



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
(СГУ)

Астраханская ул., д. 83, г. Саратов, Россия, 410012
Тел. 8 (8452) 26-16-96, факс 8 (8452) 27-85-29
E-mail: rector@sgu.ru, http://www.sgu.ru
ОКПО 02069177, ОГРН 1026402674935
ИНН/КПП 6452022089/645201001

Astrakhanskaya Street, 83, Saratov, Russia, 410012
tel: 8 (8452) 26-16-96, fax: 8 (8452) 27-85-29
E-mail: rector@sgu.ru, http://www.sgu.ru

17.01.2025 № 94-УСХ
На № _____ от _____

П

Д. Ф.-М. Н., П

ВЕРЖДАЮ
чной работе
ду развитию
ОРОНОВСКИЙ

варя 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Цинкера Михаила Юрьевича
«Математическая модель для описания течения воздуха в воздухоносных
путях и деформируемых легких человека в процессе дыхания»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.2.2. Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы выполненного исследования

Работа посвящена разработке математической модели, описывающей процесс течения воздуха в дыхательной системе человека. Дыхательная система представляет собой очень сложную биомеханическую систему с разнообразными механическими свойствами ее компонент (воздухоносных путей и легких человека). Дыхательные пути представляют сложную разветвленную сеть биологических каналов с большим количеством элементов и нерегулярной структурой, при этом размеры каналов различаются на несколько порядков, а легкие испытывают циклические упругие деформации с большими градиентами перемещений. Рассматриваемая в диссертации задача моделирования процесса дыхания

находится в фокусе внимания ученых-механиков более 20 лет, а в последнее десятилетие данная область механики в мире развивается особенно интенсивно. Наиболее трудной частью этой задачи является моделирование структуры легких и их динамического поведения при вдохе/выдохе. Работа актуальна как для развития механики многофазных сред, так и для многих медицинских приложений.

Научная новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

О научной новизне свидетельствуют:

– новая комплексная математическая модель для исследования течения воздуха в дыхательной системе, состоящая из двух взаимосвязанных через граничные условия подмоделей: 1) подмодель течения воздуха в воздухоносных путях и 2) подмодель течения воздуха в легких, описываемых с использованием модели упруго-деформируемой насыщенной сплошной пористой среды с учетом геометрической нелинейности задачи, а также взаимодействия воздуха в легких и легочной ткани;

– полученные разрешающие соотношения для решения нелинейной задачи течения воздуха в деформируемой пористой среде легких человека;

– разработанные алгоритмы и комплекс программ для решения нелинейной связанной задачи течения воздуха в деформируемой пористой среде легких с использованием пошаговой процедуры;

– построенная трехмерная геометрическая модель воздухоносных путей и легких человека, а также предложенный закон изменения формы легких, учитывающий грудное и диафрагмальное дыхание;

– выявленные с использованием численных расчетов особенности течения воздуха, содержащего пылевые частицы реального дисперсного состава и плотности, а также полученные количественные оценки оседания частиц в воздухоносных путях человека;

– полученные параметры течения воздуха и деформирования легочной ткани в различные моменты дыхательного цикла.

Математическая постановка, разрешающие соотношения, алгоритмы и комплекс программ для их реализации, а также результаты, полученные с использованием предложенной математической модели, обладают значительной научной новизной. Диссертационная работа и полученные в ней результаты соответствуют пунктам 1, 3, 8 паспорта специальности 1.2.2.– Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: 1) разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; 3) реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента; 8) комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Практическая и теоретическая значимость работы

Предложенная соискателем математическая модель является базовой и обладает высоким потенциалом применения при решении широкого круга задач в области медицины. Модель может быть использована для моделирования процесса дыхания в норме и при патологии, а также описания поступления и пространственного распределения в органах и тканях дыхательной системы химических веществ, поступающих с вдыхаемым воздухом. В перспективе она может быть полезна при моделировании развития бронхолегочных патологий, разработке средств индивидуальной защиты, рекомендаций для корректировки гигиенических нормативов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новой математической модели, описывающей процесс течения воздуха в упруго-деформируемой насыщенной пористой среде, испытывающей большие градиенты перемещений.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Сформулированные в диссертационной работе положения, выводы и заключения подтверждаются анализом научной литературы по тематике исследования. Используемые в работе гипотезы являются обоснованными. Применение модели деформируемой сплошной пористой среды для описания процессов в легких человека представляется достаточно разумным допущением. Достоверность результатов обеспечена корректной постановкой задач, применением современного математического аппарата и численных методов. Достоверность результатов численного моделирования подтверждается соответствием получаемых результатов физиологическим данным во время спокойного дыхания, удовлетворительным качественным и количественным соответствием результатов численного моделирования с данными, приведенными в публикациях других авторов, а также с результатами проведенного натурного эксперимента по исследованию оседания пылевых частиц в воздухоносных путях человека.

Оценка содержания диссертации и автореферата

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы, приложений. Диссертация изложена на 206 страницах, включая 4 приложения (на 25 страницах) и список литературы, включающий 245 наименований (на 30 страницах). Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание и имеет логическую структуру.

Диссертация и автореферат написаны грамотным научным языком. Диссертация оформлена по ГОСТу, во *введении* лаконично и емко сформулированы все основные обязательные структурные элементы (актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы,

методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробации результатов).

В *первой главе* описывается физиология дыхательной системы, а также приведен подробный аналитический обзор, посвященный существующим подходам к моделированию процесса дыхания, который дает исчерпывающее представление о текущем состоянии исследований в данной области. Оценка существующих моделей дыхания и их недостатков аргументирована.

На основе обзора во *второй главе* (раздел 2.1) обоснованно сформулирована структурная схема математической модели течения воздуха в дыхательной системе, состоящей из двух подмоделей: подмодели воздухоносных путей и подмодели легких, обосновано использование модели деформируемой сплошной пористой среды для описания последних.

Стоит отметить серьезный уровень математической постановки задачи течения воздуха в деформируемой пористой среде легких (раздел 2.2), которая представляет собой совместную задачу деформирования двухфазной пористой среды и фильтрации воздуха через пористую среду. Постановка задачи учитывает геометрическую нелинейность, обусловленную большими градиентами перемещений; постановка осуществлена в скоростной форме, используются граничные условия кинематического типа. Отличием от существующих работ является использование гипотезы закона с использованием логарифмической коротационной производной логарифмической меры деформации (обычно используется гиперупругий закон). Необходимо отметить, что корректность определяющих соотношений с использованием логарифмической коротационной производной доказана только для изотропного упругого материала (о чем соискатель в диссертации упоминает, а в автореферате опускает).

Еще одним элементом новизны математической постановки подмодели легких является полученное автором на основе решения вспомогательной задачи о всестороннем растяжении/сжатии представительного объема двухфазной среды соотношение для связи скорости изменения среднего напряжения двухфазной среды легких со скоростью изменения объема двухфазной среды легких (соотношение 2.55 или 2.68), учитывающего взаимодействие воздуха и легочной ткани, вывод которого вынесен в *приложение А*. В существующих работах обычно используется существенно более простой вид соотношения для тензора напряжений двухфазной среды ($\sigma = \sigma_s - p_f \mathbb{I}$).

В разделе 2.3 приведена постановка задачи течения воздуха (многофазной смеси газа и пылевых частиц) в воздухоносных путях, учитывается оседание частиц на стенках каналов. При этом используется гипотеза о сферической форме несомых частиц. В качестве граничного условия на выходе из бронхов используются скорости потока воздуха, определенные на основе массовых потоков, получаемых из подмодели легких, что является достоинством представленной подмодели.

В *третьей главе* приведен вывод разрешающих соотношений для описания деформирования двухфазной среды легких и фильтрации воздуха через пористую среду. Соискателем приведен вывод обобщенного решения краевой задачи деформирования двухфазной сплошной среды, в том числе в компонентной форме (раздел 3.1). Получено разрешающее соотношение метода конечных элементов для задачи деформирования легких (раздел 3.2) и метода конечных объемов для задачи фильтрации через пористую среду легких (раздел 3.3). Выкладки, приведенные в главе, описаны детально, позволяют проследить корректность вывода представленных соотношений.

Четвертая глава посвящена алгоритмам реализации модели течения воздуха в дыхательной системе. В начале главы приведен общий алгоритм решения задачи с приведением схемы (рисунок 4.1), детально описан алгоритм реализации подмодели течения воздуха в деформируемой пористой среде легких (обладающей наибольшей сложностью и новизной в рассматриваемой работе), подробно описан алгоритм построения трехмерной геометрии и закон движения стенок легких, используемый в качестве граничных условий.

В *пятой главе* приведен анализ численных результатов течения воздуха в легких человека, полученных с использованием разработанного комплекса программ на языке C++, а также течения воздуха (многофазной смеси газа и пылевых частиц) в воздухоносных путях, полученных с использованием пакета Ansys CFX. Приведено пространственное распределение параметров легочной ткани и воздуха в легких в различные моменты одного дыхательного цикла: вектора точек легочной ткани, поля перемещения точек двухфазной среды легких, поля давлений газовой фазы, массовые потоки воздуха в легких (раздел 5.1). В разделе 5.2 описаны результаты течения запыленного воздуха в воздухоносных путях: представлены скорости потока воздуха в различные моменты вдоха и выдоха, приведены траектории движения частиц различного размера, оценки оседания частиц различных плотностей в респираторном тракте за время одного вдоха. Показано соответствие результатов численного моделирования результатам выполненного с участием соискателя натурального эксперимента.

В *заключении* приведены основные результаты работы и выводы, подтверждающие достижение поставленной цели исследования.

По работе имеются следующие замечания и вопросы:

1. На рисунке 4.1 приведен общий алгоритм решения задачи. Некоторые элементы на рисунке отмечены синим и красным цветом, при этом в тексте не поясняется, что это значит. Также на рисунке 4.1 приведены «Expressions», которые также в тексте не описываются.

2. Каким образом при реализации состыковываются решения для подмоделей? На каждом временном шаге или сначала ищется решение для подмодели течения воздуха в легких, затем определяется изменение массовых расходов на границе воздухоносных путей/ легких в процессе

дыхательного цикла и данный закон используется в качестве граничных условий для расчета течения воздуха в воздухоносных путях?

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки представленной работы. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, выстроена логически грамотно, является оригинальной, завершённой научно-квалификационной работой, содержащей новые научные положения, совокупность которых можно характеризовать как научное достижение в области математического моделирования. Основные результаты опубликованы в 45 научных публикациях, включая 10 в изданиях, входящих в международные базы цитирования, и/или в журналах, входящих в перечень ВАК. Получено 3 свидетельства о регистрации программ ЭВМ, 1 свидетельство о регистрации базы данных.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Представленные в диссертационной работе подходы могут использоваться при моделировании течения воздуха в каналах, а также в упруго-деформируемых насыщенных пористых средах. Одним из аспектов применения работы является исследование доставки лекарственных препаратов в организм человека ингаляционным способом.

Использование и развитие результатов диссертации рекомендуется продолжить в:

- 1) Пермском национальном исследовательском политехническом университете (г. Пермь);
- 2) Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь);
- 3) Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск);
- 4) ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения»
- 5) Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева.

Заключение

Диссертационная работа Цинкера Михаила Юрьевича «Математическая модель для описания течения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека в процессе дыхания», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, которая по актуальности и научному уровню, а также практической значимости полученных результатов удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, установленным Постановлением

Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней». Автор диссертационной работы Цинкер Михаил Юрьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».


Отзыв подготовлен доцентом, доктором физико-математических наук, профессором кафедры математической теории упругости и биомеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» Ивановым Дмитрием Валерьевичем (410012, Россия. г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83, +79878266748, ivanovdv.84@ya.ru).

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры математической теории упругости и биомеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (протокол № 8 от 18.12.2024 г.).

доцент, д.ф.-м.н., профессор
кафедры математической теории
упругости и биомеханики

— Д.В. Иванов
01.252.

профессор, д.ф.-м.н., заведующий
кафедрой математической теории
упругости и биомеханики


Л.Ю. Коссович
6.01.252.

