

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.243.10,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»,
МИНОБРНАУКИ РОССИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 27.12.2021 № 84

О присуждении **Кучумову Алексею Геннадьевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Биомеханический подход к персонализированному моделированию холединамики в билиарной системе в норме, при патологии и лечении желчнокаменной болезни и ее осложнений» по специальности 01.02.08 — «Биомеханика» принята к защите 16 сентября 2021 года (протокол заседания № 82) диссертационным советом Д 212.243.10, созданным на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»), Минобрнауки РФ, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета от 15.02.2013 №75/нк; приказ о возобновлении деятельности совета от 18.11.2020г. №679/нк.

Соискатель Кучумов Алексей Геннадьевич, 11 сентября 1985 года рождения, в 2008 году окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ФГАОУ ВО «ПНИПУ») с присвоением квалификации магистра по направлению 15.04.03 «Прикладная механика». Работает доцентом кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Минобрнауки РФ.

Диссертация выполнена на кафедре «Вычислительная математика, механика и биомеханика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Минобрнауки РФ.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Няшин Юрий Иванович, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Вычислительная математика, механика и биомеханика», профессор.

Официальные оппоненты:

1. **Коноплев Юрий Геннадьевич**, доктор физико-математических наук (01.02.04), профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет, кафедра теоретической механики, профессор-консультант;

2. **Бауэр Светлана Михайловна**, доктор физико-математических наук (01.02.04 и 01.02.08), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра теоретической и прикладной механики, профессор

3. **Маслов Леонид Борисович**, доктор физико-математических наук (05.13.18), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кафедра теоретической и прикладной механики, заведующий кафедрой,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт иммунологии и физиологии Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург) в своем положительном отзыве, подписанном Соловьевой Ольгой Эдуардовной, доктором физико-математических наук (03.00.02), директором института, и составленном Кацнельсоном Леонидом Борисовичем, доктором физико-математических наук (03.01.02), ведущим научным сотрудником лаборатории математической физиологии имени В.С. Мархасина, указала, что диссертация Кучумова Алексея Геннадьевича представляет собой законченное исследование, которое вносит важный вклад в развитие биомеханики биожидкостей. Результаты проведенных исследований имеют важное прикладное значение для ряда практических задач в медицинской практике. Диссертация А.Г. Кучумова по актуальности решенных задач, объему проведенных исследований, степени научной новизны и практической значимости результатов удовлетворяет всем требованиям пп. 9-11,

13-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а её автор, Кучумов Алексей Геннадьевич, достоин присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.08. – «Биомеханика».

По теме диссертации соискатель имеет 20 работ, опубликованных в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов докторских диссертаций, в том числе 15 статей опубликовано в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science. Общий объем работ составил 14,06 п.л., из них авторский вклад 10,87 п.л. (на основе предоставленных справок о личном вкладе Кучумова А.Г. и соавторов). Список публикаций также включает 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Kuchumov A.G.**, Gilev V.G., Popov V.A., Samarcev V.A., Gavrilov V.A. Non-Newtonian flow of pathological bile in the biliary system: experimental investigation and CFD simulations // *Korea-Australia Rheology Journal*. – 2014. – Vol. 26, № 1. – P. 81–90.

2. **Kuchumov, A.G.** Mathematical modelling of the peristaltic lithogenic bile flow through the duct at papillary stenosis as a tapered finite-length tube // *Russian Journal of Biomechanics*. – 2016. – Vol. 20, No. 2. – P. 77–96.

3. **Кучумов, А.Г.** Математическое моделирование накопления частиц на поверхности пластикового билиарного стента для прогнозирования его окклюзии / А.Г. Кучумов // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. серия: Математика. Механика. Информатика*. – 2020. – Т. 20, вып. 2. – С. 220–231.

4. **Kuchumov A.G.**, Vedeneev V., Samartsev V., Khairulin A., Ivanov O. Patient-specific fluid–structure interaction model of bile flow: comparison between 1-way and 2-way algorithms // *Computer methods in biomedical engineering*. – 2021. – DOI: 10.1080/10255842.2021.1910942.

На диссертацию и автореферат диссертации поступило 9 положительных отзывов: из ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва) от академика РАН, д.ф.-м.н., профессора Горячевой И.Г. (01.02.04); из ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск) от д.ф.-м.н. Чупахина А.П. (01.02.05) и к.ф.-м.н. Паршина Д.В. (01.01.02); из ФГБОУ

ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (г. Пермь) от д.ф.-м.н. Аптукова В.Н. (01.02.04); из ФГБОУ ВО «Казанский национальный технологического университета» (г. Казань) от д.т.н. Тазюкова Ф.Х. (05.14.05) и Кутузовой Э.Р. (01.02.05); из ФГБОУ ВО «Ижевская государственная медицинская академия» Министерства здравоохранения Российской Федерации (г. Ижевск) от д.м.н. Уракова А.Л. (14.00.25); из Президиума национальной академии наук Беларуси от члена-корреспондента НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь) от д.т.н. Плескачевского Ю.М. (05.02.04); из Института механики Болгарской академии наук (г. София, Болгария) от д.т.н. Антоновой Н.М. (01.02.05); из ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» (г. Краснодар) от д.ф.-м.н. М.В. Голуба (01.02.04) и д.ф.-м.н. Е.В. Глушкова (01.02.04); из Центра экспериментальной биомедицины им. Ивана Бериташвили (г. Тбилиси, Грузия) от д.б.н., профессора Манцкавы М.М. (03.03.01).

В отзывах сделаны вопросы и замечания: а) какие параметры в реологическом уравнении Каро отвечают за тиксотропное поведение?; б) об отсутствии качественных и количественных оценок погрешностей для используемых численных методов, а также описания особенностей реализации моделей, описывающих поведение гиперупругих материалов; в) не указаны возрастно-половые характеристики и физиологическое состояние пациента, для желчи которого они были получены.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой квалификацией в области биомеханики, позволяющей оценить научную и практическую значимость диссертационной работы, широкой известностью и признанными достижениями среди специалистов. Выбор официальных оппонентов объясняется, кроме того, отсутствием совместных печатных работ с соискателем. Выбор ведущей организации обосновывается наличием в коллективе большого числа известных специалистов, работающих в направлениях, связанных с тематикой диссертации, а также отсутствием договорных отношений с соискателем. Выбор официальных оппонентов и ведущей организации удовлетворяет критериям, сформулированным в пп. 22 и 24 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработан** новый биомеханический подход для моделирования холединамики в норме, при патологии и при мини-инвазивных оперативных вмешательствах на желчевыводящих путях на основе разработки новой комплексной индивидуализиро-

ванной биомеханической модели билиарной системы. Впервые предложено моделировать и рассматривать билиарную систему как совокупность желчного пузыря (windkessel модель), внепеченочных желчных протоков (модели одностороннего и двустороннего взаимодействия жидкости и твердого тела) и большого дуоденального сосочка (перистальтическая модель течения неньютоновской жидкости в трубке с сужающимися стенками конечной длины) с учетом объединения данных элементов в единую модель, позволяющую учитывать податливость мягких тканей на характер течения и физиологические особенности биомеханического поведения данных элементов в норме и при патологии. **Предложены** алгоритмы численной реализации модели течения желчи в билиарной системе, а также методики по нахождению параметров моделей из экспериментов *in vivo* и *in vitro*. Полученный подход позволяет оценить холединамику в норме, при патологии и после проведенного оперативного вмешательства (холецистэктомии) для того, чтобы спрогнозировать отдаленные результаты операционного вмешательства (суточный расход желчи (мл), возникновение дуоденобилиарного рефлюкса (да/нет), значение дилатации желчного протока (мм)) и выработать тактику пост-операционного лечения, чтобы приблизить показатели холединамики после удаления желчного пузыря к показателям нормы для конкретного пациента;

- **установлено**, что литогенная желчь – неньютоновская тиксотропная жидкость. Экспериментально выявлено различие между поведением пузырной и холедохеальной видов желчи, взятой у пациентов разного пола и возраста. Получены кривые течения литогенной желчи, позволяющие провести идентификацию параметров для моделирования течения желчи в билиарной системе. **Создана** база данных параметров моделей Кассона и Каро для пациентов, которая позволяет классифицировать диапазоны параметров для пациентов разного пола и возраста;

- **разработана и реализована** методика математического моделирования установки эндобилиарного стента с памятью формы;

- **разработан** оригинальный численный алгоритм моделирования накопления частиц на поверхности пластикового стента, позволяющий прогнозировать срок его функциональной эффективности. Результаты численных экспериментов показали, что на время окклюзии стента существенное влияние оказывают вязкость желчи, концентрация частиц и радиус стента. Полученные значения сроков функциональной эффективности для разных диаметров коммерческих стентов, активно применяемых в клинике, с учетом возраста и пола пациентов коррелируют как с лабораторными данными, так и с клиническими результатами;

- **предложена** биомеханическая модель взаимодействия передней брюшной стенки с шовным материалом, позволившая определить связь между усилиями, прикладываемыми к нити при затягивании шва и напряженно-деформированным состоянием апоневроза для профилактики возникновения вентральных грыж;

- **представлена** программная реализация результатов в виде информационной системы по принятию решений (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663202), которая, по мнению автора, позволит объективизировать опыт, накопленный хирургами, спрогнозировать и оценить отдалённые результаты хирургического вмешательства при лечении желчнокаменной болезни и её осложнений, и, соответственно, снизить число пост-операционных осложнений. Проведен ретроспективный анализ 57 пациентов для тестирования информационной системы по прогнозированию результатов холицистэктомии и функционального срока службы билиарного стента.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **предложена** биомеханическая модель течения желчи в билиарной системе в норме, при патологии и после удаления желчного пузыря;

- **разработаны** методики идентификации параметров моделей, также **произведены** численные расчеты и **проведен** анализ полученных данных;

- **разработаны** постановки задач по моделированию течения желчи в элементах билиарной системы;

- **решены** задачи по моделированию течений желчи в желчном пузыре, внепеченочных желчных протоках, большом дуоденальном сосочке;

- **предложены** и **разработаны** биомеханические модели хирургических вмешательств (установка стента с памятью формы, закрытие передней брюшной стенки) и накопления частиц на поверхности пластикового стента для принятия решений в хирургии желчевыделительной системы.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

результаты диссертационного исследования могут быть использованы при разработке аналогичных систем поддержки принятия решений для хирургов при лечении пострадавших с различной патологией при решении задач, связанных с выбором тактики лечения и дополнительного оперативного доступа.

результаты исследований **разработаны и внедрены** в программу дисциплины «Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг» магистерской подготов-

ки по профилю основной образовательной магистерской программы «Биомеханика» по направлению ВО 15.04.03 (151600.68) «Прикладная механика»;

получено 3 удостоверения на рационализаторское предложение и 4 акта внедрения;

результаты исследований использовались при выполнении НИР, поддержанных Министерством образования и науки «Государственное задание 2017–2019» (№ 19.7286.2017/8.9 («Биомеханический подход к улучшению диагностики и хирургического лечения желчнокаменной болезни»)), а также грантов РФФИ (проекты № 14-01-31027, 16-08-00718, 18-29-10020) и гранта правительства Пермского края на развитие научной школы Пермского края «Компьютерная биомеханика и цифровые технологии в биомедицине»;

написаны программы, в которых реализованы алгоритмы моделирования, использующиеся при решении задач (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015616588, 2014613712, 2017613442, 2019663202).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для теоретических результатов достоверность подтверждается хорошим количественным соответствием с данными численного моделирования и экспериментами;

использованы специально разработанные и апробированные компьютерные программы, предназначенные для численного моделирования течения жидкостей при их взаимодействии с твердым телом.

Личный вклад соискателя состоит в том, что им лично разработаны постановки задач, построены все математические модели в рамках решения вышеуказанных научных задач, проведена численная реализация и осуществлены некоторые экспериментальные исследования:

- проведен обзор гиперупругих моделей, используемых для описания поведения мягких тканей, в том числе желчных протоков, и обоснована их применимость;
- предложена биомеханическая модель течения желчи в билиарной системе в норме, при патологии и после удаления желчного пузыря;
- разработаны методики идентификации параметров моделей, также произведены численные расчеты и проведен анализ полученных данных;
- разработаны постановки задач по моделированию течения желчи в элементах билиарной системы;
- решены задачи по моделированию течений желчи в желчном пузыре, внепеченочных желчных протоках, большом дуоденальном сосочке;

– предложены и разработаны биомеханические модели хирургических вмешательств (установка стента с памятью формы, закрытие передней брюшной стенки), накопления частиц на поверхности пластикового стента для принятия решений в хирургии желчевыведительной системы;

– написаны программы, в которых реализованы алгоритмы моделирования, использующиеся при решении задач (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015616588, 2014613712, 2017613442, 2019663202).

Также следует отметить, что у соискателя имеются 5 моноавторских статей.

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в научно-исследовательских организациях, занимающихся биомеханикой биожидкостей (НИИ Механики МГУ, г. Москва, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск), а также в учебном процессе вузов, ведущих подготовку специалистов в области биомеханики (СГУ имени Н.Г. Чернышевского, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Южный федеральный университет, Санкт-Петербургский государственный университет).

Содержание диссертации удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.08 – «Биомеханика».

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: 1) об обосновании выбора математической модели желчного пузыря; 2) о неясности, того, откуда были взяты параметры модели накопления частиц на стенке стента; 3) о необходимости пояснения срока между забором биологической жидкости и проведением эксперимента; 4) о целесообразности исследования, как конкретные материалы стенки стента могут влиять на скорость накопления твердых фракций на его стенках; 5) о необходимости привести характеристики сетки (*aspect ratio*, *skewness*, и т.д.), выявляющие её качество.

Соискатель Кучумов А.Г. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и дал необходимые пояснения: 1) пояснил, что из классических моделей для описания поведения течения жидкости в резервуаре с упругими стенками является классическая, хорошо себя зарекомендовавшая в решении подобных задач модель Франка. При нахождении констант модели наблюдалась небольшое отклонение экспериментальной и теоретической кривых; 2) А.Г. Кучумов пояснил, что параметры брались с клинических и экспериментальных данных; 3) было указано, что срок

между забором жидкости и началом проведения эксперимента составлял 1-2 часа. Также было показано, что желчь «теряет» свои реологические свойства через 4-5 часов после забора; 4) А.Г. Кучумов прокомментировал, что для производства пластиковых коммерческих стентов используются такие материалы как полиэтилен, полиуретан и тефлон. Разработанная модель позволяет учесть тип материала стента при условии наличия экспериментальных данных для окклюзии стентов из интересующих материалов. В работе были исследованы полиэтиленовые стенты, применяемые в ГКБ №4 г. Перми; 5) А.Г. Кучумов указал, что несмотря на то, что в диссертации не приведено aspect ratio и skewness для сетки, в тексте присутствует анализ конечно-элементной сетки и сеточной сходимости (раздел 3.3.2.1). В таблице 32 представлены данные по количеству конечных элементов в 4 тестируемых сетках. Результаты сеточной сходимости представлены на рис. 65. Также проведен анализ дискретизации по времени.

В диссертации решена крупная научная проблема биомеханики, заключающаяся в создании биомеханического подхода к персонализированному моделированию холединамики в билиарной системе в норме, при патологии и лечении желчнокаменной болезни и ее осложнений. Полученные результаты существенны для практического здравоохранения и имеют важное социально-экономическое значение.

На заседании 27 декабря 2021 года диссертационный совет принял решение присудить Кучумову А.Г. ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.02.08 – «Биомеханика».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек (11 человек находились в месте проведения заседания, 5 человека участвовали в заседании совета в удаленном интерактивном режиме), из них 6 докторов по специальности 01.02.08 – «Биомеханика», участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета: проголосовал: за – 16, против – нет, воздержавшихся – нет.

Председатель
диссертационного совета



Коссович Леонид Юрьевич

Ученый секретарь
диссертационного совета

Голядкина Анастасия Александровна

27 декабря 2021 г.