

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.012.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 15.12.2016 № 142

О присуждении *Ужеговой Надежде Ивановне*, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Диссертация** «Разработка методов анализа экспериментальных данных атомно-силовой микроскопии для исследования структуры и свойств эластомерных нанокompозитов» по специальности 01.02.04 «Механика твердого деформируемого тела» принята к защите 13.10.2016, протокол № 132 диссертационным советом Д 004.012.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк.

**Соискатель** Ужегова Надежда Ивановна 1987 г. рождения, в 2010 г. окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный университет» по направлению «Механика. Прикладная математика». В 2013 г. окончила аспирантуру очной формы обучения в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИМСС УрО РАН) по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. До июля 2016 г. занимала должность инженера-исследователя лаборатории микромеханики структурно-неоднородных сред ИМСС УрО РАН, в настоящее время не работает. Диссертация выполнена в лаборатории микромеханики структурно-неоднородных сред ИМСС УрО РАН.

**Научный руководитель** – *Свистков Александр Львович*, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией микромеханики структурно-неоднородных сред ФГБУН ИМСС УрО РАН.

**Официальные оппоненты:**

*Зингерман Константин Моисеевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет», заведующий кафедрой вычислительной математики;

*Аношкин Александр Николаевич*, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», заведующий кафедрой механики композиционных материалов и конструкций, дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение

науки Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанным Гольдштейном Робертом Вениаминовичем, член-корреспондентом РАН, доктором физико-математических наук, заведующим лабораторией механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН, Устиновым Константином Борисовичем, доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории геомеханики ИПМех РАН, и Маховской Юлией Юрьевной, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории трибологии ИПМех РАН указала, что диссертация представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне, содержащее существенное продвижение в моделировании процессов контактного взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с эластомерами. Диссертация полностью соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор Ужегова Н.И. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Соискатель имеет 25 опубликованных работ по теме диссертации, из них 8 статей в рецензируемых научных изданиях (в журналах, рекомендуемых ВАК). В работах представлено моделирование взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа с жидкостью на поверхности изучаемого материала с учетом действия сил Лапласа. Предложена новая модель контактного взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) с мягким материалом с целью расшифровки результатов наноиндентирования. Описана методика выделения объектов заданного размера на получаемых с помощью АСМ рельефах поверхности образца. Большая часть работ выполнена в соавторстве, с определяющим вкладом соискателя. Наиболее значительные работы:

1. Ужегова Н.И., Свистков А.Л., Гаришин О.К. Теоретическое моделирование взаимодействия индентора атомно-силового микроскопа с жидкой нанопленкой на поверхности образца // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15, № 6(2). – С. 512-516.

2. Ужегова Н.И., Свистков А.Л., Гаришин О.К. Моделирование контакта зонда атомно-силового микроскопа с жидкой пленкой // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2014. – Т. 16, № 1. – С. 84-90.

3. Uzhegova N.I., Svistkov A.L., Lauke B., Heinrich G. The influence of capillary effect on atomic force microscopy measurements // International Journal of Engineering Science. – 2014. – Vol. 75. – P. 67-78.

4. Морозов И.А., Ужегова Н.И. Определение механических свойств материалов на основе моделей взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с поверхностью образцов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7, № 4. – С. 385-397.

5. Свистков А.Л., Солодько В.Н., Евлампиева С.Е., Ужегова Н.И., Мохирева К.А. Разработка методов компьютерного моделирования механического поведения эластомерного нанокompозита на основе знаний о структуре материала и активности

наполнителя // Вестник РФФИ. – 2015. – № 3(87). – С. 15-22.

6. Uzhegova N.I., Solodko V.N., Svistkov A.L. The multilevel method for analyzing heightmap data of nanocomposites obtained by atomic force microscopy // Proceedings of the 9th European Conference on Constitutive Models for Rubber. – Prague. – 2015. – P. 81–86.

7. Ужегова Н.И., Свистков А.Л. Новая модель контактного взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с исследуемым материалом // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 315-329.

8. Ужегова Н.И., Свистков А.Л. Многоуровневый анализ рельефа поверхности образца, полученного методами атомно-силовой микроскопии // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9, № 3. – С. 366-374.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы от оппонентов и ведущей организации:**

1. Положительный отзыв официального оппонента Зингермана К.М. Оппонент указывает на то, что в автореферате имеется неудачная фраза «Для задания граничных явлений...». Оппонент считает, что было бы целесообразно учесть силы Ван дер Ваальса в модели, описывающей взаимодействие зонда с жидкостью (глава 3). Оппонент отмечает, что принятое допущение об осесимметричной части зонда, вступающей в контакт с жидкостью или эластомером, в моделях, используемых в третьей и четвертой главах диссертации, не является вполне верным. Также в диссертации не описана методика определения скругления зонда и не указано погрешность этой методики.

2. Положительный отзыв официального оппонента Аношкина А.Н. Оппонент отмечает, что интерес представляет собой сравнительная оценка эффективности предложенного метода многоуровневой визуализации при использовании другого оператора на основе непрерывно дифференцируемой функции. Оппонент указывает на то, что не освещен вопрос о применении разработанной модели контактного взаимодействия в условиях трения между объектами и о влиянии данного эффекта на моделируемые параметры. Оппонент считает, что следовало бы также указать применимость данной модели к описанию контакта зонда с поверхностью материала, жесткость которого сопоставима с жесткостью зонда, а также с поверхностью неоднородного материала, например, композита с эластомерной матрицей и жесткими включениями. В отзыве указывается необходимость апробации разработанной модели при исследовании параметров структуры и свойств эластомеров, модифицированных нанонаполнителем.

3. Положительный отзыв ведущей организации утвержден директором ФГБУН ИПМех РАН, д.ф.-м.н., академиком РАН С.Т.Суржиковым. В отзыве указывается, что недостаточно ясно описано отличие предлагаемой модели от модели Джонсона-Кендалла-Робертса (ДжКР) и что следовало бы провести детальное сопоставление особенностей учета вкладов различных составляющих в уравнение баланса энергии при переходе системы из одного состояния в другое. Также следовало бы отметить, что в модели ДжКР использовано решение задачи о внедрении штампа, обратив внимание на специфику учета этого решения в модели, предложенной в диссертации. Замечено, что один из выводов третьей главы о том, что капиллярные явления не могут служить объяснением скачка на силовой кривой, сделан на основании моделирования взаимодействия зонда с

поверхностью воды при наличии мениска, без учета конечности толщины водяной пленки и без учета деформируемости образца, поэтому он является слишком общим. Следовало бы его конкретизировать указанием условий, при которых скачек на кривой подвода отвода не может быть объяснен наличием мениска. Отмечается, что диссертация и автореферат не свободны от грамматических и стилистических погрешностей.

На автореферат поступило 8 положительных отзывов, из них 3 отзыва – без замечаний от: Русакова С.В., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой прикладной математики и информатики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»; Пестренина В.М., доцента кафедры механики сплошных сред и вычислительных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»; Патлажана С.А., д.ф.-м.н., главного научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН.

Также 5 отзывов с замечаниями от: Багряшова С.В., к.т.н., руководителя службы развития Научно-исследовательского центра АО «Воронежсинтезкаучук»; Сметанникова О.Ю., д.т.н., доцента кафедры вычислительной математики и механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»; Любимова А.К., д.ф.-м.н., профессора кафедры теоретической, компьютерной и экспериментальной механики Института информационных технологий, математики и механики государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» и Филатова Д.О., д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»; Веселова И.В., к.т.н., профессора, генерального директора ООО НПКЦ ВЕСКОМ и Гамлицкого Ю.А., к.ф.-м.н., доцента, главного научного сотрудника ООО НПКЦ ВЕСКОМ; Власова В.В., к.т.н., доцента кафедры химической технологии биологически активных веществ и полимерных композитов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный технический университет» и Соловьева М.Е., д.ф.-м.н., профессора кафедры химической технологии биологически активных веществ и полимерных композитов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный технический университет».

В качестве замечаний отмечено следующее: в тексте автореферата ничего не говорится о реальной толщине адсорбированного слоя жидкости на поверхности исследуемого материала в экспериментальных условиях и о минимальной величине слоя, которая влияет на взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа с материалом; также при чтении автореферата возникает вопрос о начальных и граничных условиях,

который использовались при решении уравнения для определения границы жидкости около зонда при решении осесимметричной задачи внедрения зонда на разных масштабных уровнях, а также о том, использовались ли карты распределения механических характеристик исследуемого материала при разработке конкретных эластомерных нанокомпозитов; нет информации о том, можно ли применять уравнения механики сплошных сред к рассматриваемым задачам, когда речь идет об объектах нанометровых размеров; мало уделено внимания физическому смыслу предложенных математических процедур для выделения объектов с различной кривизной поверхности; осталось не ясно преимущество многоуровневого анализа, следовало бы сравнить его с такими известными методами, как Roll Ball, Wavelet; непонятна подпись к рисунку 2 автореферата; не указаны конкретные значения радиуса кривизны поверхности выделяемых объектов; некорректное использование термина «начальные условия»; интересно было бы провести эксперимент в вакууме, чтобы оценить влияние капиллярных сил на взаимодействие зонда АСМ с поверхностью материала; не приведено выражение для новой модели контактного взаимодействия; осталось не ясно, можно ли с помощью разработанной модели вычислять толщину пленки жидкости и ее поверхностное натяжение.

В отзывах отмечено, что диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и практическую значимость, в частности с помощью предложенных методов можно оценивать качество смещения нанокомпозитов на наномасштабах, которые были недоступны стандартным приборами типа «Диспертестер» или «Диспергрейдер».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

**официальные оппоненты** являются одними из ведущих специалистов в области механики твердого деформируемого тела, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных работ по изучению композиционных материалов, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

**ведущая организация** ИПМех РАН является одним из ведущих институтов страны и хорошо известен своими достижениями в области механики деформируемого твердого тела, в институте активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования в областях общей механики; механики жидкости, газа и плазмы; механики деформирования и разрушения твердых тел и конструкций; механики композиционных и наноматериалов; трибологии.

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

**разработана** методика анализа полученных с помощью атомно-силовой микроскопии рельефов поверхности с целью выделения на этой поверхности объектов заданного характерного размера;



**доказано**, что силы Лапласа существенно влияют на взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа с тонкой жидкой пленкой на поверхности материала, действие которых заметно на большом расстоянии от зонда атомно-силового микроскопа;

**предложена** новая модель контакта зонда атомно-силового микроскопа с упругим материалом, более точно учитывающая изменения энергии в системе кантилевер-зонд-материал, геометрию зонда и изменение поверхности контакта его с материалом при наноиндентировании;

**введена** методика определения числа агрегатов и их распределения;

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

**доказаны:**

— необходимость учета кривизны поверхности границы жидкости при анализе капиллярных явлений около зонда атомно-силового микроскопа;

— возможность расширения границ применимости моделей Дерягина-Мюллера-Топорова и Джонсона-Кендалла-Робертса за пределами областей, которые указали авторы этих моделей;

— необходимость модификации существующего подхода к моделированию процесса наноиндентирования упругих материалов для более точного учета геометрии зонда и баланса энергии в математических моделях.

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)**

**использованы** традиционные представления механики твердого деформируемого тела и теории капиллярных явлений, вычислительные возможности современного программного обеспечения;

**изложены**

— методика анализа рельефа поверхности структурно-неоднородного материала;

— результаты численного исследования влияния капиллярных явлений на поведение жидкости около зонда атомно-силового микроскопа, полученные с учетом существенного влияния на границу жидкости сил Лапласа;

— сравнительный анализ существующих моделей и новой модели процесса наноиндентирования материала;

**раскрыты** причины, позволяющие использовать классические модели наноиндентирования Дерягина-Мюллера-Топорова и Джонсона-Кендалла-Робертса за пределами, на которые указывали их авторы, а также пути дальнейшего уточнения этих моделей;

**изучены** локальные механические воздействия, влияющие на взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа с мягким упругим материалом;

**проведена модернизация** существующих подходов обработки результатов измерений атомно-силового микроскопа в режиме наноиндентирования материала и изучения структуры материала на наноуровне;

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

**разработана** методика получения количественной информации о локальных свойствах среды на основе обработки экспериментальной кривой наноиндентирования материала;

**созданы** компьютерные программы, которые позволяют моделировать взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа со слоем жидкости на поверхности материала; выделять и анализировать объекты заданного характерного размера, расположенные на криволинейных поверхностях; моделировать прямой и обратный ход зонда атомно-силового микроскопа;

**определены** особенности использования механики деформируемого твердого тела к объектам наноуровня, требующие дополнительного учета влияния поверхностных явлений на границах зонд-воздух, зонд-материал на формирование напряженно-деформированного состояния около зонда атомно-силового микроскопа;

**представлены** результаты использования созданных программ для получения карт распределения частиц наполнителя в эластомерных нанокompозитах.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**теория** построена на известных положениях механики деформируемого твердого тела и согласуется с экспериментальными данными;

**идея базируется** на обобщении и развитии подходов, используемых для обработки данных атомно-силовой микроскопии;

**установлено** качественное соответствие авторских результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными других авторов;

**использованы** лицензионные пакеты прикладных программ и экспериментальные данные, полученные на современном оборудовании.

**Личный вклад соискателя состоит в:** разработке программ, проведении вычислительных экспериментов, сравнении теоретических и экспериментальных данных, анализе полученных результатов.

**Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования и взаимосвязанными выводами.**

На заседании 15 декабря 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Ужеговой Н.И. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 15, против – 0, недействительных бюллетеней – 1.

Зам. председателя  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета



  
/ Роговой Анатолий Алексеевич

  
/ Зуев Андрей Леонидович

15.12.2016 г.

М.П.