

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Голышевой Полины Садуллоевны «Математическое моделирование процессов дыхания человека в норме и при патологии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Голышевой Полины Садуллоевны «Математическое моделирование процессов дыхания человека в норме и при патологии» посвящена расчетному исследованию течения воздуха (вязкой несжимаемой жидкости) в бронхиальном дереве человека, а также воздействия различных респираторных заболеваний на нижние дыхательные пути человека. Изучаются такие заболевания как бронхиальная астма, пневмония и COVID-19.

Взвешенные частицы (пыль, сажа и жидкие капли) могут вызвать широкий спектр хронических респираторных заболеваний, таких как астма и хронические обструктивные заболевания легких. Для лечения этих и других заболеваний применяют ингаляционный способ введения лекарственных препаратов. Данный метод лечения базируется на транспортировке газа или мелкодисперсного аэрозоля лекарственного средства к легким человека или же очаговому воспалению. Изучение процессов движения и осаждения частиц лекарственного препарата необходимо для повышения эффективности ингаляционной терапии. Данное исследование открывает широкую перспективу для анализа доставки лекарств и повышения эффективности лечения больных различными формами легочной патологии.

Главной «изюминкой» диссертационной работы является методика аналитического построения полного трехмерного бронхиального дерева человека (от трахеи до альвеол). Каждая бифуркация (ветвление бронхов) строится из входящего и двух выходящих бронхов, которые соединяются друг с другом секторами торов переменного радиуса и гладкими двухпараметрическими поверхностями. Учет нецилиндричности и «звездообразности» поперечного сечения бронхов еще больше усложняет задачу построения модели дыхательной системы. Следует подчеркнуть, что все описанные в литературе предыдущие модели бронхиального дерева были привязаны к конкретному пакету программ (CAD-редактор Ansys Design Modeler). При этом бифуркации бронхиального дерева строились алгоритмически вручную, что исключает повторяемость результатов расчетов. Таким образом, разработанная в диссертационной работе аналитическая модель бронхиального дерева является прорывным шагом вперед и открывает самые широкие перспективы. Аналитическая модель бронхиального дерева позволяет исследовать различные отклонения дыхательной системы от здоровой формы. На основе созданной модели стало возможным изучать и

анализировать различные инфекционные и респираторные заболевания, процессы осаждения частиц пыли и лекарственных аэрозолей. В исследовании использовалась методика поэтапного расчета, которая позволила решить проблему разномасштабности верхних и нижних дыхательных путей. Для нижней бифуркации граничные условия на входе являются выходными данными верхней бифуркации. Описанная методика впервые позволила произвести расчет полного бронхиального дерева, смоделировать теплообмен. Результаты расчетов хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

В связи с вышеизложенным, диссертационная работа Голышевой П.С. представляется весьма **актуальной**.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 53 наименования. Объем работы составил 105 страниц, включая 56 рисунков, 4 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, описаны цель и задачи исследования, сформированы и обоснованы новые научные результаты, обозначены теоретическая и практическая значимости работы, приведены сведения об апробации результатов

В первой главе представлен обзор литературы и подробно описано текущее состояние проблемы. Показаны основные существующие модели построения бронхиального дерева, описаны их преимущества и недостатки. Представлено гистологическое строение внутренних форм бронха, которое необходимо учитывать при моделировании нижних дыхательных путей, т.к. форма достаточно сильно оказывает влияние на течение воздуха в бронхах. Так же в данной главе представлены формулы для симметричной модели, описывающие радиус и длины входящих бронхов, аналитические формулы, моделирующие внутренние сечения бронхов. Продемонстрировано построение обструктивного сечения бронха (не круглое сечение). рассмотрены отклонение “звездчатого” бронха от здорового бронха. Показано, насколько сильно влияет форма поперечного сечения бронхов на параметры течения. Приведены зависимости перепада давления от формы поперечного сечения трубы при ламинарном течении. Приведены разработанные в данном исследовании аналитические формулы построения бифуркации и нижних дыхательных путей, которые, в отличие от предыдущих моделей, позволяют описывать “реальный” бронх.

Во второй главе 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. Показаны результаты расчетов скорости и числа Рейнольдса, которые обосновывают ламинарность течения. Дано обоснование использования данных углов поворота при переходе между

n -ым и $n+1$ -ым бронхом. Показаны профили скорости во входном и выходных сечениях бронхов для расхода воздуха 24 л/мин. Представлены результаты численного моделирования перепада давления в зависимости от расхода воздуха. Приведены результаты численного решения и сравнение данной модели с моделями, имеющимися в литературе. Показано, что “звездообразная” форма бронха увеличивает перепад давления более чем в два раза. Показано сравнение с работой, в которой бронхиальное дерево воссоздавалось по КТ-изображениям, при этом модель содержит только верхние 17 ветвлений (без уточнения углов разветвления). Произведены численные расчеты процесса вдоха и выдоха, показано, что при вдохе перепад давления выше, чем при выдохе. Полученный результат поясняется на примере клапанного канала Тесла, который имеет подобную картину течения. В этом устройстве жидкость легко проходит в одном направлении, но в обратном направлении гидравлическое сопротивление канала значительно больше, т.к. потоки сталкиваются в месте деления. В данной главе подробно описана методика “отключения” бронха, которую использовали для имитации поражения легких. Показаны результаты при различных степенях поражения легких (75 и 50%). Также была воссоздана упрощенная модель верхних дыхательных путей, на основе которой проведено сравнение нестационарного вдоха для случаев нормального сечения бронхов и при сужении на 10% относительно круглого сечения.

В третьей главе описано численное моделирование дыхания с частицами пыли или лекарственных средств. Представлены уравнения, описывающие движения аэрозольных капель. Концентрация частиц мала, поэтому их влиянием на течение воздуха в бронхах можно пренебречь (частицы запускали по полученному профилю скорости). Были произведены численные расчеты осаждения капель в нижних дыхательных путях в зависимости от длительности и интенсивности вдоха. На основе полученных данных было установлено, как длительность и интенсивность вдоха влияют на осаждение частиц. Произведена оценка эффективности применения ингаляционной терапии и предложена корректировка дозировки лекарственного средства в зависимости от особенностей строения бронхиального дерева. Дан подробный литературный обзор, посвященный теплообмену и влагообмену в бронхиальном дереве человека. Описана математическая модель теплообмена в бронхах. Показаны результаты расчетов теплообмена и влагообмена в нижних дыхательных путях. Произведено сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными. Показано, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Представлены результаты моделирования дыхания человека с термической гелий-кислородной смесью, которую используют для лечения бронхиальной астмы и COVID-19.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе

Научная новизна. В работе Голышевой П.С. впервые создана трехмерная аналитическая модель полного симметричного бронхиального дерева (от трахеи до альвеол), которая позволяет моделировать различные внутренние формы бронхов и описать различные патологические изменения. На основе созданной модели удалось впервые произвести численное моделирование ламинарного течения воздуха в дыхательной системе, изучить осаждение частиц в нижних дыхательных путях. Полученные результаты открывают широкую перспективу для изучения различных патологий, способствуют обоснованному выбору оптимального сценария лечения и могут использоваться для усовершенствования методики и повышения безопасности при проведении ингаляционной терапии.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты, полученные Голышевой П.С. и представленные в диссертационной работе, дают глубокое понимание процессов, происходящих в дыхательной системе человека, а также открывают широкую возможность для практического применения ингаляционного метода лечения легочных заболеваний.

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

Публикации. Результаты работы изложены в 5 научных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях. Публикации достаточно полно отражают материалы диссертационной работы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

В качестве **замечаний** к работе можно отметить следующее:

1) В начале раздела 1.3 на стр. 26 фраза *«Задняя стенка трахеи мышечную ткань, которая обеспечивает движение трахеи при вдохе и выдохе..»*. Здесь, очевидно, пропущен глагол.

2) В начале раздела 1.5 на стр. 29 первая фраза *«Функция, описывающая форму поперечного сечения бронхов в норме и при обструктивном заболевании легких (график этой функции показан на рис.1.15), запишем в виде »*. Здесь, очевидно, опечатка. Форма поперечного сечения бронхов показана на рис. 1.16.

3) На стр.35 фраза *«Уравнения выходящих бронхов задаются уравнениями»*. Здесь стилистическая неточность. Надо было бы: *Уравнения выходящих бронхов имеют вид*.

4) Из диссертации не ясно, почему в модели закладывается угол поворота бронха относительно предыдущего на $\pi/2$. В диссертации написано: *«Это сделано для большего согласования с анатомическим строением бронхов (см. рис. 1.19)»*. Почему именно $\pi/2$? Одинаковы ли углы поворота на всех бифуркациях в дыхательной системе реального человека?

Сделанные замечания не умаляют достоинств диссертации. В целом диссертация Голышевой П.С. является основательным законченным исследованием, представляет решение актуальных задач, объединенных общим подходом, который обеспечивает возможность математического моделирования сложной нейрохирургической операции. Стиль изложения материала ясный, продуманный. Диссертация содержит достаточное количество качественных иллюстраций и результатов расчетов в графической форме, что позволяет разобраться во всех нюансах работы. Достоверность результатов обуславливается также хорошим согласованием с экспериментальными данными.

Таким образом, диссертационная работа Голышевой П.С. «Математическое моделирование процессов дыхания человека в норме и при патологии» полностью соответствует паспорту специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы» и всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание степеней кандидата физико-математических наук. Считаю, что ее автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), доктор физико-математических наук (специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы).

27.03.2024 _____

Актершев Сергей Петрович

ИТ СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-кт Академика Лаврентьева, 1
e-mail: director@itp.nsk.ru
тел. +73309040

Подпись Актершева Сергея Петровича заверяю.

Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.

27.03.2024 _____

Макаров М.С.

Председателю
диссертационного совета
24.1.125.01 (Д 003035.02)
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, **Актершев Сергей Петрович**, даю свое согласие выступить в качестве оппонента по диссертации Гольшевой Полины Садуллоевны на тему: «Математическое моделирование процессов дыхания человека в норме и при патологии» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Ученая степень, отрасли науки	Д.ф.-м.н.
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.02.05- механика жидкости, газа и плазмы
Ученое звание	Доцент по специальности " механика жидкости, газа и плазмы"
Ученая степень	Доктор физико-математических наук
Тел:	8 (923) 185 6994
E-mail:	sergey-aktershev@mail.ru
Должность	Ведущий научный сотрудник
Подразделение организации	Лаборатории № 6.2 «Лаборатория физической гидродинамики»
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования РФ
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1
Web-сайт организации.	www.itp.nsc.ru
Телефон организации.	+7(383) 330-90-40
E-mail организации.	director@itp.nsc.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 9 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	Актершев С.П, Мезенцева Н.Н.,	Численное моделирование регенеративного теплообменника для вентиляции с периодической сменой направления воздушного

	Мезенцев И.В., Горелик Р.С.	потока // Теплофизика и аэромеханика, -2023, -Т. 30, №2, -С. 333-343.
2	Aktershev S.P., Alekseenko S.V.	Nonlinear waves in a rivulet falling down a vertical plate // International Journal of Non-Linear Mechanics, -2023,-Vol. 156.-104479
3	Актершев С.П., Алексеенко С.В., Бобылев А.В.	Двумерные стационарно-бегущие волны на поверхности вертикального ривулета // Теплофизика и аэромеханика, -2023, -Т. 30, №4, -С. 737-750.
4	Актершев С.П., Алексеенко С.В., Цвелодуб О.Ю.	Теоретическое моделирование гидродинамики и теплопереноса в волновых пленках жидкости при сложных условиях течения (обзор)// Теплофизика и аэромеханика, -2022, -Т. 29, № 1, -С. 1-36.
5	Актершев С.П., Мезенцева Н.Н., Мезенцев И.В.	Рост парового пузырька в азеотропной бинарной смеси // Теплофизика и аэромеханика, -2021, -Т. 28, № 3, -С. 449-454.
6	Aktershev S.P., Alekseenko S.V., Bobylev A.V.	Waves in a rivulet falling down an inclined cylinder // AIChE Journal, -2021, Vol. 67, №1, -P. e17002
7	Aktershev S.P., Mezentsev I.V., Mezentseva N. N.	Parametric study of a regenerative heat exchanger for ventilation with a periodic change in the air flow direction // Applied Thermal Engineering, -2021, Vol. 202, -P. 117831
8	Актершев С. П., Мезенцева Н. Н., Мезенцев И. В.	Численное моделирование роста парового пузырька в однородно перегретой жидкости (тепловая энергетическая схема) // Теплофизика и аэромеханика, -2020, -Т. 27, № 1, -С. 127-133.
9	Aktershev S.P., Alekseenko S.V.	Thermocapillary instability and rivulet structure formation in uniformly heated falling liquid film // International Journal of Multiphase Flow, -2019, Vol.114, -P.115-127.
10	Aktershev S.P., Chinnov E.A., Shatskiy E.N.	Thermocapillary rivulets in a locally heated falling liquid film // International Journal of Heat and Mass Transfer, -2019, Vol.143, -P.118503.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

8.02.24г.

Актершев Сергей Петрович

Подпись Актершева
Сергей Петрович
и.о.р.-и

и.о.

Мамаров А.С.