новизна исследования

Изучено влияние анатомических особенностей челюстно-лицевой области на параметры движения воздушного потока в верхних дыхательных путях у пациентов старше 18 лет, и продемонстрированы особенности физиологии дыхания при сагиттальных аномалиях окклюзии. Выявлены значимые корреляционные связи сагиттальных и трансверсальных размеров челюстно-лицевой области с аэродинамикой воздушного потока в верхних дыхательных путях. С помощью математического моделирования наглядно продемонстрировано, как ведет себя воздушный поток при изменении размеров и соотношения анатомических структур челюстно-лицевой области.

Проведена оценка того, как параметры различных цефалометрических анализов связаны с аэродинамикой воздушного потока в верхних дыхательных путях. Впервые проанализирована информативность различных измерений верхних дыхательных путей по конусно-лучевым компьютерным томограммам, и показано их влияние на параметры воздушного потока. Графически продемонстрировано поведение воздушного потока в зависимости от величины цефалометрических параметров.

Разработан алгоритм применения математического моделирования воздушного потока в верхних дыхательных путях человека в процессе диагностики их функционального состояния.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационного исследования расширяют представления о физиологии и анатомии верхних дыхательных путей у взрослых пациентов с зубочелюстными аномалиями. Итоги данной научной работы помогут усовершенствовать процесс ортодонтической диагностики и позволят применить

новый подход в оценке дыхательной функции верхних дыхательных путей у пациентов с зубочелюстными аномалиями.

Описаны связи конкретных анатомических характеристик челюстно-лицевой области и верхних дыхательных путей с аэродинамикой воздушного потока. Анатомия верхних дыхательных путей пациентов с дистальной окклюзией способствует возникновению в них аэродинамических сил, приводящих к обструкции верхних дыхательных путей. При оценке риска возникновения обструкции верхних дыхательных путей по конусно-лучевым компьютерным томограммам у пациентов с дистальной окклюзией наиболее значимы размеры между позвоночным столбом и внутренней поверхностью подбородка и между углами и мышечковыми отростками нижней челюсти.

Показано, что наиболее информативными параметрами при оценке верхних дыхательных путей по конусно-лучевым компьютерным томограммам являются минимальная площадь поперечного сечения, объем верхних дыхательных путей и минимальный гидравлический диаметр.

Создан алгоритм применения математического моделирования воздушного потока в верхних дыхательных путях у пациентов в процессе ортодонтической диагностики. В ходе исследования разработан способ эффективной подготовки математической модели верхних дыхательных путей человека.

Методология и методы исследования

Диссертация выполнена в соответствии с принципами и правилами доказательной медицины в дизайне клинического неинтервенционного пилотного стратифицированного ретроспективного поперечного исследования с использованием рентгенологической диагностики, математического моделирования методом вычислительной гидродинамики, статистической обработки полученных данных с вычислением средних значений, медиан, квартилей, стандартной ошибки, проведением регрессионного анализа.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный нами алгоритм применения математического моделирования воздушного потока в верхних дыхательных путях позволяет

составлять комплексный план ортодонтического лечения и дифференцировать пациентов, имеющих риск возникновения обструкции верхних дыхательных путей.

2. В ходе цефалометрического анализа необходимо оценивать состояние верхних дыхательных путей, используя параметры, наиболее тесно связанные с аэродинамикой воздушного потока.

3. У пациентов с дистальной окклюзией аэродинамические силы в верхних дыхательных путях являются фактором возникновения обструкции и оказывают выраженное негативное влияние на стенки ротоглотки.

4. У пациентов с сужением верхней и нижней челюстей уменьшены размеры носоглотки и увеличена скорость воздушного потока, а в ротоглотке повышена турбулентная кинетическая энергия.

Личный вклад автора в выполнение работы

Автор лично сформировал рабочую гипотезу, научно обосновал основные идеи исследования и выработал исследовательскую методологию их выполнения. Автор провел анализ литературных источников по проблеме диссертационной работы, организовал сбор научного материала, осуществил статистический анализ результатов исследования, написал статьи, диссертацию и автореферат.

Автором лично обследовано 63 взрослых пациента: 20 с гнатической формой мезиальной окклюзии, 24 с гнатической формой дистальной окклюзии и 19 с нормальным соотношением челюстей, проанализировано 63 конусно-лучевых компьютерных томограмм; подготовлены 63 цифровые модели верхних дыхательных путей для математического моделирования; проведено математическое моделирование воздушного потока в 63 моделях верхних дыхательных путей; проанализированы результаты математического моделирования. Автором самостоятельно сделаны обоснованные выводы и созданы практические рекомендации для применения полученных результатов исследования в клинической практике врача-ортодонта.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности полученных результатов обоснована достаточным набором клинических данных. В ходе проведения научной работы применялись современные методы исследования и статистической обработки, которые соответствуют целям и задачам диссертационной работы.

Апробация работы

Результаты и основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на заседании кафедры ортодонтии стоматологического факультета НОИ стоматологии им. А.И. Евдокимова ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, что подтверждено протоколом № 298 от 8 февраля 2024 года.

Ключевые результаты научно-исследовательской работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

1. 43 Итоговая научная конференция общества молодых ученых МГМСУ им. А.И. Евдокимова, тема доклада: «Трехмерный цефалометрический анализ верхних дыхательных путей при планировании ортодонтического лечения». Москва, 2021

2. 45 Итоговая научная конференция общества молодых ученых МГМСУ им. А.И. Евдокимова, тема доклада «Математическое моделирование воздушного потока в верхних дыхательных путях у пациентов вычислительной гидродинамики».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 3.1.7. Стоматология (медицинские науки); формуле специальности: стоматология – область науки, занимающаяся изучением этиологии, патогенеза основных стоматологических заболеваний, разработкой методов их профилактики, диагностики и лечения. Совершенствование методов ортодонтической диагностики поможет сохранять здоровье и увеличить качество жизни населения страны.

Степень достоверности результатов исследования

Выводы основаны на достаточном объеме клинического материала с использованием современных методов исследования и статистической обработки, соответствующих целям и задачам диссертационной работы.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, 4 из них – в изданиях, рекомендуемых ВАК России.

Внедрение результатов исследования

Результаты диссертационной работы внедрены в лечебный и учебный процесс кафедры ортодонтии стоматологического факультета ФГБОУ ВО Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова Минздрава России.

Объем и структура работы

Диссертация изложена на 138 страницах машинописного текста; включает введение, три главы, обсуждение, выводы, практические рекомендации, список литературы, в котором 316 источников (27 работ российских и 289 иностранных авторов). В диссертацию включены 10 таблиц и 19 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материал и методы исследования

В период с 2019 по 2022 гг. проведено обследование 125 пациентов, обратившихся в клинический центр ЧЛХ и стоматологии МГМСУ им. А.И. Евдокимова. Из них было выбрано 63 пациента (из них 48 женщин, 15 мужчин), соответствующих критериям включения и исключения. Возрастной диапазон пациентов составил от 18 до 34 лет (средний возраст 25 лет).

Критериями включения являлись: возраст старше 18, наличие конусно-лучевых компьютерных (КЛК) томограмм 13см x 17см. Критерии исключения: врождённые пороки челюстно-лицевой области, травмы челюстно-лицевой области (ЧЛЮ), признаки патологии верхних дыхательных путей (ВДП) на КЛК-

томограммах, ортодонтическое и комбинированное ортодonto-хирургическое лечение в анамнезе.

Для проведения КЛКТ использовался аппарат Kavo OP 3D vision (KaVo, Германия) с напряжением 120 кВт и силой тока 5 мА. В процессе исследования черепа пациент получал дозу 0,01 – 0,06 мЗв.

Всех пациентов разделили на 3 группы на основании $\angle ANB$ – взаимосоотношения апикальных базисов челюстей.

В 1-ю группу – контрольную – вошли 19 пациентов с нейтральным соотношением челюстей ($0^\circ < \angle ANB < 4^\circ$).

В 2-ю группу – 24 пациента с гнатической формой дистальной окклюзии зубных рядов ($\angle ANB \geq 4^\circ$).

В 3-ю группу – 20 пациентов с гнатической формой мезиальной окклюзии зубных рядов ($\angle ANB \leq 0^\circ$).

Кроме этого, исследовали связь наклона резцов верхней челюсти и тип вертикального роста черепа с размерами ВДП и аэродинамическими характеристиками в них у пациентов с дистальной окклюзией. Для этого поочередно разделили 2-ю группу на основании наклона резцов верхней челюсти и значений угла между основанием нижней челюсти и передним основанием черепа. Точками отсечения выбрали значения 70° для $\angle U1/NL$ и 23° для $\angle ML/FH$.

Данные сканирования КЛКТ в формате DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) импортировали в программу Mimics Medical 21.0. Анализировали реконструкции корональных, сагиттальных и аксиальных плоскостей. На основе минимальных и максимальных пороговых значений выделяли слой исследуемых структур (кости, мягкие ткани или пустое пространство) и кодировали цветом. Из выделенных слоев генерировали соответствующие трехмерные объекты в формате .stl.

В Mimics был сформирован трехмерный цефалометрический анализ, который включал параметры авторских двухмерных и трехмерных анализов ВДП и ЧЛО.

Цефалометрические ориентиры отмечали в срединно-сагиттальной плоскости для лучшей имитации анализа плоскостного цефалометрического анализа. Билатеральные точки, в частности, Po , Or , Co , J и Go идентифицировали на трехмерных объектах, проверяли и располагали их на аксиальных, корональных и сагиттальных срезах.

ВДП разделяли на отделы согласно McCrillis и соавт. Измеряли сагиттальные и трансверсальные линейные размеры ВДП, площадь поперечного сечения (ППС) по плоскостям через точки $PNS-ad_2$, $PNS-ad_1$, $p-p'$, $Go-B$, ep_1-ep_2 (рисунок 1).

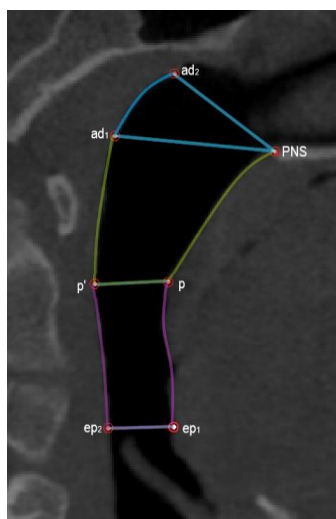


Рисунок 1 – фрагмент КЛК-томограммы; срединно-сагиттальный срез. Плоскости ad_2-PNS , ad_1-PNS , $p-p'$, ep_1-ep_2 , служащие границами отделов ВДП. Голубым цветом обведена носоглотка, зеленым – нёбный отдел ротоглотки, фиолетовым – язычный отдел ротоглотки.

Длину ВДП измеряли от точки ad_2 до точки в середине просвета ВДП в плоскости через точку H , параллельной франкфуртской горизонтали. Длину мягкого нёба измеряли от точки PNS до точки ut . Толщину мягкого нёба измеряли в области наибольшей его выпуклости – от точки p до поверхности языка. Наклон ВДП определяли по углу между франкфуртской горизонталью и прямой через точки $ep_{ce}-ad_{1ce}$. Краниоцервикальный угол – это угол, образованный NS и прямой через точки $СПir$ и $СПsp$.

Определяли положение подъязычной кости путем измерения сторон подъязычного треугольника:

1. СШ-RGn – расстояние между III-м шейным позвонком и задней поверхностью подбородка;
2. СШ-Н – расстояние между III-м шейным позвонком и подъязычной костью
3. Н-RGn – расстояние между подъязычной костью и задней поверхностью подбородка;
4. НМР – расстояние от подъязычной кости до плоскости Go-Gn (рисунок 2).

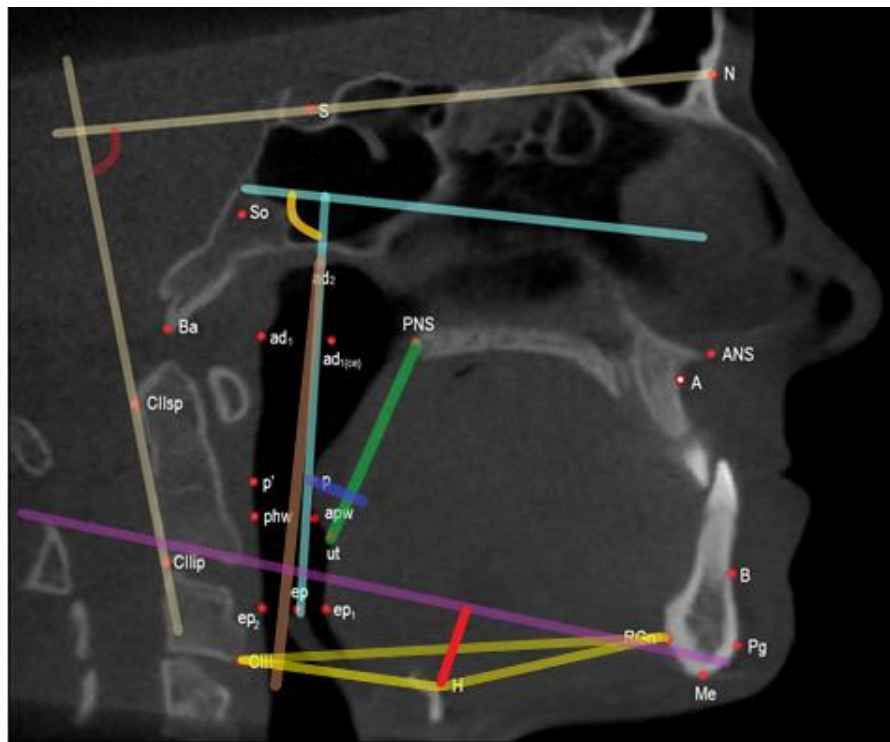


Рисунок 2 – фрагмент КЛК-томограммы; срединно-сагиттальный срез. — наклон ВДП; — краниоцервикальный угол; — длина ВДП; — толщина мягкого нёба; — длина мягкого нёба; — подъязычный треугольник; — плоскость Go-Gn, — НМР.

В трехмерных моделях ВДП извлекали центральную ось для вычисления минимальной площади поперечного сечения (МППС) и минимального гидравлического диаметра (МГД) (рисунок 3). Гидравлический диаметр используется в гидродинамике для вычисления меры эффективности русла в пропускании потока.

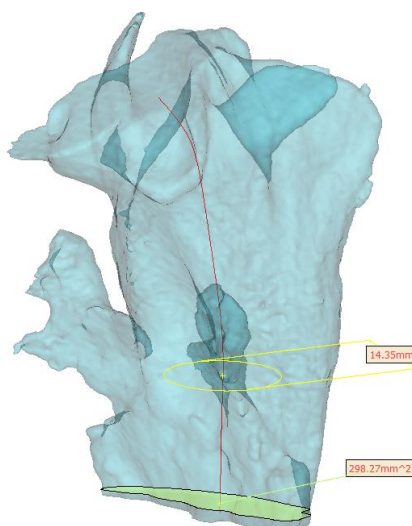


Рисунок 3 – Скриншот трехмерной модели ВДП с выделенной центральной линией и вычисленной по ней МППС и МГД в программе Mimics Medical 21.0.

Подготовку моделей ВДП к математическому моделированию проводили в ПО Ansys Workbench 2021 R2. Модели ВДП в формате .stl импортировали в ПО Spaceclaim 2021 R2, где удаляли дефектные элементы, проводили сглаживание и задавали окончательную форму модели. Для облегчения расчетов исключали из модели носовую полость. Для стандартизации моделей и уточнения результатов математического моделирования у нижних границ в ротоглотке и верхних в носоглотке стенки модели вытягивали на 4 см.

Модель разграничивали на отделы в модуле Design Modeler. Расчетную сетку создавали в модуле Ansys Meshing.

Математическое моделирование воздушного потока проводили в модуле Ansys Fluent. Задавали следующие граничные условия: на входе – массовый расход воздуха 0.000265 кг/с, на выходе – давление 0 Pa, плотность воздуха составляла 1.225 кг/м³. На стенках задавали граничное условие отсутствия проскальзывания (no-slip boundary condition). Поток рассчитывали в стационарном режиме, гравитацию учитывали по оси y, турбулентность моделировали с использованием усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Проводили по 500 итераций расчета для каждой модели.

Обработку результатов моделирования проводили в модуле CFD-Post. Оценивали графические профили и числовые значения давления, скорости, турбулентной кинетической, напряжения сдвига стенки (рисунок 4).

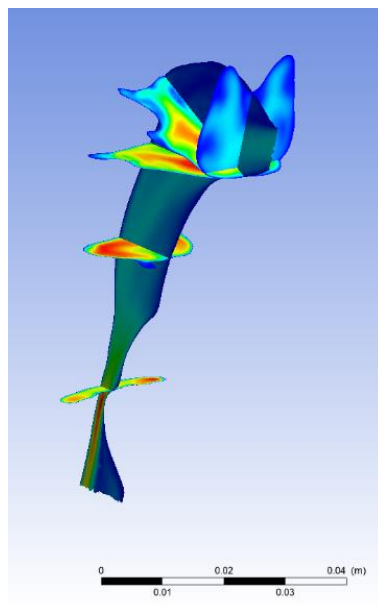


Рисунок 4 – Скриншот графического представления результатов математического моделирования в срединно-сагиттальной плоскости и плоскостях, соответствующим границам отделов ВДП в модуле CFD-Post.

Статистический анализ проводили с использованием программы IBM SPSS Statistics v.26 (разработчик - IBM Corporation).

Результаты исследования

В первой части исследования проводили **трехмерный цефалометрический анализ**. Его результаты представлены в таблице 1. Пациенты 3-х групп различались между собой на основании $\angle ANB$ ($p < 0,01$), $\angle SNB$ ($p < 0,01$), длины тела верхней ($p < 0,05$) и нижней челюсти ($p < 0,01$) и наклона резцов верхней челюсти ($p < 0,01$). Трансверсальные размеры челюстей и зубных рядов, наклон резцов нижней челюсти, наклон челюстей относительно франкфуртской горизонтали, а также параметры, определяющие тип вертикального роста черепа не отличались.

Таблица 1 – Морфологические параметры ЧЛО в 3-х группах

Параметр ЧЛО	3 группа		1 группа		2 группа	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
$\angle ANB, ^\circ$	-3,75	2,65	1,89	1,14	6,06	1,39
$\angle SNA, ^\circ$	81,72	4,39	83,15	2,44	84,00	2,34
$\angle SNB, ^\circ$	85,47	4,60	81,27	2,12	77,95	2,68
Go-GN, мм	81,36	4,79	77,38	4,87	74,31	7,74
PNS-A', мм	45,78	3,51	46,60	3,20	48,45	2,62
$\angle U1/NL, ^\circ$	64,94	6,60	65,64	6,76	72,72	9,05

Во второй части исследования проводился **анализ связи размеров ВДП с цефалометрическими параметрами ЧЛО.**

Для анализа связи $\angle ANB$ с размерами ВДП сравнили 3 группы по количественным признакам между собой с помощью критерия Крускала-Уоллеса. Группы различались по следующим признакам:

- ширина ВДП в плоскости через мягкое нёбо ($p < 0,05$);
- сагиттальный размер ВДП в плоскости Go-B ($p < 0,05$);
- МГД ($p < 0,05$);
- объем нёбного отдела ротоглотки ($p < 0,05$);
- СИП – RGn ($p < 0,05$);
- Н-RGn ($p < 0,05$).

Используя U-критерий Манна-Уитни, сравнили группы попарно. В 3-й группе ширина ВДП на уровне мягкого нёба ($p < 0,01$), сагиттальный размер в плоскости Go-B ($p < 0,05$), расстояние Н-RGn ($p < 0,05$) были больше, чем в 1-й.

Кроме этого, в 3-й группе общий объем ВДП ($p < 0,05$), объем язычного ($p < 0,05$) и нёбного ($p < 0,01$) отделов ротоглотки, объем языка ($p < 0,01$), МППС ($p < 0,05$), МГД ($p < 0,05$), ППС на уровне мягкого нёба ($p < 0,05$) и Go-B ($p < 0,05$), ширина ВДП на уровне мягкого нёба ($p < 0,01$) и сагиттальный размер в плоскости Go-B ($p < 0,01$) были больше, чем во 2-й.

Между 1-й и 2-й группой статистически значимых различий не выявили.

Наибольшее количество статистически значимых корреляций размеров ВДП выявлено с краниоцервикальным углом. При наклоне головы вперед и вверх размеры ВДП уменьшаются, а сами они наклоняются кпереди.

Проводился множественный регрессионный анализ, зависимыми переменными в котором выступали размеры ВДП, а независимыми факторами – морфологические параметры ЧЛО. Для минимальной площади поперечного сечения наиболее предсказательными факторами являются краниоцервикальный угол ($r = -0,427$, $p < 0,01$) и расстояние между углами нижней челюсти ($r = -0,327$, $p < 0,05$). Для минимального гидравлического диаметра – краниоцервикальный угол ($r = -0,385$, $p < 0,01$), длина нижней челюсти ($r = -0,442$, $p < 0,01$) и расстояние между углами нижней челюсти ($r = -0,449$, $p < 0,01$).

Соотношение сагиттальных и трансверсальных размеров в плоскости Go-B показало наибольшее количество связей с челюстно-лицевыми параметрами. При увеличении $\angle ANB$, при уменьшении $\angle SNB$ и $\angle SNPog$ и размера тела нижней челюсти соотношение трансверсального размера ВДП к сагиттальному на данном уровне увеличивалось, то есть ВДП принимали форму эллипса, вытянутого справа-налево.

В 3-й части исследования анализировали аэродинамику в верхних дыхательных путях у пациентов с сагиттальными аномалиями окклюзии.

Сопротивление для наших моделей вычисляется по формуле (1):

$$R = \frac{\Delta P}{V} \quad (1),$$

где ΔP – разница давления между хоанами и надгортанником, V – объемная скорость (объемный расход) воздушного потока. Во всех наших моделях расход воздуха был одинаковым, поэтому ΔP между хоанами и надгортанником можно считать тождественной сопротивлению.

Величина ΔP определяет, с какой скоростью движется воздушный поток. Согласно принципу неразрывности потока, в результате уменьшения площади сечения трубы скорость потока увеличивается. Закон Бернулли гласит, что при

увеличении скорости потока его давление уменьшается. Графические профили наших моделей и численные результаты наглядно демонстрируют эти положения.

У пациентов с узкой ротоглоткой в сужении возникает высокоскоростная струя, которая заполняет большую часть ротоглотки (рисунок 5, а; красный цвет). Кроме этого, регистрируется резкий перепад давления: область высокого давления (рисунок 5, б; красный и оранжевый цвета) занимает всю носоглотку перед началом сужения, а за языком давление становится отрицательным (рисунок 5, б; синий цвет). Данный вариант графического профиля давления и скорости встретился у 14 (58%) из 24 пациентов с дистальной окклюзией.

В группе пациентов с мезиальной окклюзией зарегистрированы более низкая средняя скорость потока и меньший перепад давления, высокоскоростная струя достигала значительных размеров только у 6 (30%) обследованных из 20.

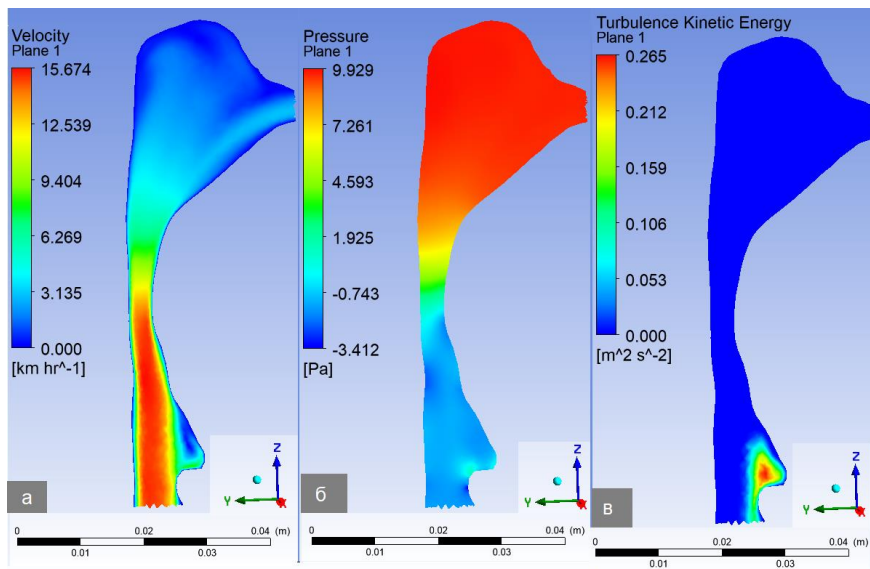


Рисунок 5 – Скриншот графического профиля скорости (а), давления (б) и турбулентной кинетической энергии (в) воздушного потока у пациента с сужением ВДП в срединно-сагиттальной плоскости в программе CFD-Post.

При большой величине средней площади поперечного сечения ротоглотки ситуация иная (рисунок 6). По профилю скорости видно, что высокоскоростная струя имеет меньший размер относительно размеров ВДП на протяжении ротоглотки и расположена в ее задней части (рисунок 6, а). Воздушный поток при смене направления с горизонтального на вертикальное ударяется о заднюю стенку носоглотки, где образуется сравнительно небольшая область выражено высокого

давления (рисунок 6, б; красный цвет). Поле умеренно низкого давления равномерно и без значительных перепадов распределено по вентральной части носо- и ротоглотки (рисунок 6, б; голубой и зеленый цвет). Графический профиль распределения скорости у 11 (55%) из 20 пациентов с мезиальной окклюзией соответствовал данному типу.

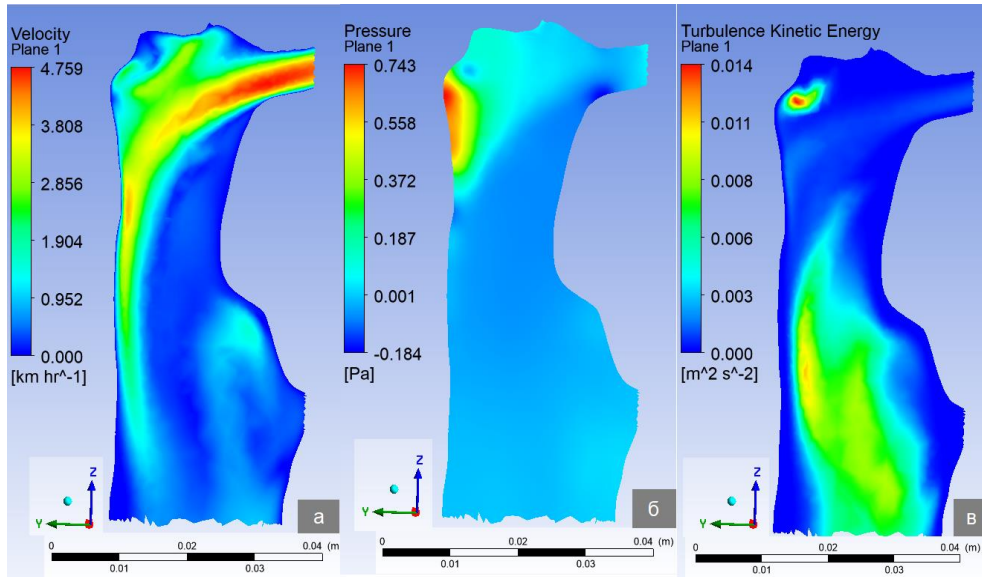


Рисунок 6 – Скриншот графического профиля скорости (а), давления (б) и кинетической энергии турбулентности (в) воздушного потока у пациента с широкими ВДП в срединно-сагиттальной плоскости в программе CFD-Post.

С помощью критерия Крускала-Уоллеса сравнили 3 группы (разделенные на основе $\angle ANB$) между собой. Зафиксировали различия значений средней скорости в срединно-сагиттальной плоскости ($p < 0,05$) и плоскости на уровне мягкого нёба ($p < 0,05$).

Используя U-критерий Манна-Уитни, сравнили группы попарно. Во 2-й группе по сравнению с 3-й были выше:

- средняя скорость в срединной-сагиттальной плоскости ($p < 0,05$) и на уровне мягкого нёба ($p < 0,01$);
- максимальная скорость в срединной сагиттальной плоскости ($p < 0,01$), на уровне мягкого нёба и надгортанника ($p < 0,05$);
- ΔP между хоанами и надгортанником ($p < 0,05$).

В 1-й группе по сравнению с 3-й были выше:

- средняя скорость в срединно-сагиттальной плоскости ($p < 0,05$);

- средняя скорость в плоскости через мягкое нёбо ($p < 0,05$) и надгортанник ($p < 0,05$);
- максимальная скорость в плоскости через мягкое нёбо ($p < 0,05$).

Кроме этого, $\angle ANB$ умеренно положительно коррелировал с:

- средней скоростью в срединно-сагиттальной плоскости ($p < 0,05$);
- средней скоростью на уровне мягкого нёба ($p < 0,01$);
- ΔP между хоанами и надгортанником ($p < 0,01$).

Расстояние между задней поверхностью подбородка и III шейным позвонком имеет наиболее многочисленные и сильные корреляции с давлением и скоростью воздушного потока выявлены среди всех параметров, характеризующих сагиттальные размеры скелета ЧЛО ($r =$ от $-0,32$ до $-0,41$, $p < 0,01$).

Турбулентность воздушного потока уменьшает эффективность его транспортировки по ВДП. Энергия воздушного потока переходит в вихри, а от них передается стенкам глотки, в результате чего они начинают вибрировать. Вибрация стенок верхних дыхательных путей является источником храпа, а также фактором возникновения обструкции. Наши результаты показывают, что турбулентная кинетическая энергия (которая отражает энергетический уровень турбулентных вихрей в потоке) повышается при уменьшении поперечных размеров нижней челюсти (таблица 2).

Таблица 2 – Корреляционный анализ по Спирмену значений турбулентной кинетической энергии

Параметр ЧЛО	ТКЕ _{ср.} общая	ТКЕ _{ср.} на уровне ер-ер'	ТКЕ _{макс.} на уровне ер-ер'	ТКЕ _{ср.} на уровне р-р'	ТКЕ _{макс.} на уровне р-р'	ТКЕ _{ср.} на уровне ad ₁ -PNS	ТКЕ _{макс.} на уровне ad ₁ -PNS	ТКЕ _{ср.} на уровне ad ₂ -PNS	ТКЕ _{макс.} на уровне ad ₂ -PNS
Ширина между 14-24	-0,046	-0,068	-0,051	-0,186	-0,200	-0,201	-0,192	-0,297*	-0,250*
Со-Со	-0,282*	-0,355**	-0,392**	-0,373**	-0,376**	-0,362**	-0,383**	-0,210	-0,207
Go-Go	-0,143	-0,330**	-0,236	-0,387**	-0,340**	-0,321*	-0,293*	-0,247	-0,182

ТКЕ – турбулентная кинетическая энергия; ** - значимость на уровне 0,01; * - значимость на уровне 0,05. Полужирным шрифтом выделены умеренные корреляции.

Подгруппы пациентов с дистальной окклюзией сравнили между собой с помощью критерия Манна-Уитни.

В подгруппе с высокими значениями $\angle ML/FH$ максимальная скорость в носоглотке ($p < 0,05$), средняя скорость и турбулентная кинетическая энергия на уровне мягкого нёба ($p < 0,05$) выше, чем в подгруппе с низкими значениями $\angle ML/FH$. То есть, у пациентов с дистальной окклюзией и вертикальным типом роста повышены региональные параметры скорости и турбулентной кинетической энергии. Кроме этого, ширина ВДП в плоскости Go-B ($p < 0,05$) и на уровне надгортанника ($p < 0,05$) у них меньше, чем при горизонтальном типе роста.

У обследованных с дистальной окклюзией в сочетании с ретрузией резцов верхней челюсти давление на уровне надгортанника ниже, чем в подгруппе с протрузией ($p < 0,05$), что является негативным фактором, способствующим спаданию стенок ротоглотки. Кроме этого, ширина ВДП на уровне твердого нёба ($p < 0,05$) у данных пациентов меньше, чем у пациентов с протрузией резцов верхней челюсти.

В каждой подгруппе провели корреляционный анализ по Спирмену, результаты которого приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Обобщенные результаты корреляционного анализа по Спирмену в каждой подгруппе

Подгруппа	Наибольшее количество высоких и заметных связей аэродинамики ВДП:
дистальная окклюзия в сочетании с вертикальным типом роста	заметные связи: $\angle ANB$, краниоцервикальный угол, $\angle SNPog$ и Co-Go, Co-Go, ширина зубного ряда между 14-24 – с общей и региональной скоростью, ΔP и ТКЕ.
дистальная окклюзия в сочетании с горизонтальным типом роста	высокие и заметные связи: ширина твердого нёба в области 14-24 – с общей и региональной скоростью, напряжением сдвига стенки; Go-Go, Co-Co и Ag-Go, N-Me, J-J и верхнего зубного ряда между 16-26 – с ТКЕ.
дистальная окклюзия в сочетании с ретрузией резцов верхней челюсти	высокие связи: Go-GN, Co-Co, ML/FH и ширина зубного ряда между 14-24 – со скоростью и ТКЕ; заметные связи: J-J – с региональной скоростью и ТКЕ.
дистальная окклюзия в сочетании с протрузией резцов верхней челюсти	высокие и заметные связи: PNS-A', ширина зубного ряда между 14-24 – с ΔP , ТКЕ, региональной скоростью.

В заключительной части проводили **анализ связи аэродинамики и размеров ВДП**. Наибольшее количество весьма высоких корреляций ($r > 0,9$, $p < 0,01$) аэродинамики было выявлено с МППС ВДП. Данный параметр чаще всего располагался в области нёбного отдела ротоглотки и влиял на:

- среднюю скорость в целом ($r = -0,946$, $p < 0,01$),
- максимальную скорость на уровне надгортанника ($r = -0,961$, $p < 0,01$),
- давление на уровне хоан ($r = -0,918$, $p < 0,01$)
- ΔP между хоанами и надгортанником ($r = -0,973$, $p < 0,01$).

Помимо этого выявлена высокая отрицательная ($-0,9 < r < -0,7$) корреляционная связь данного измерения со всеми параметрами скорости в ротоглотке и умеренные отрицательные связи со всеми параметрами скорости в носоглотке.

Измерения, сделанные по живому сечению (то есть, перпендикулярно вектору воздушного потока и центральной оси ВДП, а именно МППС и МГД), дают представление о потоке на всем протяжении ВДП. Измерения параллельные искусственным плоскостям (e_p - e_p' , p - p' , PNS - ad_1 , PNS - ad_2) хорошо характеризуют поток на своих соответствующих уровнях, то есть, по измерению носоглотки PNS - ad_2 можно сделать вывод о скорости в носоглотке и т.д.

Общий объем ВДП весьма высоко отрицательно коррелировал со средней скоростью в целом ($r = -0,909$, $p < 0,01$). Кроме этого, он высоко отрицательно связан со всеми скоростными параметрами в ротоглотке, давлением в хоанах, ΔP между хоанами и надгортанником; заметно и умеренно связан со скоростью в носоглотке.

ВЫВОДЫ

1. На основании данных лучевой диагностики определены морфологические особенности глотки и смежных мягких тканей у лиц с нормальной, дистальной и мезиальной окклюзией. При дистальной окклюзии просвет ротоглотки имеет форму эллипса, вытянутого в трансверсальном

направлении, а при мезиальной окклюзии форма округлая. При дистальной окклюзии, обусловленной микро- и/или ретрогнатией нижней челюсти, объем верхних дыхательных путей ($p < 0,05$) и минимальная площадь поперечного сечения ($p < 0,05$) меньше, чем при мезиальной окклюзии.

2. С помощью математического моделирования изучена связь анатомии челюстно-лицевой области и функции верхних дыхательных путей у пациентов с зубочелюстными аномалиями. На параметры воздушного потока в верхних дыхательных путях влияют размеры и положение костного каркаса, который образует пространство, содержащее мягкотканые структуры верхних дыхательных путей. Наибольшее влияние оказывает расстояние между позвоночным столбом и внутренней поверхностью подбородка (CIII-RGn): выявлено 11 значимых ($r =$ от 0,32 до 0,50, $p < 0,05$) положительных корреляционных связей с размерами верхних дыхательных путей и 7 значимых ($r =$ от -0,32 до -0,41, $p < 0,01$) отрицательных связей с аэродинамикой.

3. Определены особенности зубочелюстной системы, связанные с изменением проходимости верхних дыхательных путей. При дистальной окклюзии повышенное аэродинамическое сопротивление сочетается со снижением давления и повышением скорости воздушного потока в ротоглотке ($p < 0,05$). У пациентов с дистальной окклюзией в сочетании с вертикальным типом роста черепа повышены скорость и турбулентная кинетическая энергия воздушного потока ($p < 0,05$) в нёбном отделе ротоглотки и в носоглотке. При дистальной окклюзии в сочетании с ретрузией резцов верхней челюсти региональное давление в ротоглотке ниже, чем у пациентов с протрузией резцов ($p < 0,05$). У пациентов с сужением челюстей наблюдается повышение скорости воздушного потока в носоглотке и повышение кинетической энергии турбулентных вихрей в ротоглотке ($r =$ от 0,47 до 0,68; $p < 0,01$).

4. Проанализирована информативность различных цефалометрических параметров глотки на основании тесноты их связи с аэродинамикой воздушного потока. Наиболее высокие связи с аэродинамикой имеет минимальная площадь поперечного сечения ($\Delta P - \text{МППС}$: $r = -0,97$; $p < 0,01$), площадь поперечного

сечения в плоскости Go-B (ΔP – ППС Go-B: $r = -0,94$; $p < 0,01$) и общий объем верхних дыхательных путей (ΔP – TV: $r = -0,85$; $p < 0,01$).

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В ходе ортодонтической диагностики пациентов с зубочелюстными аномалиями при наличии выраженного сужения верхних дыхательных путей и их малым объемом на КЛК-томограмме предложено использовать математическое моделирование воздушного потока методом вычислительной гидродинамики для оценки функционального состояния верхних дыхательных путей.

2. Следует применять разработанный алгоритм подготовки математической модели для измерения перепада давления, скорости и турбулентной кинетической энергии потока и оценки графических профилей данных параметров для неинвазивной функциональной диагностики верхних дыхательных путей.

3. При обследовании пациентов с дистальной окклюзией, обусловленной микро- и ретрогнатией нижней челюсти, для оценки связи анатомии челюстно-лицевой области с морфологическим и функциональным состоянием верхних дыхательных путей, целесообразно измерять размер пространства между нижней челюстью и позвоночным столбом.

4. Измерение параметров верхних дыхательных путей по плоскостям авторских цефалометрических анализов позволяет судить только о региональных характеристиках воздушного потока. Они менее информативны, чем значения параметров верхних дыхательных путей по живым сечениям, так как с их помощью можно получить представление об аэродинамике на всем протяжении верхних дыхательных путей.

5. Для более полной характеристики связи анатомии верхних дыхательных путей с их функцией надо измерять объем в сочетании с площадью поперечного сечения верхних дыхательных путей перпендикулярно к вектору воздушного потока.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1 Марчук, В. В. Трехмерный анализ верхних дыхательных путей по данным конусно-лучевой компьютерной томографии / В. В. Марчук, Л. В. Польша, Д. А. Лежнев [и др.] // **Ортодонтия**. – 2021. – Т.93, № 1. – С. 20-33.
- 2 Марчук, В. В. Оценка верхних дыхательных путей и окружающих мягких тканей у пациентов с аномалиями окклюзии в сагиттальной плоскости по данным конусно-лучевой компьютерной томографии / В. В. Марчук, Л. В. Польша, Т. А. Марчук // **Проблемы стоматологии**. – 2023. – Т. 19, № 2. – С. 91-96.
- 3 Марчук, В. В. Математическое моделирование воздушного потока в верхних дыхательных путях методом вычислительной гидродинамики / В. В. Марчук, Л. В. Польша, Т. А. Марчук, [и др.] // **Ортодонтия**. – 2023. – Т. 103, №3. – С. 8-15
- 4 Марчук, В. В. Оценка связи параметров верхних дыхательных путей с аэродинамикой воздушного потока в них. / В. В. Марчук, Л. В. Польша, Т. А. Марчук, [и др.] // **Ортодонтия**. – 2023. – Т. 103, №3. – С. 72-73
- 5 Марчук, В.В. Трехмерный цефалометрический анализ верхних дыхательных путей при планировании ортодонтического лечения / В. В. Марчук, Л.В. Польша // Сборник научных трудов 43 Итоговой научной конференции ОМУ МГМСУ им. А.И. Евдокимова. – 2021. – С.61-62.
- 6 Марчук, В.В. Математическое моделирование воздушного потока в верхних дыхательных путях у пациентов методом вычислительной гидродинамики / В. В. Марчук, Л. В. Польша // Сборник научных трудов 45 Итоговой научной конференции ОМУ МГМСУ им. А.И. Евдокимова. Москва. – 2023. – С. 49.

Подписано в печать: 18.06.2024
Объем: 1 усл.п.л.
Тираж: 100 экз. Заказ № 1887
Отпечатано в типографии «Реглет»
119571, г. Москва, ул. Вернадского, 86А
(495) 973-28-32 www.reglet.ru