

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМех РАН)**

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735
ИНН/КПП 7729138338/772901001

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПМех РАН,
академик С.Т. Суржиков



29.11.2016 № 11504/01-21412-658

На № _____

Отзыв ведущей организации

на диссертацию Ужеговой Надежды Ивановны

**«РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И
СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ НАНОКОМОПОЗИТОВ»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Композиты на основе эластомеров используются в различных отраслях промышленности, в первую очередь - шинной промышленности. Для дальнейшего улучшения их механических и эксплуатационных характеристик в настоящее время наметилась тенденция использования вместо традиционных наполнителей (типа частиц сажи) нанонаполнителей (нанотрубок, графена и проч.), с целью создания наноструктурированных материалов. Для создания новых композитных материалов такого типа необходимы знания о структуре вещества, его механических свойствах на наноуровне. Одним из основных инструментов получения данной информации является атомно-силовая микроскопия. Однако адекватная расшифровка экспериментальных результатов, полученных с помощью атомно-силовой микроскопии, требует наличия соответствующих механико-математических моделей. Построение таких моделей является, таким образом, важной для практических приложений фундаментальной задачей. Этим обусловлены актуальность и практическая значимость диссертации.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, одного приложения и списка литературы из 156 наименований. Общий объем рукописи – 136 страниц в формате машинописного текста. Работа содержит 72 рисунка, 3 таблицы.

В первой главе приведен обзор литературы, рассмотрены основные режимы работы атомно-силового микроскопа (АСМ) и методы анализа результатов зондовой микроскопии. Выявлены ограничения существующих методов и, тем

самым, обоснован выбор предмета исследования.

Вторая глава посвящена проблеме выделения объектов на рельефе поверхности образца, полученного с помощью атомно-силовой микроскопии. На основе многоуровневого анализа рельефа поверхности разработана методика выделения объектов заданного размера на существенно криволинейной поверхности. В работе предложена методика выделения неровностей, размеры которых не превышают некоторый характерный размер, определяемый характерным размером области осреднения. С помощью полученной новой гладкой поверхности предложено убирать на рельефе неровности большого размера. В результате получается карта с объектами, размеры которых не превышают определенный характерный размер. Данная процедура обобщается для выделения рельефов с объектами разных характерных размеров. Это позволяет представить исследуемый рельеф в виде суммы нескольких поверхностей, каждая из которых позволяет судить о неровностях определенного характерного размера. Подчеркнем, что подобные методики отсутствуют в стандартных математических обеспечениях атомно-силовых микроскопов.

Третья глава посвящена компьютерному моделированию контактного взаимодействия зонда АСМ с пленкой жидкости на поверхности образца. Показано, что применяемая в настоящее время схема вычисления капиллярных сил не учитывает существенные моменты. Отличие между давлением в жидкости и в окружающем его воздухе при кривизне поверхности в несколько нанометров достигает тысяч атмосфер, что необходимо принимать во внимание в вычислениях. Приведенные в диссертации расчеты показали, что поверхность не должна иметь высокие кривизны и что необходимо учитывать обе главные кривизны при расчетах. Показана необходимость учета вклада силы тяжести поднимающейся жидкости в общую силу, действующую на зонд.

Четвертая глава посвящена моделированию контактного взаимодействия зонда АСМ с поверхностью исследуемого материала. Проведен анализ и сравнение наиболее известных моделей контактного взаимодействия. Представлена новая модель контактного взаимодействия зонда АСМ с поверхностью исследуемого материала, согласно которой упругое взаимодействие зонда с материалом представлено как сумма взаимодействия жесткого параболоида вращения и жесткого цилиндрического штампа с упругим материалом в области малых деформаций. Показано, что предложенная модель лучше описывает момент отрыва зонда от образца на его обратном ходе. Модель ДжКР может быть получена из предложенной модели в предельном переходе, когда вклад решения от вдавливания штампа в материал (во время отвода штампа от материала при хорошей адгезии) можно считать несущественным.

Отметим главные достижения автора:

- Разработана методика выделения объектов заданного размера на существенно криволинейной поверхности на основе многоуровневого анализа рельефа поверхности;
- С помощью компьютерного моделирования изучено взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа с жидкой пленкой на поверхности образца с

учетом действия сил Лапласа;

- Предложена новая модель взаимодействия зонда АСМ с поверхностью исследуемого материала. Модель применима для случая исследования поверхности мягкого материала.

Основными являются следующие результаты

- Обоснование необходимости учета действия не только сил Лапласа, но и гравитационных сил в жидкой среде при анализе взаимодействия зонда АСМ с адсорбированным слоем жидкости на поверхности исследуемого материала;

- Результаты численного моделирования взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с пленкой жидкости на поверхности образца с учетом действия сил Лапласа и гравитационных сил;

- Разработанная новая механико-математическая модель наноиндентирования материала.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием апробированных методов механики сплошных сред, согласованием результатов, полученных на основе разработанных моделей, с экспериментальными данными, а также с результатами, полученными другими авторами.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в исследованиях, проводимых в Институте проблем механики РАН (Москва), Институте прикладной механики РАН (Москва), Институте проблем машиноведения РАН (Санкт-Петербург), Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Институте механики сплошных сред УрО РАН (Пермь), в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого и других учреждениях, сталкивающихся с задачами механики эластомеров и исследованиями с помощью атомно-силовой микроскопии.

По работе имеются замечания:

1. В тексте диссертации недостаточно ясно описано отличие предлагаемой модели от модели Джонсона-Кендалла-Робертса (ДжКР). Следовало бы провести детальное сопоставление особенностей учета вкладов различных составляющих в уравнение баланса энергии при переходе системы из одного состояния в другое. Далее, 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.

2. Один из выводов к главе 3 гласит: «капиллярные явления не могут служить объяснением скачка на силовой кривой». Вывод сделан на основании моделирования взаимодействия зонда с поверхностью воды при наличии мениска, без учета конечности толщины водяной пленки и без учета деформируемости образца. Представляется, что такой вывод – слишком общий. Возможно, его нужно конкретизировать указанием условий, при которых скачек на кривой подвода-отвода не может быть объяснен наличием мениска (в условиях большого количества жидкости, взаимодействия жестких тел).

3. Диссертация и автореферат не свободны от грамматических и стилистических погрешностей, на которых останавливаться не будем.

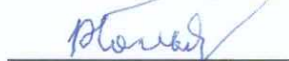
Сделанные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку

диссертации. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации, давая ясное представление о постановке исследования. Основные результаты своевременно опубликованы в ведущих международных и российских журналах (International Journal of Engineering, Вычислительная механика сплошных сред и др.) и трудах международных конференциях.

Считаем, что диссертация Н.И. Ужеговой «Разработка методов анализа экспериментальных данных атомно-силовой микроскопии для исследования структуры и свойств эластомерных нанокомпозитов» представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне, содержащие существенное продвижение в моделировании процессов контактного взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с эластомерами. Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. Надежда Ивановна Ужегова заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по этой специальности.

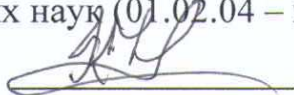
Отзыв обсужден на заседании семинара Лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций под руководством чл.-корр. РАН Р.В. Гольдштейна, 28 сентября 2016 г., протокол № 11.

Заведующий лабораторией механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук (01.02.04 – механика деформируемого твердого тела)



Гольдштейн Роберт Вениаминович

Старший научный сотрудник лаборатории геомеханики ИПМех РАН, доктор физико-математических наук (01.02.04 – механика деформируемого твердого тела)



Устинов Константин Борисович

Старший научный сотрудник лаборатории трибологии ИПМех РАН, кандидат физико-математических наук (01.02.04 – механика деформируемого твердого тела)



Маховская Юлия Юрьевна

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, 119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1; (495) 434-00-17; ipm@ipmnet.ru; <http://www.ipmnet.ru>.