

На правах рукописи

Гольшева Полина Садуллоевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЫХАНИЯ
ЧЕЛОВЕКА В НОРМЕ И ПРИ ПАТОЛОГИИ**

Специальность 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск
2024

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

Научный руководитель:

Медведев Алексей Елизарович, доктор физико-математических наук, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН, главный научный сотрудник лаборатории № 4 «Физики быстропротекающих процессов».

Официальные оппоненты:

Актёршев Сергей Петрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории № 6.2 «Лаборатория физической гидродинамики», Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск

Проскурин Александр Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится «19» апреля 2024 г. в 9⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.1.125.01 (Д003.035.02) в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН http://www.itam.nsc.ru/website/inst/upload/infoblock/file/0twfr-Golysheva_textdiss.pdf

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « » 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



С.А. Гапонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Тема данного исследования является весьма актуальной в данное время и будет актуальной всегда. Актуальность исследования разделяется на два аспекта.

1. Заболевания дыхательной системы.

Заболевания дыхательных путей занимают лидирующее место в структуре заболеваний. Согласно статистике Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), наибольшее количество смертей в мире связано с неинфекционными болезнями. Среди них на первом месте находятся сердечно-сосудистые заболевания, которые являются причиной смерти 17,9 миллионов человек ежегодно. На втором месте находятся онкологические заболевания, вызывающие смерть более чем 9 миллионов человек в год. На третьем месте — заболевания дыхательной системы, такие как пневмония и бронхиальная астма; теперь к этим двум заболеваниям добавился COVID-19. Вот почему заболевания органов дыхания поднимаются на второе место в причинах смертности. При вирусных заболеваниях происходит частичное нарушение работы легких человека, поэтому необходимо знать, как патологии бронхов человека влияют на процессы дыхания и газообмена.

Вспышка COVID-19 началась в конце 2019 года в Китае и продолжается по настоящее время. Пандемия коронавируса стала фундаментальным вызовом для современного общества и за рекордно короткий срок изменила жизнь миллионов людей во всем мире. Даже сейчас каждый день появляются около 200 тыс. новых заболевших, согласно мировым данным.

Глобальная распространенность астмы составляет около 300 миллионов человек, а по некоторым оценкам к 2025 году она увеличится до 400 миллионов человек. В Новосибирской области от бронхиальной астмы страдают около 200 тыс. человек.

Пневмония является достаточно распространенным заболеванием органов дыхания. С каждым столетием течение данного заболевания усугубляется, так как появляются все больше новых штаммов вирулентных микроорганизмов, являющихся возбудителями пневмонии. Действие антибиотиков слабеет, летальность заболевания увеличивается. В России ежегодно отмечается около 1,5 млн случаев пневмоний. Число больных с осложненным течением болезни растет из-за недостаточной оценки тяжести состояния больного. Количество больных пневмонией остается одной из главных проблем в нашей стране.

2. Загрязнение воздуха.

В Новосибирске, как и в других городах, атмосфера загрязняется выбросами и промышленных предприятий, и транспортной системы. С каждым годом количество легковых автомобилей на дорогах увеличивается. Это способствует увеличению концентрации в воздухе пыли, диоксида углерода и др. Кроме того, существенному загрязнению атмосферы способствуют котельные, коммунальные предприятия, а также электростанции. Все эти выбросы при дыхании попадают к нам в организм через дыхательную систему и осаждаются в легких.

Целью исследования является создание математической модели легких человека, которая позволила бы моделировать дыхание в норме и при

патологии, движение и осаждение частиц пыли, аэрозольных капель (включая лекарственные средства) в бронхах человека.

Основное предположение данного исследования основывается на том, что можно моделировать поведение воздуха в легких у здоровых людей или при определенных обструктивных патологиях, используя единую модель дыхательных путей, которая позволяет моделировать все проводящие дыхательные пути. Также возможно имитировать отложение вдыхаемых частиц в легких во всех этих ситуациях. Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**:

- Разработка аналитической модели построения бифуркации бронхов и на их основе создание модели полного бронхиального дерева человека. Модель бронхиального дерева должна описывать участок от трахеи до начала альвеолярной области и давать возможность описывать поток воздуха в легких человека.
- Исследование осаждения частиц пыли и аэрозольных капель лекарственных препаратов в бронхиальном дереве легких.
- Изучение особенностей дыхания человека при заболеваниях дыхательных путей и моделирование возможностей лечения некоторых патологий.
- Моделирование тепло- и влагообмена в бронхиальном дереве человека.

Методы исследования

Впервые разработана аналитическая модель построения легкого любой генерации (вплоть до альвеол). Аналитическая модель бифуркации позволяет конечными формулами построить полное бронхиальное дерево человека с 0-й до 23-й бифуркации включительно. Аналитические формулы позволяют легко моделировать патологии легочной системы, вызванные «звездообразным» сужением бронхов. Геометрические характеристики бронхиального дерева человека при патологии моделируются «звездчатой» формой внутреннего строения бронха, степень патологии задается параметрами – степенью сужения бронха и степенью искажения цилиндрической формы бронхов. Каждая бифуркация строится из входящего и двух выходящих бронхов, которые соединяются друг с другом секторами торов переменного радиуса и гладкими двухпараметрическими поверхностями. Все поверхности бронхиального дерева состыковываются со вторым порядком гладкости (не имеют острых углов и ребер).

Течение воздуха в легких медленное и перепады давления небольшие, поэтому для расчетов можно рассматривать воздух в рамках модели вязкой несжимаемой жидкости. При скоростях и давлениях, характерных для течения воздуха в легких человека, сжимаемостью воздуха можно пренебречь.

Расчет бронхиального дерева в симметричной модели бронхиального дерева можно проводить по частям, отдельно для каждой бифуркации. Эта возможность показана в данной модели для ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости. Скорости воздуха в легких маленькие и числа Рейнольдса значительно меньше критических.

Расчет течения в бронхиальном дереве человека проводился поэтапно (от верхней бифуркации к нижней). Для нижней бифуркации граничные условия на входе являются выходными данными верхней бифуркации.

Научная новизна

1. Впервые создана аналитическая методика построения полного (от трахеи до альвеол) трехмерного бронхиального дерева человека в норме и при патологии. На основе созданной методики построена трехмерная модель симметричного бронхиального дерева человека, которая описывает различные патологические изменения в бронхах человека (приступ астмы, фиброз легких и т.д.).
2. Впервые проведены расчеты ламинарного течения воздуха в полном бронхиальном дереве человека (от входного бронха до альвеол). Показано, что при ламинарном течении воздуха в бронхах падение давления меньше, чем при турбулентном течении. Искажение цилиндрической формы бронхов при патологии приводит к увеличению падения давления в бронхиальном дереве.
3. Впервые проведены расчеты осаждения капель лекарственного аэрозоля в полном бронхиальном дереве человека (вплоть до альвеол) и установлены закономерности осаждения капель лекарства в легких человека в зависимости от длительности и интенсивности вдоха.
4. Проведены расчеты использования термической гелий-кислородной смеси при дыхании больного – показаны физические особенности дыхания гелий-кислородной смесью.
5. Показано, что термический эффект (превышение температуры тела человека) нагретой гелий-кислородной смеси наблюдается только в верхнем отделе бронхов.
6. Впервые проведены трехмерные расчеты тепло- и влагообмена в легких человека, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными, что говорит о том, что данная модель достоверно описывает дыхательный процесс.

На защиту выносятся:

- Разработанный алгоритм трехмерного аналитического построения полного (с 0-й до 23-й бифуркации) симметричного бронхиального дерева человека в норме и при патологии.
- Разработанная трехмерная численная методика поэтапного расчета течения воздуха в полном (вплоть до альвеол) бронхиальном дереве человека.
- Результаты расчетов осаждения капель лекарственного аэрозоля в полном бронхиальном дереве человека (вплоть до альвеол) и установленные закономерности осаждения капель лекарства в легких человека от длительности и интенсивности вдоха.
- Результаты расчетов использования термической гелий-кислородной смеси при дыхании и выявленные физические особенности дыхания гелий-кислородной смесью. Показано, что термический эффект (превышение

температуры тела человека) нагретой гелий-кислородной смеси наблюдается только в верхнем отделе бронхов.

- Верифицированная по экспериментальным данным численно-аналитическая модель тепло- и влагообмена в легких человека.

Практическая значимость работы. Для практического применения данных исследований и методик приема лекарственных средств ингаляционным способом необходимо проведение математического и численного исследования осаждения лекарственных форм препаратов в легких (бронхиальном дереве человека). Экспериментальные гистологические исследования на лабораторных животных (крысах и мышах) не дают полностью ответ на данный вопрос из-за физиологического различия морфологии легких мелких животных и человека.

Достоверность результатов подтверждается верификацией физико-математических моделей на экспериментальных данных тепло- и влагообмена в легких человека.

Апробация результатов исследования

Результаты работ докладывались на всероссийских и международных конференциях.

- XIII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Санкт-Петербург, 2023 г.).
- 27-я Всероссийская конференция по численным методам решения задач теории упругости и пластичности (Красноярск, 2021 г., 2023 г.).
- IV Конференция «Проекты, поддержанные Правительством Новосибирской области, Российским фондом фундаментальных исследований и Российским фондом, для экономики региона» (Новосибирск, 2023 г.).
- Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии (Новосибирск – Шерегеш, 2018–2023 г.).
- International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022) (Новосибирск, 2022 г., 2018 г.).
- II International Workshop and School of Young Scientists (Владивосток, 2021 г.).
- Международная научная студенческая конференция (2019 г., 2020 г.).
- Taiwan-Russia COVID-19 Webinar on «Treating coronavirus, developing vaccine and drug for COVID-19» (Новосибирск, 2020 г.).
- XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019 г.).
- Taiwan-Russia bilateral symposium: 2018 interdisciplinary research for biophysics, life sciences and biomedicine (Taiwan, 2018 г.).

Личный вклад автора. Работа производилась в ФГБУН «Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН». Результаты, представленные в данной работе, получены автором совместно с его научным руководителем и коллегами.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследования получены автором лично. По теме исследования опубликовано 23 печатных работ, из которых 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, и 4 статьи в международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 53 наименования. Объем работы составил 105 страниц, включая 56 рисунков, 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении подробно описаны актуальность и новизна научной-исследовательской работы. Сформированы цели и задачи, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор литературы, посвященной построению математических моделей бронхиального дерева человека, описана созданная полная математическая модель бронхиального дерева человека.

В п. 1.1 описана общая информация о структуре, строении бронхиального дерева. Дано обоснование ламинарности течения в нижних дыхательных путях. Представлена динамика общей заболеваемости болезнью органов дыхания в РФ.

В п. 1.2 подробно представлен литературный обзор, посвященный анализу существующих математических моделей построения бронхиального дерева человека. На основе имеющихся литературных данных показаны плюсы и минусы разработанных ранее моделей.

В п. 1.3 представлено описание гистологического строения внутренних форм бронха. Показано, что при моделировании нижних дыхательных путей необходимо учитывать не только параметры радиусов, длин, но и реальное сечение бронхов (или близкую к реальной форму внутреннего строения бронхов), так как форма достаточно сильно оказывает влияние на течение воздуха в бронхах.

В п. 1.4 представлены формулы для симметричной модели дихотомии, описывающие радиус и длины входящих бронхов, которые необходимы для создания полного бронхиального дерева человека.

В п. 1.5 подробно представлены аналитические формулы, моделирующие внутренние сечения бронхов. Продемонстрировано описание построения обструктивного строения бронха. Показано отклонение «звездчатого» бронха от здорового бронха.

В п. 1.6 показано, насколько сильно влияют внутренние формы бронхов на параметры течения. Приведены зависимости перепада давления от формы поперечного сечения трубы при ламинарном течении.

В п. 1.7 даны впервые разработанные в данном исследовании аналитические формулы построения бифуркации и нижних дыхательных путей, которая имеет значительные преимущества над существовавшими ранее моделями. Подробно описаны идеи и методика построения отдельной бифуркации (рис. 1).

В п. 1.8 представлена система, описывающая смещение начала координат так, чтобы начало переместилось в середину правого или левого выходящего бронха предыдущей бифуркации. Продемонстрированы матрицы преобразования системы координат для четного и нечетного номера бифуркации. Показаны картина сочленения 2-го и 3-го бронхов с поворотом на 90° и

построенные симметричные бронхиальные деревья до 5-й генерации с круглым и «звездообразным» сечениями.

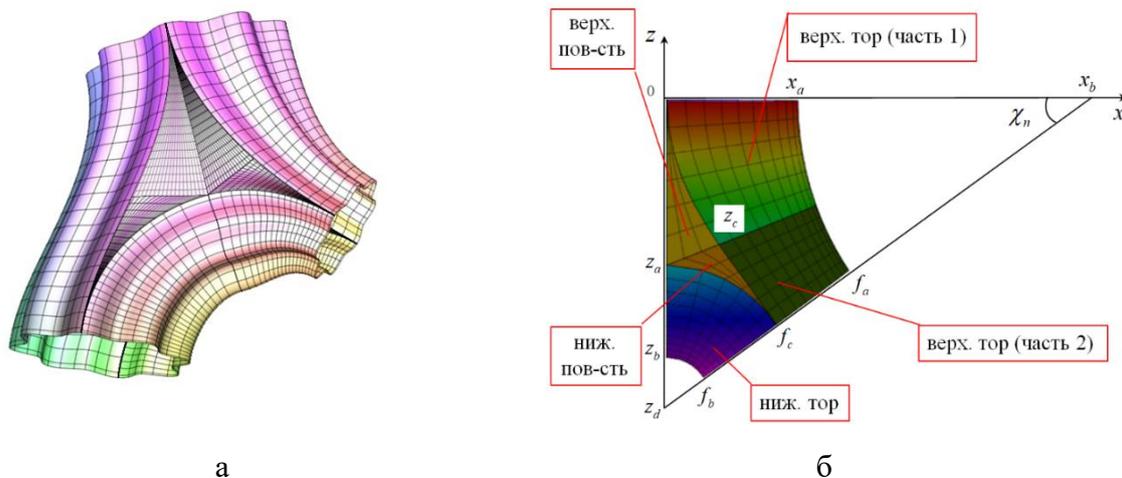


Рис. 1. Построение n -й бифуркации бронхиального дерева (выходные бронхи не изображены на рисунке). Общий вид трехмерной бифуркации (а). Проекция в плоскости $y = 0$ (б). Здесь $(0, x_a, f_a, f_c)$ – верхний тор, (z_a, f_c, f_b, z_c) – нижний тор, $(0, z_e, z_a)$ – верхняя поверхность, (z_a, z_e, f) – нижняя поверхность

Во **второй главе** представлена постановка задачи, описаны начальные и граничные условия. Подробно показана разработанная методика расчета. Представлены результаты численного моделирования течения воздуха в бронхиальном дереве легких человека.

В п. 2.1 дано описание уравнений, решаемых в рамках математической модели течения жидкости в канале.

В п. 2.2 продемонстрировано подробное описание построения расчетной сетки, используемой для решения поставленной задачи. Показаны размеры и количества ячеек на один отдельный бронх при круглом сечении бронха. Дано обоснование сгущения сетки вблизи стенок канала.

В п. 2.3–2.4 приведены уравнения, описывающие ламинарное течение жидкости в дыхательной системе, подробно описаны методики, используемые для расчета течения воздуха как в отдельном бронхе, так и во всей ветви бронхиального дерева. Предложенные методики расчета позволяют на порядок снизить время расчета. Показаны результаты расчетов скорости и числа Рейнольдса, обосновывающего ламинарность течения.

В п. 2.5 показана предлагаемая численная методика последовательного расчета бронхиального дерева человека. Такой подход оправдан методикой построения бронхиального дерева. Дано обоснование использования данных углов поворота при переходе между n -м и $(n+1)$ -м бронхом. Показаны профили скорости во входном и выходных сечениях бронхов для расхода воздуха 24 л/мин (рис. 2).

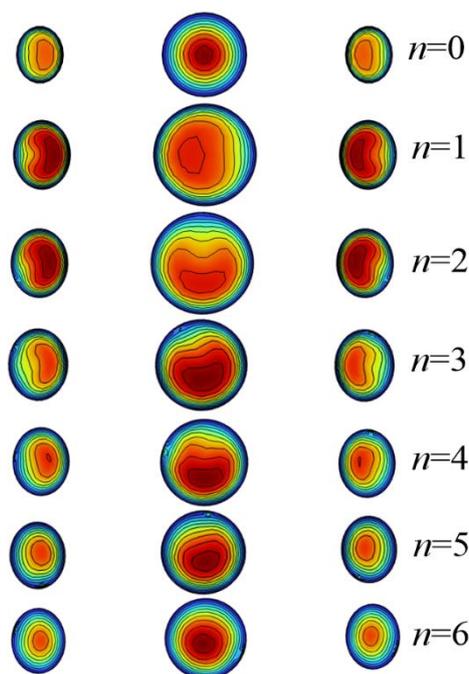


Рис. 2. Профили скорости во входном сечении бронха (центральные круги на рисунке) и в выходных сечениях бронха (левые и правые круги на рисунке)

В п. 2.6 представлены результаты численного расчета перепада давления в зависимости от расхода воздуха, приведены сравнения данной модели (с круглым и «звездообразным» сечением) с моделями А.М. Fernández-Tena¹ (рис. 3) и М.С. Islam² (рис. 4) и др.

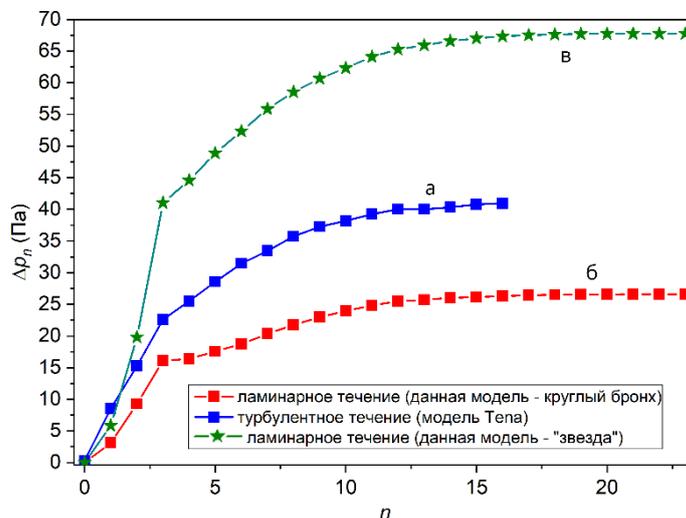


Рис. 3. Результаты численного расчета течения воздуха в бронхиальном дереве человека при расходе 50 л/мин: а – для дерева с круглыми бронхами, полученные в работе Fernández-Tena¹; б – дерево с круглыми бронхами; в – дерево со звездообразными бронхами. Результаты б и в – это расчеты рассматриваемой модели

¹ Fernández-Tena A.M., Casan P., Fernández J., et al. Characterization of particle deposition in a lung model using an individual path // EPJ Web of Conferences. – 2013. – Vol. 45. – P. 1–5.

² Islam M.S., Saha S.C., Young P.M. Aerosol particle transport and deposition in a CT-based lung airway for helium-oxygen mixture // Proceedings of the 21st Australasian Fluid Mechanics Conference, AFMC 2018. – 2018. – December.

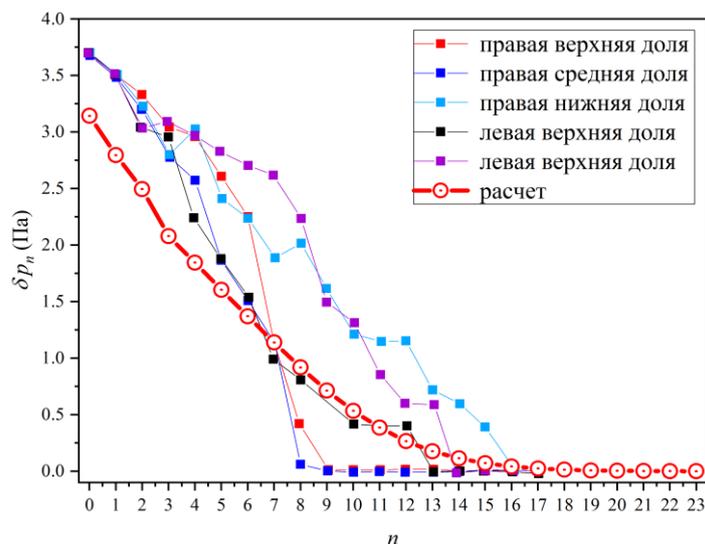


Рис. 4. Результаты расчета падения давления вдоль бронхов для вдоха при расходе 7,5 л/мин. Квадратные значки – результаты расчета M.S. Islam² для пяти различных ветвей бронхиального дерева до 17-й генерации бронхов. Кружки – расчет по представленной модели до 23-й генерации бронхиального дерева

В п. 2.7 описана методика «отключения» бронхов (рис. 5) для имитации поражения легких на основе созданной аналитической модели. Показаны результаты расчетов при различных степенях поражения легких (рис. 6). Показано, что сужение бронха приводит к значительному затруднению дыхания.

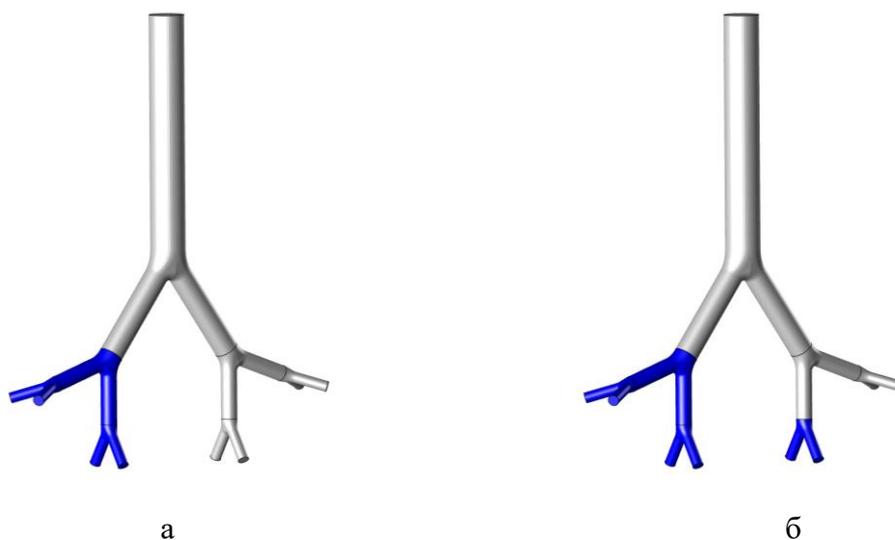


Рис. 5. Схема «отключения» бронхов для имитации поражения легких. В бронхи, отмеченные синим цветом, воздух не поступает. Показаны две степени поражения легких: а – поражение легких 50 %; б – поражение легких 75 %

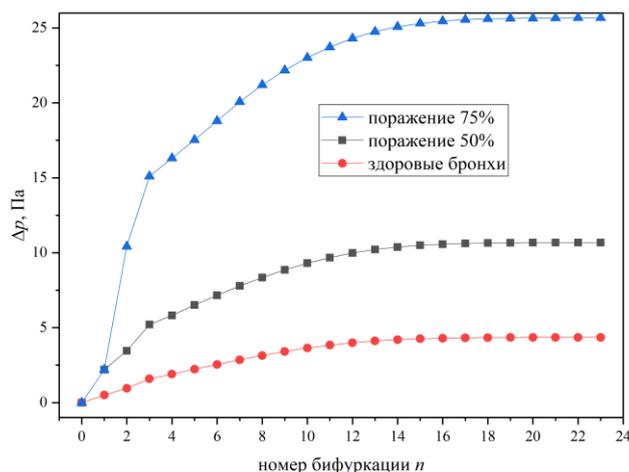


Рис. 6. Перепад давления в бронхиальном дереве человека в здоровых легких и в легких со степенью поражения 50 % и 75 %

В п. 2.8 показана воссозданная упрощенная модель верхних дыхательных путей (рис. 7). Описан произведенный нестационарный расчет квазистационарным методом, показаны результаты расчетов при нестационарном вдохе на выходе из 23-й бифуркации для здоровой дыхательной системы и при сужении бронха на 10 % (по сравнению с круглым сечением), вызванном начальной стадией заболевания бронхиальной астмой (рис. 8).

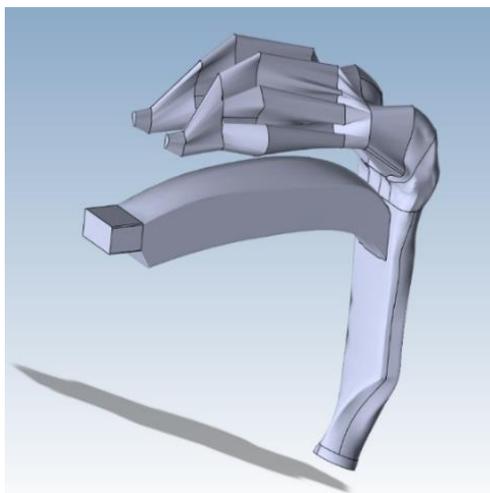


Рис. 7. Воссозданная упрощенная модель верхних дыхательных путей

Третья глава посвящена численному моделированию дыхания человека с частицами пыли или каплями лекарственных средств, представлены результаты численного моделирования тепло- и влагообмена в нижних дыхательных путях человека.

В п. 3.1–3.2 описаны существующие виды основных ингаляционных устройств для введения лекарственных препаратов в дыхательные пути человека. Показаны факторы, влияющие на отложение лекарственных средств и частиц пыли в нижних дыхательных путях.

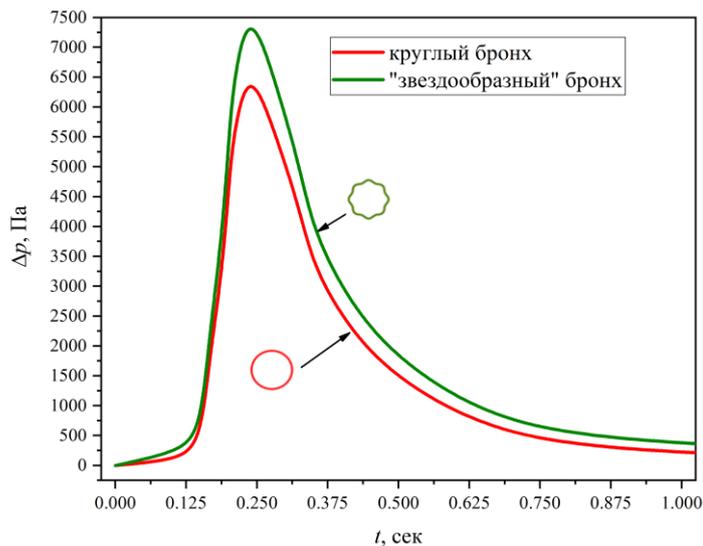


Рис. 8. Перепад давления между входом в носоглотку и 23-м бронхом человека при нестационарном вдохе для здоровой дыхательной системы и для сужения бронхов, вызванного начальной стадией приступа бронхиальной астмы

В п. 3.3 продемонстрировано, как влияют хронические обструктивные заболевания на внутреннее строение бронхиального дерева, какие изменения они вызывают.

В п. 3.4 дано описание системы уравнений движения капель. Описаны некоторые допущения и граничные условия.

В п. 3.5 показаны проекции осаждения капель аэрозолей в окрестности кардиального расхождения бронхов (рис. 9). Представлены результаты численного расчета осаждения лекарственных средств аэрозолей в нижних дыхательных путях (рис. 10). На основе полученных данных установлено, как время и интенсивность вдоха оказывают влияние на осаждение частиц.

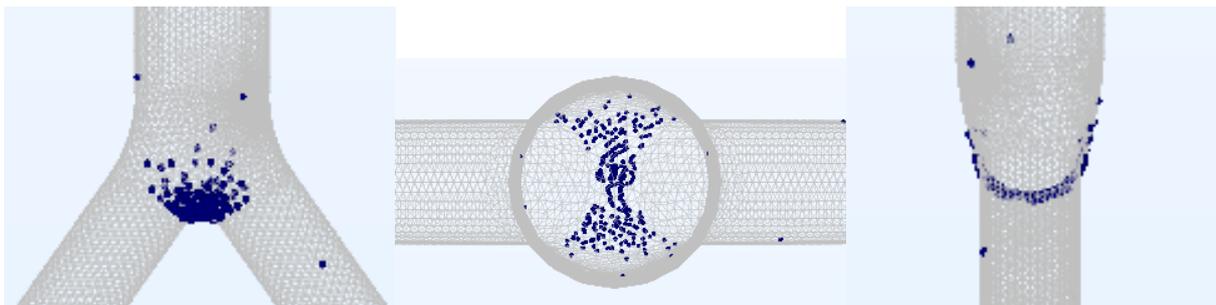


Рис. 9. Три проекции осаждения капель аэрозоля в окрестности кардиального расхождения бронхов

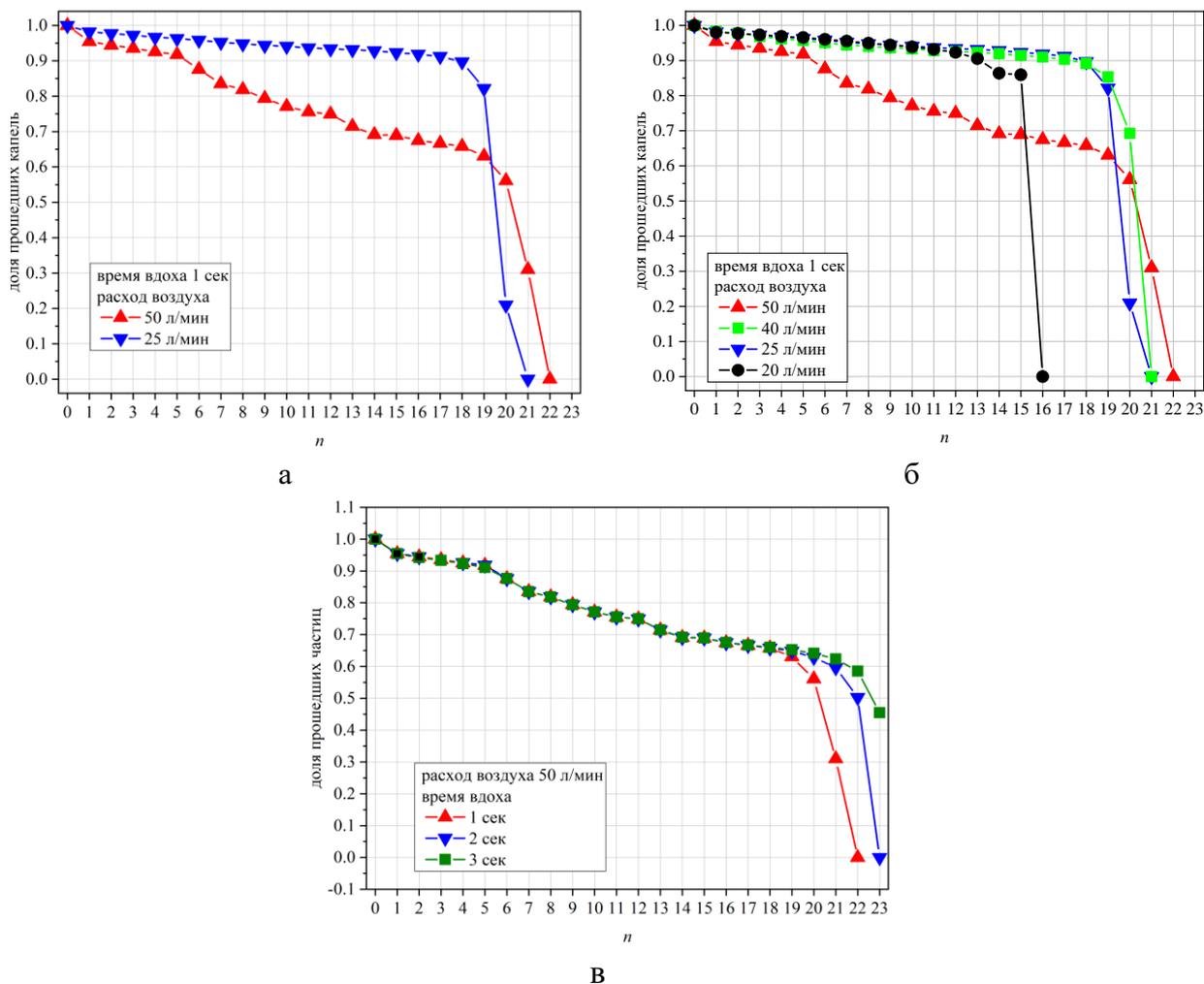


Рис. 10. Доля прошедших капель аэрозоля: *а* – в зависимости от номера бифуркации; *б* – за одну секунду; *в* – в зависимости от номера бифуркации при вдохе в 1, 2 и 3 секунды

В п. 3.6 дан анализ литературы, посвящённый тепло- и влагообмену в бронхиальном дереве человека, показаны используемые для этого модели.

В п. 3.7 даны уравнения тепло- и влагообмена в изогнутом канале, решаемые в рамках математической модели.

В п. 3.8 показаны результаты расчетов тепло- и влагообмена в нижних дыхательных путях. Произведено сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными работ М. Tawhai³ и S.N. Ryan⁴ (рис. 11, 12). Показано, что созданная аналитическая модель и используемая модель расчета достаточно адекватно описывает дыхательный процесс.

³ Tawhai M., Pullan A.J., Hunter P.J. Generation of an Anatomically Based Three-Dimensional Model of the Conducting Airways // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2000. – Vol. 28. – No. 7. – P. 793–802.

⁴ Ryan S.N., Rankin N., Meyer E., Williams R. Energy balance in the intubated human airway is an indicator of optimal gas conditioning // *Critical Care Medicine*. – 2002. – Vol. 30. – No. 2. – P. 355–361.

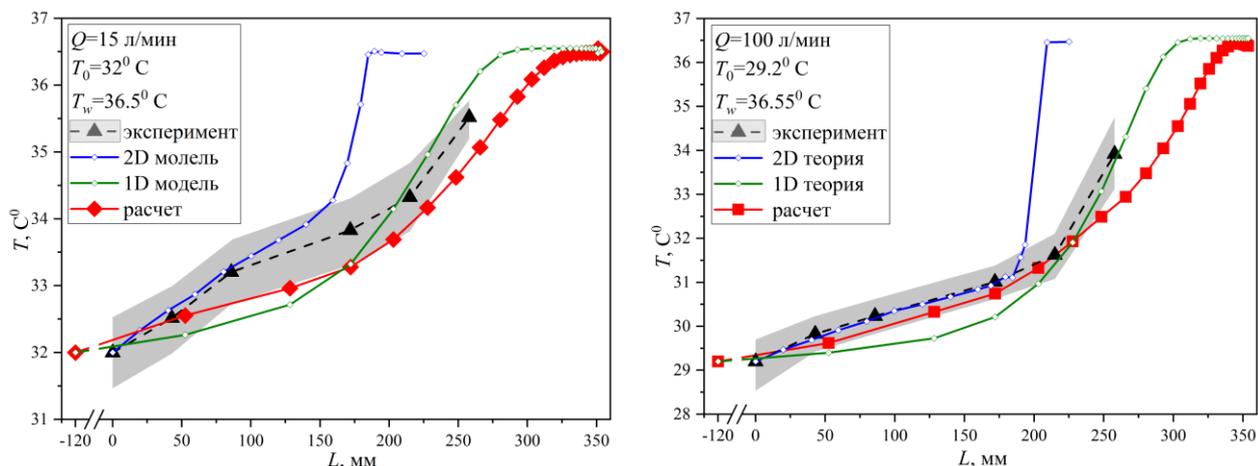


Рис. 11. Изменение температуры вдыхаемого воздуха в зависимости от длины ветви бронхиального дерева. Относительная влажность вдыхаемого воздуха $c_0 = 0,8$

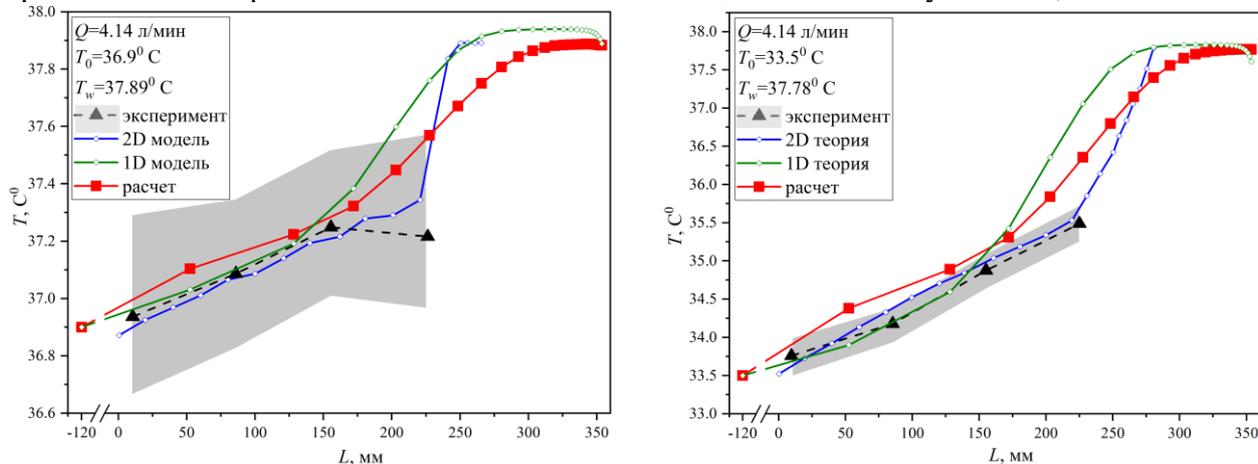


Рис. 12. Изменение температуры вдыхаемого воздуха в зависимости от длины ветви бронхиального дерева при расходе воздуха $Q = 4,14$ л/мин. Относительная влажность вдыхаемого воздуха $c_0 = 0,9$

В п. 3.9 представлено численное моделирование дыхания человека воздухом и разогретой термической гелий-кислородной смесью (рис. 13, 14), используемой для лечения больных бронхиальной астмой и COVID-19. Показано, что дышать гелий-кислородной смесью значительно легче, чем воздухом: в 1,5–2 раза в зависимости от расхода вдыхаемого воздуха.

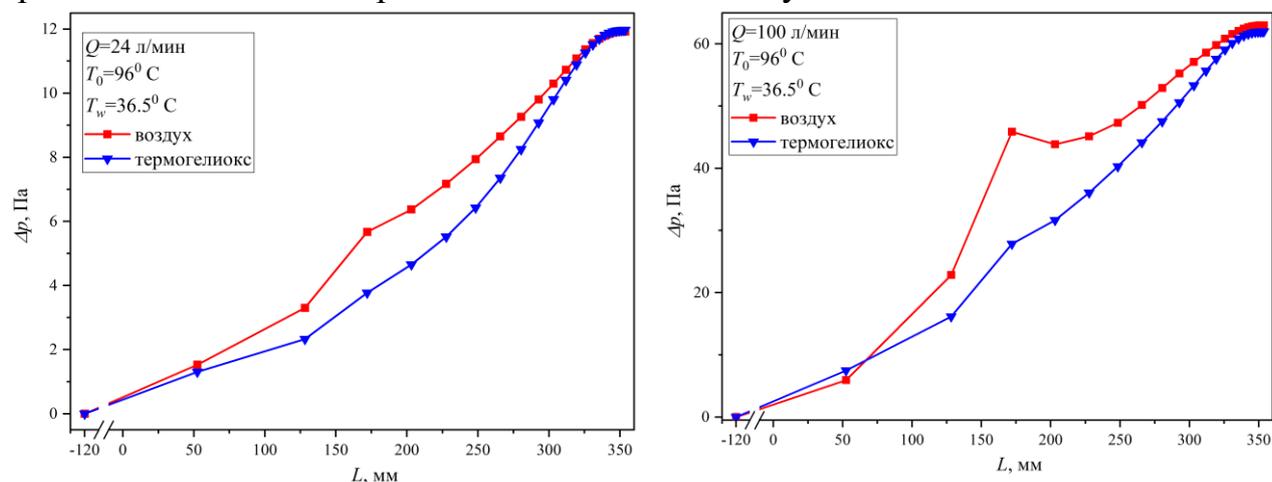


Рис. 13. Сравнение относительного давления при дыхании воздухом и термогелиоксом в зависимости от длины ветви бронхиального дерева при расходе газа в 24 и 100 л/мин

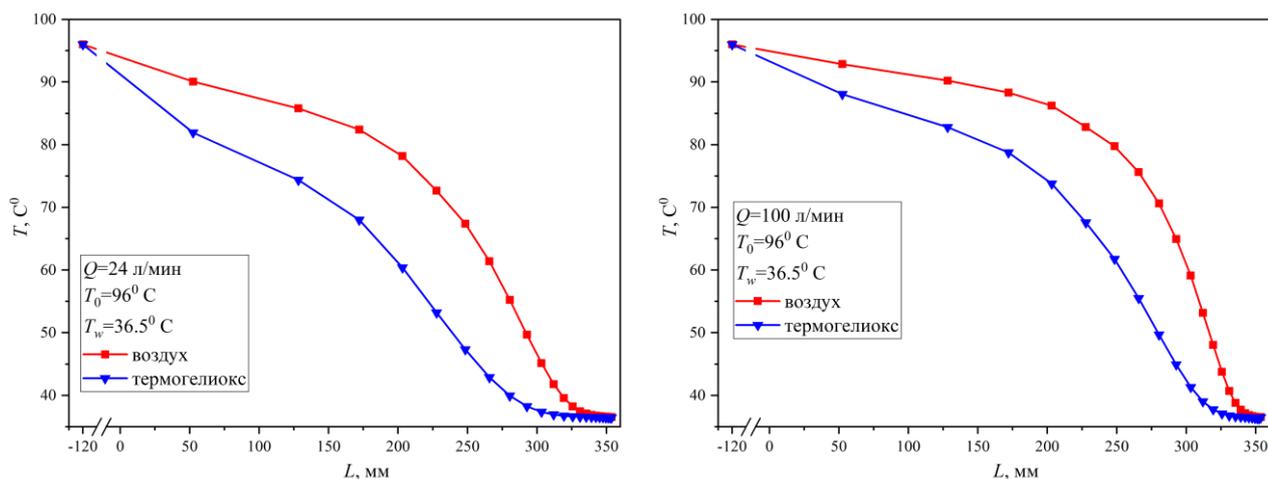


Рис. 14. Сравнение температуры при дыхании воздухом и термогелиоксом в зависимости от длины ветви бронхиального дерева при расходе газа в 24 и 100 л/мин

В заключении сформированы основные выводы диссертационной работы.

1. Впервые получены аналитические формулы для построения трехмерной модели бифуркации бронхов, которые описывают бронх в нормальном и патологическом состоянии.
2. Аналитически построено полное (от трахеи до альвеол) трехмерное симметричное бронхиальное дерево человека в норме (круглое сечение бронхов) и при патологии («звездообразное» сечение бронхов).
3. Разработан алгоритм поэтапного численного расчета течения в полном бронхиальном дереве человека от входного бронха до альвеол. Алгоритм позволяет на порядки ускорить время расчета течения воздуха в легких человека.
4. Впервые проведены расчеты ламинарного течения воздуха в полном бронхиальном дереве человека (вплоть до альвеол) в норме и при патологическом сужении бронхов.
5. Показано, что частичное поражение легких существенно затрудняет дыхание: например, при 50-процентном поражении легких дыхание затрудняется почти в три раза.
6. Получены закономерности осаждения капель лекарственного аэрозоля в легких человека в зависимости от размера, времени и интенсивности вдоха. Показана плохая эффективность стандартного небулайзера – только при очень длительном вдохе половина лекарственных капель достигает альвеол.
7. Получены закономерности использования термической гелий-кислородной смеси для дыхания больного. Показано, что термический эффект (превышение температуры тела человека) нагретой гелий-кислородной смеси наблюдается только в верхнем отделе бронхов.
8. Впервые проведены трехмерные расчеты тепло- и влагообмена в легких человека, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными, что говорит о том, что данная модель достоверно описывает дыхательный процесс.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК при МОиН РФ

1. Medvedev A.E., **Gafurova P.S.** Analytical design of the human bronchial tree for healthy patients and patients with obstructive pulmonary diseases // *Mathematical Biology and Bioinformatics*. – 2019. – Vol. 14, No. 2. – P. 635–648.
2. Medvedev A.E., Fomin V.M., **Gafurova P.S.** Three-dimensional model of the human bronchial tree – modeling of the air flow in normal and pathological cases // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2020. – Vol. 61, No. 1. – P. 1–13.
3. Medvedev A.E., **Golysheva P.S.** Simulation of air motion in human lungs during breathing. dynamics of liquid droplet precipitation in the case of medicine drug aerosols // *Mathematical Biology and Bioinformatics*. – 2021. – Vol. 16, No. 2. – P. 422–438.
4. **Голышева П.С.**, Медведев А.Е. Физико-математическое моделирование дыхания человека при различных заболеваниях легких // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2023. – Т. 64, № 6. – С. 114–118.
5. Medvedev A.E., **Golysheva P.S.** Three-dimensional simulation of heat and moisture transfer in the human bronchial tree // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. – 2024. – Vol. 17. № 1. – P. 136-145

Статьи в сборниках конференций индексируемых в Scopus и WoS

6. Medvedev A.E., **Gafurova P.S.** Three-dimensional model of the air flow in the human bronchial tree (Normal and pathological cases) // *AIP Conference Proceedings: High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM–2019): Proceedings of the XXVI Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter, dedicated to the 150th anniversary of the birth of S.A. Chaplygin (Novosibirsk, 3–5 Apr. 2019)*. – S.l.: AIP Publishing, 2019. – Vol. 2125, No. 030009(4).
7. Medvedev A.E., **Gafurova P.S.** Simulation of the deposition of aerosol droplets in a person's bronchial tree // *Journal of Physics: Conference Series: XVI All-Russian Seminar with international participation «Dynamics of Multiphase Media» (Novosibirsk, 30 Sept. – 5 Oct. 2019)*. – S. 1. IOP Publishing, 2019. – Vol. 1404. – P. 012031(6).
8. Medvedev A.E., **Gafurova P.S.** Air flow and precipitation of medicine aerosol droplets in the human bronchial tree // *AIP Conference Proceedings: XX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR – 2020) (Novosibirsk, 1–7 Nov. 2020)*. – S. 1. AIP Publishing, 2021. – Vol. 2351, No. 1. – P. 030018(5).
9. **Gafurova P.S.**, Medvedev A.E. Modeling of breathing, precipitation of medical drugs in aerosol form, and curing of coronavirus infection by using a thermal helium-oxygen mixture // *AIP Conference Proceedings: XXVII conference «Numerical methods of solving problems of elasticity and plasticity theory», devoted to the 100th anniversary of academician Nikolay Nikolayevich Yanenko (EPPS – 2021), (Krasnoyarsk, 5–9 July 2021)*. – S. 1. AIP Publishing, 2021. – Vol. 2448, No. 1. – P. 020006(5).

10. **Гафурова П.С.**, Медведев А.Е. Создание 3D модели бронхиального дерева // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск – Шерегеш, 16–22 марта 2018 г.) / под ред. В.В. Козлова. – Новосибирск, 2018. – С. 45–46.
11. **Гафурова П.С.** Моделирование течения в бронхиальном дереве человека // МНСК-2018. Физические методы в естественных науках: Материалы 56-й Междунар. науч. студ. конф. (Новосибирск, 22–27 апр. 2018 г.): тез. докл. – Новосибирск: НГУ, 2018. – С. 5.
12. Medvedev A.E., Fomin V.M., **Gafurova P.S.** Simulation of the flow in the human bronchial tree // XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018) (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018): abstracts. – Novosibirsk, 2018. – Pt. II. – P. 195–196.
13. Medvedev A.E., Fomin V.M., **Gafurova P.S.** Mathematical Model of Healthy and Pathological Human Bronchial Trees // Abstract of Taiwan-Russia Bilateral Symposium «2018 Interdisciplinary Research for Biophysics, Life Science and Biomedicine» (7–8 November, 2018. Academia Sinica Go, Taipei, Taiwan). – P. 17–18.
14. Медведев А.Е., **Гафурова П.С.** Течение воздуха в полном бронхиальном дереве человека в норме и при патологии // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 19–24 авг. 2019 г.): сб. тр.: в 4 т. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. – Т. 4. Материалы симпозиумов. – С. 184–186.
15. Медведев А.Е., **Гафурова П.С.** Моделирование осаждение капель аэрозоля в бронхиальном дереве человека // Динамика многофазных сред: XVI Всерос. семинар с междунар. участием (Новосибирск, 30 сент. – 5 окт. 2019 г.): тез. докл. – Новосибирск: Б. и., 2019. – С. 114–116.
16. **Гафурова П.С.**, Медведев А.Е. Расчет течения воздуха в модели бронхиального дерева человека // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XIII Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск – Шерегеш, 15–22 марта 2019 г.). – Новосибирск, 2019. – С. 44–45.
17. **Гафурова П.С.** Моделирование течения воздуха в бронхиальном дереве человека // МНСК-2019. Физика сплошных сред: Материалы 57-й Междунар. науч. студ. конф. (Новосибирск, 14–19 апр. 2019 г.): тез. докл. – Новосибирск: НГУ, 2019. – С. 7.
18. **Гафурова П.С.**, Медведев А. Е. Расчет течения воздуха и осаждения частиц в бронхиальном дереве человека // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: 14 Всерос. шк.-конф. молодых ученых (Новосибирск, Шерегеш, 28 февр. – 6 марта 2020 г.): тез. докл. – Новосибирск: Параллель, 2020. – С. 50–51.
19. Medvedev A.E., **Gafurova P.S.** Air flow and precipitation of medicine aerosol droplets in the human bronchial tree // XX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR – 2020) (Novosibirsk, 1–7 Nov. 2020): Abstr. – Novosibirsk: Parallel, 2020. – Pt. II. – P. 117–118.

20. **Гафурова П.С.,** Медведев А.Е. Разработка физико-математической модели течения и осаждения аэрозольных форм лекарственных средств в бронхиальном дереве человека // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: 15 Всерос. шк.-конф. мол. учен. (Новосибирск, Шерегеш, 25 февр. – 5 марта 2021 г.): тез. докл. – Новосибирск: Автограф, 2021. – С. 53–54.
21. **Голышева П.С.,** Медведев А.Е. Физико-математическое моделирование дыхания человека при частичном поражении легких // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: 16 Всерос. шк.-конф. мол. учен. (Новосибирск, 14–17 марта 2022 г.): тез. докл. – Новосибирск: Параллель, 2022. – С. 30–31.
22. **Golysheva P.S.,** Medvedev A.E. Numerical modeling of human breathing in lung pathology // XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR – 2022) (Novosibirsk, 8-14 Aug. 2022): Abstr. – 2022. – Pt. II. – P. 59–60.
23. **Голышева П.С.,** Медведев А.Е. Физико-математическое моделирование течения воздуха в полном бронхиальном дереве человека при обструктивных и хронических болезнях легких // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: XVII Всерос. конф. мол. учен. (Новосибирск, Шерегеш, 26 февр. – 6 марта 2023 г.): сб. тез. – Новосибирск: НГУ, 2023. – С. 53–54.

Ответственный за выпуск П.С. Голышева

Подписано в печать 30.01.2024 г.
Формат 60×84/16. Уч.-изд. л. 1,1. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ №15
Издательско-полиграфический центр НГУ.
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2