

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
Цинкера Михаила Юрьевича

на тему: “Математическая модель для описания движения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека в процессе дыхания” по специальности 1.1.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертационная работа Цинкера Михаила Юрьевича “Математическая модель для описания движения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека в процессе дыхания” посвящена созданию математической модели, описывающей движение воздуха в легких человека с учетом деформации легочного объема в процессе дыхания”, и созданию (на основе этой модели) программного комплекса для моделирования дыхания человека.

**Актуальность избранной темы.** Проблема загрязнения атмосферного воздуха является одной из серьезных современных угроз здоровью человека для большинства стран мира, в том числе – Российской Федерации (РФ). Многочисленные зарубежные и российские исследования доказали негативное воздействие загрязнения окружающей среды на здоровье человека. Сохранение здоровья населения, являются приоритетами политики РФ; так, Правительством РФ реализуется федеральный проект «Чистый воздух», направленный на снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в крупных промышленных центрах. Современные методы и технологии медицинской диагностики не позволяют в полной мере дать описание процесса дыхания человека, особенно в случаях заболевания легких. Создание моделей и программ математического моделирования дыхания человека позволяют восполнить пробелы медицинской диагностики.

**Научная новизна и практическая значимость исследований.** В диссертации Цинкера М. Ю. создана математическая модель, описывающая движение воздуха в легких человека с учетом деформации легочного объема в процессе дыхания.

Научная новизна диссертации состоит в том, что

- 1) предложена новая математическая модель для исследования течения воздуха в ДС, состоящая из подмодели течения воздуха в воздухоносных путях и подмодель течения воздуха в легких, которые представлены упруго-деформируемой насыщенной пористой средой;
- 2) получены разрешающие соотношения для решения нелинейной задачи течения воздуха в деформируемой пористой среде легких человека;
- 3) разработан алгоритм и комплекс программ для решения нелинейной связанной задачи течения воздуха в деформируемой пористой среде легких с использованием пошаговой процедуры;
- 4) построена трехмерная геометрия воздухоносных путей и легких человека и предложен закон изменения формы легких в процессе дыхания, учитывающий грудное и диафрагмальное дыхание;
- 5) с использованием численных расчетов выявлены особенности течения воздуха, содержащего пылевые частицы реального дисперсного состава и плотности, а также получены количественные оценки оседания частиц в воздухоносных путях человека.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной модели для моделирования процесса дыхания в норме и при патологии, для выявления пространственного распределения зон локализации риска развития морфологических нарушений, а также для последующего прогнозирования риска развития профессиональной бронхолегочной патологии. Еще одним аспектом применения работы является исследование доставки лекарственных препаратов в организм человека ингаляционным способом. Модель может быть полезна для анализа движения новообразований при лучевой терапии, а также для исследования процессов при искусственной вентиляции легких человека. В рамках исследования получен ряд свидетельств о регистрации программ ЭВМ.

**Краткая характеристика основного содержания диссертации.** Диссертация Цинкера М. Ю. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования и оценивается степень ее разработанности. Сформулированы цель и задачи работы, описаны методология и методы исследования.

Приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору существующих подходов к описанию процессов в дыхательной системе, особое внимание уделяется процессам движения воздуха в воздухоносных путях и легких человека.

Вторая глава посвящена формулировке концептуальной и математической постановки задачи течения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека.

Третья глава посвящена формулировке разрешающих соотношений для исследования течения воздуха в деформируемой пористой среде, аппроксимирующей легкие человека.

Четвертая глава посвящена рассмотрению алгоритмов численной реализации задачи течения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека.

Пятая глава посвящена описанию и анализу результатов численных экспериментов по исследованию течения воздуха в ВП и деформируемых легких на основе разработанной математической модели дыхательной системы человека.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Российских и Международных конференциях.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в 10-ти рецензируемых научных изданиях ВАК. Публикации достаточно полно отражают материалы диссертационной работы.

**Автореферат** полностью соответствует содержанию диссертации.


#### **По диссертации следует сделать ряд замечаний.**

1. Одним из критериев достоверности результатов является сравнение с экспериментальными данными или результатами исследований других авторов. В работе отсутствует сравнение полученных результатов по моделированию дыхания человека с результатами других авторов. Экспериментальных работ по измерению падения давления в легких человека мне не известны, зато есть численные работы по CFD-моделированию течения воздуха в легких. В этих работах приводятся расчетные данные по падению давления в бронхиальном дереве человека. Например, такие работы, как ([1] Fernández-Tena A., Fernández J., Álvarez E., Casan P., Walters D.K. Design of a numerical model of lung by means of a special boundary condition in the truncated branches//International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2017, Vol. 33, No. 6, P. 1-9. [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, No. December. [3] Медведев А.Е., Голышева П.С. Моделирование движения воздуха в легких человека при дыхании. Динамика осаждения капель жидкости при применении аэрозольных форм лекарственных средств // Математическая биология и биоинформатика. – 2021. – Т. 16, № 2. – С. 422–438.)
2. Построенная автором математическая модель не совсем точно отвечает физиологии дыхания человека. Например, в статье (Weibel ER, Sapoval B, Filoche M. Design of peripheral airways for efficient gas exchange. *Respir Physiol Neurobiol.* 2005 Aug 25;148(1-2):3-21) написано (в переводе с английского стр. 4): "... строится разветвленная система дыхательных путей, соединяющая все 300 миллионов альвеол, составляющих газообменник, с трахеей. При этом должен выполняться ряд условий, таких как равномерная вентиляция множества газообменных аппаратов и минимальная работа, связанная с дыханием. Это требует, чтобы дерево дыхательных путей было выстроено таким образом, чтобы оптимизировать физические условия, регулирующие вентиляцию". Другими словами, давление в терминальных бронхах и альвеолах должно быть одинаковым для всего бронхиального дерева. То есть в верхней и нижней долях легких давление в альвеолах одинаковое. На рис. 5.3 (в, д, ж, и) показаны поля давления в трехмерной геометрии легких, где явно видно различие давления в альвеолах верхней и нижней долей легких.
3. В списке литературы в диссертации есть указание на работы 36) Медведев А.Е. и др. и 37) Медведев А.Е. и др. Но в тексте диссертации нет ссылок на эти работы.

**Заключение.** Указанные замечания не снижают ценности работы и не влияют на её положительную оценку. Таким образом, диссертация Цинкера Михаила Юрьевича "Математическая

модель для описания движения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека в процессе дыхания” выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-квалификационной работой, в процессе выполнения которой соискатель проявил глубокие знания предмета исследования, современной литературы по данному вопросу и высокий уровень теоретической подготовки, соответствует требованиям п.п. 9-11 “Положения о порядке присуждения ученых степеней”. Цинкер Михаил Юрьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,  
главный научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН), доктор физико-математических наук (специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы).

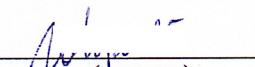
  
(подпись)

Медведев Алексей Емзорович  
(расшифровка подписи ФИО полностью)

Подпись лица подписавшего отзыв **заверяю**

ученый секретарь ИТПМ СО РАН, к.ф.-м.н.,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

  
(подпись)

Красов ИВ  
(ФИО)

ул. Институтская, 4/1  
г. Новосибирск, 630090  
ИТПМ СО РАН  
medvedev@itam.nsc.ru  
тел. +7 (383) 330-38-04



09 января 2025г  
Дата

Гербовая печать