

## Результаты публичной защиты

Дата защиты: 21 марта 2019 г.

Соискатель: **Орлов Степан Геннадьевич.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук на тему: «Математические модели, алгоритмы и программный комплекс для расчёта динамики систем твёрдых деформируемых тел с многочисленными контактными взаимодействиями».

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

На заседании председательствует – Председатель диссертационного совета, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор Б.Н. ЧЕТВЕРУШКИН.

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 25 членов диссертационного совета присутствовали 20, из них 7 докторов по профилю рассматриваемой диссертации:

1.	ЧЕТВЕРУШКИН Б.Н.	д.ф.-м.н.	05.13.18
2.	ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
3.	КАЛИТКИН Н.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
4.	КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
5.	АНДРЕЕВ В.Б.	д.ф.-м.н.	01.01.07
6.	ВАСИЛЕВСКИЙ Ю.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
7.	ГОЛОВИЗНИН В.М.	д.ф.-м.н.	01.02.05
8.	ЕЛИЗАРОВА Т.Г.	д.ф.-м.н.	01.02.05
9.	КАРАМЗИН Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
10.	КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
11.	КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
12.	КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
13.	ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
14.	МАЖУКИН В.И.	д.ф.-м.н.	05.13.18
15.	МИЛЮКОВА О.Ю.	д.ф.-м.н.	01.01.07
16.	МИХАЙЛОВ А.П.	д.ф.-м.н.	05.13.18
17.	ПЕТРОВ И.Б.	д.ф.-м.н.	01.02.05
18.	ПОЛЯКОВ С.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
19.	ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
20.	ЯКОВОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

О присуждении Орлову Степану Геннадьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Математические модели, алгоритмы и программный комплекс для расчёта динамики систем твёрдых деформируемых тел с многочисленными контактными взаимодействиями» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 13 декабря 2018 года, (протокол заседания № 22) диссертационным советом Д002.024.03 на базе ФГУ ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», 125047, Москва, Миусская пл., д.4, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Орлов Степан Геннадьевич, 1975 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Асимптотическое расщепление при моделировании линейно упругих стержневых конструкций из неоднородных материалов» защитил в 2002 году в диссертационном совете, созданном на базе Санкт-Петербургского государственного морского технического университета.

Соискатель работает в должности доцента кафедры «Компьютерные технологии в машиностроении» института металлургии, машиностроения и транспорта ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Диссертация выполнена на кафедре «Компьютерные технологии в машиностроении» института металлургии, машиностроения и транспорта ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Научный консультант** — доктор технических наук, **Шабров Николай Николаевич**, заведующий кафедрой «Компьютерные технологии в машиностроении» института металлургии, машиностроения и транспорта ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Официальные оппоненты:**

1. **Бухановский Александр Валерьевич**, доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», директор мегафакультета трансляционных информационных технологий;
2. **Мухин Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики;

3. **Федулов Борис Никитович**, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», ведущий инженер лаборатории прочности и композиционных материалов НИО-101

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»** в своем положительном заключении, подписанном Товстиком Петром Евгеньевичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой теоретической и прикладной механики; Юшковым Михаилом Петровичем, доктором физико-математических наук, профессором кафедры теоретической и прикладной механики, указала, что диссертационная работа С.Г. Орлова является законченным научным исследованием, в ее рамках на высоком научном уровне решена важная научная проблема предсказательного моделирования динамики бесступенчатых трансмиссий. Работа С.Г. Орлова соответствует критериям, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор, Орлов Степан Геннадьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 41 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации 28 опубликованных работ, из них 13 опубликовано в рецензируемых научных изданиях, в том числе 2 работы без соавторов. Соискателем получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные результаты диссертационного исследования, достоверны. Авторский вклад соискателя в публикации составляет 10.45 печ. л.

К числу наиболее значительных работ соискателя можно отнести следующие публикации:

1. N. Shabrov, Yu. Ispolov, S. Orlov. Simulations of continuously variable transmission dynamics // ZAMM Journal of applied mathematics and mechanics: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 94(11), pp. 795-806. WILEY-VCH Verlag, 2014 (1 печ. л., WoS, Scopus, Q2).
2. С. Г. Орлов. Малоразмерные динамические модели бесступенчатой трансмиссии. // Доклады академии наук 479(4), с. 368-372, 2018 (0.63 печ. л., WoS, Scopus, Q2)
3. S. Orlov. C++ playground for numerical integration method developers // Communications in Computer and Information Science 793, pp. 418-429, 2017 (1.5 печ. л., Scopus, Q3)
4. S. Orlov, N. Shabrov. Vertex shader for visualizing a deformable strip. // Scientific Visualization, pp. 1-14, 8(2), 2016 (1.5 печ. л., Scopus, Q4)
5. S. Orlov, A. Kuzin, N. Shabrov. Two approaches to speeding up dynamics simulation for a low dimension mechanical system // Communications in Computer and Information Science 793, pp. 95-107, 2017 (0.81 печ. л., Scopus, Q3)
6. S. Orlov, N. Melnikova. Compound Object Model for Scalable System Development in C++ // Procedia Computer Science 66, pp. 651-660, 2015 (1 печ. л., Scopus)
7. S. Orlov, N. Melnikova, Yu. Ispolov, N. Shabrov. High-performance simulations of continuously variable transmission dynamics // Conference: Russian Supercomputing Days, Moscow, pp. 41-48, 2015 (0.5 печ. л., Scopus)
8. S. Orlov, A. Kuzin, N. Melnikova, N. Shabrov. Application of Numerical time Integration Schemes to Continuously Variable Transmission Dynamics Analysis // Procedia Computer Science 101, pp. 53-57, 2016 (0.32 печ. л., Scopus)

Вклад соискателя в совместные работы заключался в разработке физических и математических моделей бесступенчатых трансмиссий, адаптации и программировании последовательных реализаций численных методов, создании программных архитектур и технологий, разработке программного кода, подготовке исходных данных для численных расчетов, обработке результатов расчетов, подготовке текста публикаций.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Отзыв официального оппонента д.т.н. Бухановского А.В.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. На стр. 272 главы 2 диссертант говорит о возможности использования методов распараллеливания вычислений, когда "каждый столбец матрицы Якоби в методе Ньютона можно вычислять в отдельном потоке". Однако далее утверждается, что для ускорения в 100 раз необходимо от 600 до 1800 ядер. Поскольку широко распространенных систем с общей памятью с такими процессорами в настоящее время не существует, по-видимому, речь идет о иерархическом распараллеливании между многоядерными узлами кластера. Однако диссертант ничего не сообщает о влиянии коммуникационной составляющей на эффективность распараллеливания (что принципиально для кластерных систем). Кроме того, в работе отсутствует экспериментальное подтверждение эффективности распараллеливания, анонсированного в разделе 2.6, полученное путем испытаний программного комплекса, описанного в главе 3.
2. Излагая важную часть диссертации по специальности 05.13.18 описание программного комплекса (глава 3), диссертант использует неопределенные и нечеткие выражения, недопустимые при описании объектов техники и технологий. Например, на стр. 291 "маленькая часть функциональности реализована на языке...", на стр. 284 "... комплекс состоит примерно из 80 модулей...". Учитывая, что в законченном программном изделии количество модулей должно быть известно точно (согласно схеме деления и спецификации), подобные высказывания не согласуются с оценкой достоверности результатов исследования.
3. В главе 4 диссертант описывает среду для формирования процедур решения задачи Коши с использованием различных инструментальных компонентов, при этом называет ее "игровой площадкой для разработчика численных методов...". Однако пояснения причин использования термина "игровая площадка" на стр. 337 не являются убедительными, поскольку не формулируется ни цель игры, ни ограничения, а также сама система не участвует в игровом процессе. Скорее, эту разработку можно отнести к традиционным проблемно-ориентированным средам, PSE — Problem Solving Environment.
4. В диссертации наличествуют множественные отклонения от ГОСТ Р 7.0.11 в части оформления рисунков и таблиц.

Отзыв официального оппонента д.ф.-м.н., доц. Мухина С.И.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. В тексте содержатся стилистические погрешности и небрежности. Например, на стр. 240 «Предпочтение было отдано варианту с участком параболы, а не арктангенсу первое из равенств (1.298)», стр. 243 «соответствующие формы собственных колебаний, как уже говорилось, содержат осевые перемещения концов половинок пинов», стр. 257 «а лишь в качестве опорных методов для экстраполяции по Ричардсону эту идею можно найти в [84, п. 6.4.2]», и во многих других местах.
2. Неудачная форма нумерации формул, которая привела к существованию формул с номером типа (1.343).

3. В п.2.3 (стр.243) и далее обсуждаются собственные числа матрицы Якоби системы ОДУ, однако то, как эти числа получены, не указано, и читатель может сделать об этом косвенный вывод только после прочтения остального текста главы.

Отзыв официального оппонента д.ф.-м.н. Федулова Б.Н.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Было бы интересно сравнить каждую предложенную модель с экспериментом, и наблюдать улучшение — предсказательной способности модели с ее усложнением, при этом автор этого не делает, а в декларативной манере ссылается на опыт.
2. В конечном итоге автор использует явный метод интегрирования, что не позволяет использовать детализированные конечно-элементные сетки в деформируемых телах. Что существенно снижает возможности модели. Так как с первых строк диссертации напрашивается добавление одного из элементов цепи в виде детализированной сетки для оценки действующего цикла нагрузок. Такую информацию можно было бы использовать для оптимизации и оценки ресурса цепи.
3. На стр. 30 название раздела «Влияние сжимающей силы на изгибную жёсткость пина» вводит в заблуждение, так как понятие изгибная жесткость пина скорее относится к геометрии и его материалу, и по-видимому, стоило назвать раздел увеличение прогиба при действии сжимающих сил.
4. Столкновение жестких тел должно приводить к бесконечным ускорениям, в работе используется большое количество именно жестких тел. На мой взгляд автору стоило бы уделить больше внимания этому моменту, так как это ключевой момент в данном моделировании.
5. Имело бы смысл выделить отдельный раздел во введении посвященный именно контактному взаимодействию большого количества дискретных тел, так как данная тема имеет бурное развитие в последние годы, и является ключевой для данной работы. Например, одна из первых работ по гранулярным средам Кундала и Страка (1979) имеет более 13 тыс. ссылок, есть большие обзоры по этой теме.
6. В плане вопроса моделирование контакта — интересно было бы узнать, как решают этот вопрос другие исследователи и понять логику автора по выбору предложенных методик.
7. На стр. 220 автор демонстрирует посчитанные частоты, при этом не вполне понятно, посчитаны ли эти частоты с учетом нагрузок, и если да, то каким образом автор учитывал движение цепи?
8. Не очевидным является факт того, что автор не поднимает вопрос о температуре. Повышение температуры может существенным образом изменить динамику системы, это связано и с изменением параметров трения и с тепловым расширением элементов цепи.
9. Интересно было бы проанализировать возможный износ как элементов цепи, так и соприкасающихся в контакте шайб. Имеется в виду влияние износа на динамические характеристики системы, так как в данном случае, как представляется из работы замена некоторых геометрических параметров не представляется затруднительной.

Отзыв ведущей организации — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

В отзыве указаны следующие замечания:

1. В моделях не рассмотрено влияние некоторых дополнительных физических факторов, например, влияние изменения температуры.
2. В «малых» моделях не учтена растяжимость ленты в продольном направлении.

3. Сравнение экспериментальных данных с численными решениями недостаточно убедительно.
4. Не рассмотрены некоторые другие важные методы численного интегрирования систем ОДУ, например, многошаговые методы.
5. Глава 3 написана слишком поверхностно.

На **автореферат** диссертации поступило четыре **положительных** отзыва. В некоторых имеются замечания.

В отзыве Георгия Олеговича Котиева, д. т. н., заведующего кафедрой СМ10 «Колесные машины» факультета Специальное машиностроение, и Александра Игоревича Комиссарова, к. т. н., старшего научного сотрудника, отдел СМЗ-2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, замечания отсутствуют.

В отзыве Владимира Анатольевича Полянского, доктора технических наук, заведующего лабораторией прикладных исследований ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН, замечаний нет.

В отзыве Евгения Борисовича Кремера, доктора технических наук, старшего научного сотрудника, координатора группы динамики отдела конечных элементов фирмы Шефлер Аутомотив ГмбХ и Ко. КГ, имеется следующее замечание:

1. Следует отметить, что контактная модель взаимодействия пина с шайбой содержит только силу, но не момент. Это на наш взгляд практически оправдано, так как составляющая скорости, связанная с относительным вращением пина по отношению к шайбе в пределах пятна контакта достаточно мала в реальных случаях. Тем не менее это ограничение общности модели следовало оговорить.

В отзыве Александра Яковлевича Фидлина, доктора технических наук, профессора, члена коллегиального совета директоров Института инженерной механики Технологического института Карлсруэ, имеются следующие замечания.

1. Единственным существенным ограничением модели является отсутствие учёта нелокальных деформационных эффектов локальных контактных взаимодействий пинов с шайбами. Такой подход обусловлен стремлением к повышению быстродействия разработанного программного комплекса и определяет границы применимости модели для исследования акустических эффектов в частотном диапазоне до 5 кГц.
2. К сожалению, для рецензента осталось неясным, почему представляющийся весьма перспективным метод DUMKA3 не был включён в состав программного комплекса, а именно в состав фреймворка `ode_num_int`.

Имеется акт (сертификат) о внедрении результатов диссертационной работы Орлова С.Г., подтверждающий использование результатов исследований в разработке системы бесступенчатых трансмиссий, производимых фирмой LuK GmbH&Co. KG, г. Бюль, Германия. Акт подписан Андре Тойбертом, руководителем по проектированию бесступенчатых трансмиссий.

**Выбор официальных оппонентов** и ведущей организации обосновывается их широко известной компетенцией в вопросах механики деформируемого твёрдого тела, математического моделирования, разработки численных методов и алгоритмов, создания программных комплексов. Это подтверждается многочисленными научными публикациями оппонентов и сотрудников ведущей организации (полный перечень

публикаций отражен в сведениях, представленных на сайте организации, где проходила защита).

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

**предложены и разработаны** новые физические и математические модели бесступенчатой трансмиссии с пластинчатой цепью, обеспечивающие возможность предсказательного моделирования а) ее глобальной динамики, б) напряженно-деформированного состояния элементов цепи, в) зависимости КПД трансмиссии от параметров режима, г) акустического шума в диапазоне до 5 кГц. Это моделирование характеризуется высокой степенью детализации и учетом ряда существенных факторов, таких как деформации всех элементов цепи трансмиссии и зависимость положения точек контакта между пинами цепи и шайбами шкивов от этих деформаций;

**предложен** новый способ описания локального контактного взаимодействия, обеспечивающий возможность эффективной численной реализации за счет использования дополнительной информации о положении точек контакта в некоторой отсчетной конфигурации и применения линеаризованных соотношений для вычисления кинематических параметров контакта в актуальной конфигурации, что допустимо благодаря малости деформаций валов трансмиссии и элементов цепи;

на основании проведенных исследований **найлены** классы численных методов интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяющие повысить эффективность численных расчетов по разработанным детализированным моделям бесступенчатых трансмиссий; исследованные численные методы адаптированы для систем с дискретным состоянием, меняющимся при наступлении событий.

**создан** проблемно-ориентированный программный комплекс для предсказательного моделирования бесступенчатых трансмиссий на основе разработанных математических моделей, являющийся полнофункциональным отчуждаемым программным продуктом и успешно применяемый на предприятии, разрабатывающем бесступенчатые трансмиссии;

**разработаны** программные технологии, реализующие продуманную объектную модель и компоненты для решения задач общего характера, в том числе средства интеграции с языком сценариев и средства автоматизированного создания актуальной пользовательской документации, что облегчает создание на их базе малыми коллективами разработчиков проблемно-ориентированных программных комплексов на языке C++ в области предсказательного моделирования гетерогенных систем;

**создана** программная инфраструктура с открытым исходным кодом, предназначенная для исследования поведения и эффективности численных методов решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений с числом переменных до нескольких тысяч в применении к конкретной задаче пользователя с целью выбора наиболее эффективных из них или создания новых. Архитектура компонентов инфраструктуры следует принципу единственной ответственности, что обеспечивает возможность интенсивного повторного использования кода и является существенным фактором, облегчающим разработку новых компонентов.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

в нем продемонстрирована возможность создания работоспособных математических моделей механических систем, состоящих из многочисленных твердых деформируемых упругих тел в условиях контакта, на основе применения формального аппарата аналитической механики, в частности, лагранжева формализма, с использованием прямого тензорного исчисления как средства компактной инвариантной записи кинематических и определяющих соотношений. Это является существенным вкладом в методологию математического моделирования несвободных механических систем;

разработанные физические и математические модели бесступенчатых трансмиссий обеспечивают качественно новый уровень предсказательного моделирования этих

устройств и существенно расширяют границы их применимости по сравнению с другими моделями.

### **Значение полученных соискателем результатов исследования для практики**

подтверждается тем, что:

созданный проблемно-ориентированный программный комплекс для предсказательного моделирования бесступенчатых трансмиссий на протяжении многих лет используется на предприятии, занимающемся их разработкой и изготовлением, что подтверждено соответствующим актом внедрения результатов диссертационного исследования;

на основе разработанных программных технологий созданы другие проблемно-ориентированные программные комплексы, на один из которых имеется свидетельство о государственной регистрации № 2012612403;

разработанная инфраструктура с открытым исходным кодом для исследования численных методов решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений применена соискателем при проведении исследования в гл. 2.

### **Оценка достоверности результатов исследования показала, что:**

при математическом моделировании вывод уравнений движения базируется на применении лагранжева формализма к голономной механической системе; использованные при этом определяющие соотношения для описания упругости и демпфирования являются классическими; описание упругого контактного взаимодействия основано на теории Герца; использованные способы описания трения являются типичными для современной практики. Всё это наряду с корректным применением математического аппарата обеспечивает достоверность теоретических построений;

достоверность полученных результатов подтверждается многолетним опытом практического использования разработанного программного комплекса разработчиками бесступенчатых трансмиссий, а также обеспечивается логикой процесса многолетней эволюции созданных моделей трансмиссии, в котором присутствует обратная связь, приводящая к последовательному уточнению моделей;

сравнение данных, полученных в натуральных и численных экспериментах, дает удовлетворительное согласие результатов, а само исследование положительно оценено сотрудниками предприятия, занимающегося разработкой бесступенчатых трансмиссий.

### **Личный вклад соискателя** состоит в том, что:

все основные результаты диссертационного исследования и положения, выносимые на защиту, получены лично автором;

все представленные в диссертации программные технологии и программные комплексы разработаны соискателем лично, за исключением небольшой части программного кода (не более 10%), созданной под его руководством;

все численные расчеты и обработка полученных решений выполнены автором лично;

в совместных публикациях по теме диссертационного исследования соискателю принадлежит ведущая роль (математические модели бесступенчатой трансмиссии, последовательные версии численных методов, программные технологии и комплексы программ).

На заседании 21 марта 2019 года диссертационный совет принял решение присудить

Орлову С. Г. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек (из 25 человек, входящих в состав совета), из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании,



проголосовали:

за - 20, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель диссертационного совета  
Д 002.024.03, академик РАН

Б. Н. Четверушкин

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 002.024.03, к.ф.-м.н.

М. А. Корнилина

М.П.

21 марта 2019 г.