

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

Пермского национального

исследовательского

политехнического университета,

доктор физ.-мат. наук, доцент

Швейкин А.И.

2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Математическая модель для описания движения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека в процессе дыхания» 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.

В период подготовки диссертации соискатель Цинкер Михаил Юрьевич работал в ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека в отделе математического моделирования систем и процессов в должностях математика, инженера-исследователя, младшего научного сотрудника (в 2009-2024 гг.), в

федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (в 2023-2024 гг.), на кафедре «Математическое моделирование систем и процессов» в должности младшего научного сотрудника (по совместительству).

В 2009 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет» по специальности «Прикладная математика и информатика».

В 2014 году окончил аспирантуру очной формы обучения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по научной специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (период обучения «01» октября 2010 г. по «28» февраля 2014 г.).

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, профессор Трусов Петр Валентинович, заведующий кафедрой «Математическое моделирование систем и процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

все результаты, представленные в диссертационной работе, получены М.Ю. Цинкером лично или при его непосредственном участии: аналитический обзор, постановка задачи (совместно с научным руководителем), вывод разрешающих соотношений, разработка алгоритмов численной реализации предложенной модели и создание комплекса программ, идентификация

параметров модели, проведение численных экспериментов и анализ результатов.

2. Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– разработана новая математическая модель для исследования течения воздуха в дыхательной системе, состоящей из двух взаимосвязанных через граничные условия подмоделей: 1) подмодель течения воздуха в воздухоносных путях и 2) подмодель течения воздуха в легких, которые представлены упруго-деформируемой насыщенной пористой средой;

– получены разрешающие соотношения для решения нелинейной задачи течения воздуха в деформируемой пористой среде легких человека, учитывающих взаимодействие воздуха в легких и легочной ткани;

– получены алгоритмы для решения нелинейной связанной задачи течения воздуха в деформируемой пористой среде легких с использованием пошаговой процедуры, для реализации которых был разработан комплекс программ;

– построена трехмерная геометрия воздухоносных путей и легких человека на основе данных компьютерной томографии; получен закон изменения формы легких, учитывающий грудное и диафрагмальное дыхание, в процессе дыхания;

– выявлены особенности течения воздуха, содержащего пылевые частицы реального дисперсного состава и плотности, а также получены количественные оценки оседания частиц в воздухоносных путях человека на основе выполнения серии численных расчетов; получены параметры течения воздуха и деформирования легочной ткани в различные моменты дыхательного цикла.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов численного моделирования подтверждается удовлетворительным качественным и количественным соответствием

результатов численного моделирования с данными, приведенными в публикациях других авторов. Результаты по оседанию частиц в воздухоносных путях качественно согласуются с результатами проведенного при участии соискателя натурного эксперимента по исследованию закономерностей распределения пылевых частиц атмосферного воздуха в воздухоносных путях человека. Изменение общего объема воздуха в легких, смещение диафрагмы и изменение окружности грудной клетки в процессе дыхания соответствуют результатам медицинских исследований.

4. Практическая и теоретическая значимость диссертационного исследования

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. Модель может быть использована при формулировании требований к разрабатываемым средствам индивидуальной защиты (СИЗ) органов дыхания работников различных отраслей промышленности, подверженных негативному воздействию вредных производственных факторов, оценки эффективности СИЗ; при разработке рекомендаций к корректировке гигиенических нормативов о допустимых концентрациях взвешенных частиц в воздухе жилой и рабочей зон; при корректировке трудового режима работников в зависимости от условий труда. 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.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новой математической модели для исследования течения воздуха в дыхательной системе; в получении разрешающих соотношений для решения нелинейной задачи течения воздуха в деформируемой насыщенной пористой среде, учитывающей взаимодействие каркаса и воздуха; в разработке алгоритма решения связанной задачи деформирования пористой среды и фильтрации воздуха через нее.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы Цинкером Михаилом Юрьевичем опубликовано 45 научных работ, в том числе 10 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, получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 свидетельство о регистрации базы данных. Основные положения и результаты работы отражены в следующих научных публикациях:

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, ВАК**)

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, ВАК**)

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, ВАК**)

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, ВАК**).

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, ВАК**)

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, ВАК**)

В статье представлены результаты проведенного натурального 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, ВАК**)

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, ВАК**)

В работе соискателем (совместно с научным руководителем) представлены 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, ВАК)

В статье представлены разработанные соискателем алгоритм реализации подмодели для описания движения воздуха в легких человека, рассматриваемых упруго-деформируемой насыщенной пористой средой, и результаты применения модели, полученные на основе разработанного комплекса программ на языке C++. Кроме того 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 %)

Программа предназначена для решения нелинейной связанной трехмерной задачи фильтрации воздуха в деформируемой пористой среде, аппроксимирующей легкие человека. Программа реализует алгоритм решения задачи в виде пошаговой (по времени) процедуры, на каждом шаге которой последовательно выполняется три этапа: 1) решение подзадачи деформирования двухфазной среды в скоростях (с использованием метода конечных элементов); 2) решение подзадачи фильтрации в пористой среде (с использованием метода конечных объемов); 3) определение интегральных параметров на конец шага по времени для их использования на следующем шаге. Вклад автора заключается в постановке задачи; разработке структуры программы; формулировании разрешающих соотношений; разработке алгоритмов; постановке технического задания на разработку программы; подготовке исходных данных; тестирование программного продукта; участие в реализации; внесении коррективов в исходный код.

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 %)

Программный комплекс представляет собой совокупность взаимосвязанных модулей, осуществляющую численную реализацию математической модели процесса течения воздуха в

деформируемых легких человека, рассматриваемых как двухфазная деформируемая пористая среда. Программа обладает многопользовательским Web-интерфейсом с возможностью подключения удаленного доступа, который организует работу с тремя основными модулями: 1) модуль подготовки входных данных для расчета; 2) модуль, реализующий вычислительную пошаговую процедуру; 3) модуль визуализации результатов расчета и экспорта расчетных данных по временным шагам. Вклад соискателя: участие в разработке концепции и постановки задачи; разработка структуры программы; формулирование разрешающих соотношений; разработка алгоритмов; постановка технического задания на разработку программы; подготовка исходных данных; тестирование программного продукта; участие в реализации; внесение коррективов в исходный код.

В тексте диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах по теме диссертационного исследования.

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите

Диссертация «Математическая модель для описания движения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека в процессе дыхания» Цинкера Михаила Юрьевича соответствует паспорту специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по физико-математическим наукам (пунктам: 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).

7. Соответствие диссертационной работы требованиям, «Положения о присуждении ученых степеней».

Диссертация Цинкера Михаила Юрьевича отвечает требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного

постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертация «Математическая модель для описания движения воздуха в воздухоносных путях и деформируемых легких человека в процессе дыхания» Цинкера Михаила Юрьевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на заседании кафедры «Математическое моделирование систем и процессов».

Присутствовало на заседании 20 чел. Результаты голосования: «за» – 20 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0, протокол № 4 – от «18» октября 2024 г.

Заместитель заведующего кафедрой ММСП,
доцент кафедры ММСП,
канд. физ.-мат. наук



Е.С. Макаревич

Ученый секретарь кафедры ММС
канд. физ.-мат. наук.



Н.Д. Няшина