

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19  
по диссертации Цинкера Михаила Юрьевича  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук**

Диссертация «Математическая модель для описания движения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека в процессе дыхания» по научной специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите «6» декабря 2024 г. (протокол заседания № 6) диссертационным советом Д ПНИПУ.01.19, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от «06» апреля 2022 г. № 35-О в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым – четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. N 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. N 1792-р.

Диссертация выполнена на кафедре «Математическое моделирование систем и процессов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и в отделе математического моделирования систем и процессов ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

**Научный руководитель** – доктор физико-математических наук, профессор Трусов Петр Валентинович, заведующий кафедрой «Математическое моделирование систем и процессов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Официальные оппоненты:**

1. Симаков Сергей Сергеевич, доктор физико-математических наук (1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент, заведующий кафедрой вычислительной физики ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».
2. Медведев Алексей Елизарович, доктор физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), главный научный сотрудник лаборатории №4 «Физики быстропротекающих процессов», Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией, соответствием области научных интересов и направлений исследований тематике

диссертационной работы, а также наличием публикаций в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях, соответствующих специальности 1.2.2.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», город Саратов, отзыв ведущей организации утвержден проректором по научной работе и информационному развитию, доктором физико-математических наук, профессором Короновским Алексеем Александровичем, обсужден и утвержден на заседании кафедры математической теории упругости и биомеханики (протокол заседания № 8 от 18.12.2024) и подписан доктором физико-математических наук (01.02.08), доцентом Ивановым Дмитрием Валерьевичем, доктором физико-математических наук (01.02.04), профессором Коссовичем Леонидом Юрьевичем.

Выбор ведущей организации обосновывается научной деятельностью сотрудников организации, связанной с тематикой диссертации и уровнем компетенций, позволяющих оценить значимость полученных в рамках диссертационного исследования результатов для развития отрасли физико-математических наук.

По теме диссертации соискателем опубликовано 45 научных трудов, в том числе 10 работ в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций на соискание ученой степени, и индексированных в международной базе цитирования Scopus, соискателем получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 свидетельство о регистрации базы данных. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах.

#### **Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:**

1. Трусов П.В. Моделирование процесса дыхания человека: концептуальная и математическая постановки / П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер // Математическая биология и биоинформатика. – 2016. – Т. 11. – № 1. – С.64-80. (вклад автора 14/17 с.) (**Scopus, BAK**)

*В работе соискателем (совместно с научным руководителем) предложена структура математической модели, концептуальная и математическая постановки математической модели дыхательной системы, состоящей из подмоделей воздухоносных путей и легких человека, рассматриваемых как деформируемая насыщенная пористая среда. Автором представлена построенная трехмерная геометрия четырех генераций воздухоносных путей (начиная с трахеи), получены результаты численного моделирования течения воздуха в воздухоносных путях при спокойном дыхании и форсированном выдохе, описаны результаты.*

2. Цинкер М.Ю. Трехмерное моделирование дыхательной системы человека для задач оценки рисков здоровью при ингаляционной экспозиции химических веществ // Гигиена и санитария. – 2016. – Т. 95. – № 1. – С. 90-93. (вклад автора 4/4 с.) (**Scopus, BAK**)

*В работе представлены подходы для практического использования разработанной трехмерной математической модели течения воздуха в дыхательной системе для решения*

задач по оценке рисков здоровью человека при ингаляционной экспозиции химических веществ из атмосферного воздуха.

3. Трусов П.В. Моделирование течения запыленного воздуха в респираторном тракте / П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер, А.В. Бабушкина // Российский журнал биомеханики. – 2018. – Т. 22. – № 3. – С. – 301-314. (вклад автора 11/14 с.) (**Scopus, BAK**)

*В работе представлены результаты исследования нестационарного течения воздуха (многофазной смеси газа и пылевых частиц), а также оседания частиц в первых четырех генерациях нижних воздухоносных путей (начиная с трахеи). Автором выполнено численное моделирование течения многофазной смеси и описаны результаты исследования.*

4. Трусов П.В. О моделировании течения воздуха в легких человека: конститутивные соотношения для описания деформирования пористой среды / П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 165–174. (вклад автора 7/10 с.) (**Scopus, BAK**).

*В работе соискателем (совместно с научным руководителем) представлена математическая постановка задачи для описания течения воздуха в легких человека, которые рассматриваются как двухфазная деформируемая сплошная пористая среда. В работе приводится полученное соискателем на основе аналитического решения вспомогательной задачи о всестороннем сжатии/расширении представительного объема двухфазной пористой среды соотношение, описывающее взаимосвязь воздушной фазы и легочной ткани, а также представлено численное подтверждение корректности использования полученного соотношения для геометрически нелинейной постановки при умеренно больших изменениях объема.*

5. Трусов П.В. Математическая модель течения воздуха с твердыми частицами в носовой полости человека / П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер, А.В. Некрасова // Математическая биология и биоинформатика. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 349–366. (вклад автора 14/18 с.) (**Scopus, BAK**)

*В статье представлены результаты численного исследования нестационарного течения воздуха (многофазной смеси газа и пылевых частиц), а также оседания частиц различных размеров в носовой полости реальной формы, полученной на основе томографических снимков. Исследовано нагревание воздуха в носовой полости, получены количественные оценки оседания частиц пыли, образующейся на реальном машиностроительном производстве. Автором выполнено численное моделирование, проанализированы и описаны результаты.*

6. Зайцева Н.В. Распределение твердых частиц микроразмерного диапазона в дыхательных путях человека: натурный эксперимент / Н.В. Зайцева, Д.А. Кирьянов, С.В. Клейн, М.Ю. Цинкер, А.М. Андришунас // Гигиена и санитария. – 2023. – Т. 102. – № 5. С. 412–420. (вклад автора 6/9 с.) (**Scopus, BAK**)

*В статье представлены результаты проведенного натурного эксперимента по исследованию закономерностей распределения пылевых частиц, присутствующих в атмосферном воздухе крупного промышленного центра, в воздухоносных путях человека.*

Соискатель (совместно с коллегами из ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения») участвовал в разработке дизайна исследования, лично выполнил обработку результатов эксперимента и описал результаты.

7. Трусов П.В. Численное исследование нестационарного течения запыленного воздуха и оседания пылевых частиц различных размеров в нижних дыхательных путях человека / П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер, А.И. Кучуков // Математическая биология и биоинформатика. – 2023. – Т. 18. – № 2. – С.347-366. (вклад автора 16/20 с.) **(Scopus, BAK)**

*В работе представлены результаты численного исследования нестационарного течения воздуха (многофазной смеси газа и пылевых частиц), а также оседания частиц (различных размеров и плотности) в нижних воздухоносных путях реальной анатомической формы, полученной на основе снимков компьютерной томографии. Соискателем выполнено численное моделирование течения запыленного воздуха, получены, проанализированы и описаны результаты.*

8. Трусов П.В. Моделирование течения воздуха в упруго-деформируемой пористой среде, аппроксимирующей легкие человека: структура модели, ее основные уравнения и разрешающие соотношения / П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер, В.В. Нурисламов // Вычислительная механика сплошных сред – Computational continuum mechanics. – 2024. – Т.17. – №2. – С.219-231. (вклад автора 10/13 с.) **(Scopus, BAK)**

*В работе соискателем представлены разработанные (совместно с научным руководителем) структура математической модели дыхательной системы, математическая постановка задачи для описания течения воздуха в легких человека, рассматриваемая как связанная задача деформирования двухфазной насыщенной пористой среды и фильтрации воздуха через нее; соискателем сформулирована постановка задачи в обобщенной форме, а также приведены полученные соискателем разрешающие соотношения метода конечных элементов для подзадачи деформирования и метода конечных объемов для подзадачи фильтрации, используемые для дальнейшей численной реализации модели течения воздуха в легких.*

9. Trusov P.V. Assessing spatial distribution of sites with a risk of developing bronchopulmonary pathology based on mathematical modeling of air-dust flows in the human airways and lungs / P.V. Trusov, M.Yu. Tsinker, N.V. Zaitseva, V.V. Nurislamov, P.D. Svintsova, A.I. Kuchukov // Health Risk Analysis. – 2024. – V. 2. – P. 141–152. (вклад автора 9/12 с.) **(Scopus)**

*Работа посвящена вопросам практического применения разработанной математической модели дыхательной системы для решения задач в области оценки и прогнозирования рисков здоровью человека, обусловленных негативным воздействием аэрогенных факторов среды обитания. Соискателем на основе математического моделирования (с использованием разработанного комплекса программ, а также инженерного программного пакета) воздушно-пылевых потоков в дыхательных путях и легких человека выполнена оценка пространственного распределения зон локализации риска развития бронхолегочной патологии.*

10. Трусов П.В. Моделирование течения воздуха в упруго-деформируемой пористой среде, аппроксимирующей легкие человека: алгоритм реализации и анализ результатов применения модели / П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Ю. Цинкер, В.В. Нурисламов// Вычислительная механика сплошных сред – Computational continuum mechanics. – 2024. – Т.17. – №3. – С.329-346. (вклад автора 14/18 с.) (**Scopus, BAK**)

*В статье представлены разработанные соискателем алгоритм реализации подмодели для описания движения воздуха в легких человека, рассматриваемых как упруго-деформируемая насыщенная пористая среда, и результаты применения модели, полученные на основе разработанного комплекса программ на языке C++. Кроме того, в работе приведены алгоритм восстановления трехмерной формы легких на основе томографических снимков, а также закон движения стенок, используемый в качестве кинематических граничных условий.*

11. Цинкер М.Ю., Нурисламов В.В. Программный комплекс для численной реализации связанной задачи течения воздуха в упруго-деформируемой насыщенной пористой среде, аппроксимирующей легкие человека): **Свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ №2024667751** от 29.07.2024. (вклад автора 75/100 %)

12. Трусов П.В., Зайцева Н.В., Цинкер М.Ю., Нурисламов В.В. Программный комплекс для численной реализации математической модели течения воздуха в деформируемых легких человека: **Свидетельство о государственной регистрации программ ЭВМ № 2024682468** от 24.09.2024. (вклад автора 70/100 %)

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**предложена** новая математическая модель для описания 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 человека, представленных упруго-деформируемой насыщенной пористой средой;

**получены** разрешающие соотношения метода конечных элементов для моделирования деформирования пористой среды легких и метода конечных (контрольных) объемов для описания фильтрации воздуха в деформируемой пористой среде;

**разработан** алгоритм и комплекс программ для решения нелинейной связанной задачи течения воздуха в деформируемой пористой среде легких с использованием пошаговой процедуры;

**предложен** алгоритм воспроизведения трехмерной геометрии воздухоносных путей и легких человека на основе данных компьютерной томографии, а также закон изменения формы легких в процессе дыхания, учитывающий грудное и диафрагмальное дыхание;

**выявлены** на основе численного моделирования особенности течения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека в различные моменты дыхательного цикла.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована разработкой новой математической модели, описывающей процесс течения воздуха в упруго-деформируемой насыщенной пористой среде, при наличии больших градиентов перемещений, с учетом

взаимодействия твердой и газовой фаз. Получены и реализованы в алгоритме решения связанной задачи деформирования пористой среды и фильтрации воздуха через нее разрешающие соотношения метода конечных элементов (для задачи деформирования) и метода конечных (контрольных) объемов (для задачи фильтрации).

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** методы и подходы математического моделирования, нелинейной теории упругости, газовой динамики, теории фильтрации, вычислительной математики.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что предложенные в работе **подходы и алгоритмы**, в том числе реализованные и зарегистрированные в виде **комплексов прикладных программ для ЭВМ**, могут быть **применены для решения прикладных задач** в области медицины. Модель может быть использована для описания процесса дыхания в норме и при патологии, поступления и пространственного распределения в органах и тканях дыхательной системы химических веществ, поступающих с вдыхаемым воздухом. В перспективе модель может быть полезна для анализа развития бронхолегочных патологий, разработке средств индивидуальной защиты, рекомендаций для корректировки гигиенических нормативов, доставки лекарственных препаратов в организм человека ингаляционным способом.

**Оценка достоверности результатов исследования** выявила:

**Обоснованность** результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью постановки задач, применением современного математического аппарата и численных методов;

**достоверность** подтверждается удовлетворительным качественным и количественным соответствием полученных результатов физиологическим данным во время спокойного дыхания, данным, приведенным в результатах численного моделирования других авторов, а также с результатами проведенного натурного эксперимента.

**Личный вклад соискателя** состоит в проведении аналитического обзора подходов к моделированию биомеханики дыхания, формулировке постановки задачи, получении разрешающих соотношений для решения нелинейной задачи исследования течения воздуха в деформируемых легких человека, разработке алгоритмов и комплекса программ для численной реализации предложенной модели, построении трехмерной геометрии воздухоносных путей и легких человека, идентификации параметров модели (в том числе закона изменения формы легких), проведении численных экспериментов и анализе результатов расчетов течения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека в процессе дыхания.

**Диссертационный совет пришел к выводу** о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 28 мая 2024 г. № 27-О: в ней содержится решение задачи моделирования течения воздуха в

каналах и деформируемых пористых средах применительно к описанию процессов в дыхательной системе человека, что имеет важное значение при решении прогностических проблем в области медицины.

На заседании «18» февраля 2025г. диссертационный совет Д ПНИПУ.01.19 принял решение присудить Цинкеру Михаилу Юрьевичу ученую степень кандидата физико-математических наук (протокол заседания № 1).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 12 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 12, против присуждения ученой степени – 0.

Зам. председателя

диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,

д-р физ.-мат. наук, доцент



/Швейкин Алексей Игоревич/

Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,

канд. физ.-мат. наук, доцент



/Кротова Елена Львовна/

«18» февраля 2025 г.

