

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА**  
**24.1.029.01 (Д002.034.01) НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО**  
**БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО**  
**ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАП РАН),**  
**Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА**  
**НАУК**  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение Диссертационного совета от «11» апреля 2025 г. № 6

о присуждении Лукашенко Станиславу Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Особенности использования СЗМ-зондов в нанодиагностике» по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 17.01.2025 г, протокол № 1, диссертационным советом 24.1.029.01 (Д002.034.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.31-33, лит. А, приказ от 02.11.2012 № 714/нк.

Соискатель: Лукашенко Станислав Юрьевич, 1991 года рождения, в 2014 г. окончил Университет ИТМО по направлению подготовки 200100 «Приборостроение». Диплом магистра с отличием № 107824 0105724, выдан 30.06.2014.

Лукашенко Станислав Юрьевич обучался в аспирантуре с 01.09.2014 по 31.08.2018 в Университете ИТМО по направлению подготовки 05.11.01 Приборы и методы измерения (по видам измерений).

С 2015 года по настоящее время Лукашенко Станислав Юрьевич работает младшим научным сотрудником в лаборатории Сканирующей зондовой микроскопии и Спектроскопии Института аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН).

Диссертация выполнена в ИАП РАН.

**Научный руководитель:** Голубок Александр Олегович, доктор физико-математических наук, в настоящее время главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии Института аналитического приборостроения РАН.

**Официальные оппоненты:**

Спивак Юлия Михайловна, доктор технических наук, доцент кафедры Микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» представила на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1) Из текста диссертации остается неясным возможно ли применение резонансного детектора массы на основе высокоаспектного зондового датчика с наноловушками для определения массы живых объектов в жидкости. Насколько при этом

сохранится диапазон, в котором можно достоверно определить массу таких объектов? Есть ли ограничения по значениям рН или вязкости таких жидкостей?

2) Проводились ли оценки того, насколько прочно закреплен углеродный нановискер на острие вольфрамового зонда? Сколько «актов взвешивания» можно провести? Как влияет внешняя среда на срок службы такого зондового датчика?

3) Интересна возможность применения так называемого «пик-эффекта» в методе СКМ для определения локальной жесткости мягких образцов в жидкости, но остается неясным диапазон возможных измеряемых жесткостей таких объектов и локальность метода.

4) В несколько непривычном виде представлена цель работы, а точнее их сформулировано четыре для данного исследования. На мой взгляд, было бы полезно, если бы диссертант смог бы выделить кратко главную, объединяющую более частные задачи, общую цель.

5) В тексте диссертации и автореферате присутствуют незначительные грамматические ошибки и опечатки.

Дунаевский Михаил Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории Оптики поверхности ФГБУН «Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе РАН» представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1) В главе 2 автор достаточно подробно исследует причины возникновения паразитных латеральных колебаний зонда и приводит убедительные рекомендации по уменьшению этих колебаний. Полагаю, автор мог бы продемонстрировать СЗМ-изображения, полученные неоптимальными зондами, в которых исследуемые объекты «искажены вдоль направления колебаний». Это бы наглядно продемонстрировало негативную роль латеральных колебаний в формировании СЗМ-изображения.

2) В главе 2 автор определяет характерные времена затухания паразитных колебаний, возникающих в режиме «хоппинг». Данные колебания возникают при резких движениях зонда вверх-вниз. Возможно ли как-то в режиме хоппинг модифицировать алгоритм движения зонда чтобы сделать его более «плавным» и избежать таким образом возникновения паразитных колебаний зонда?

3) В главе 3 автор объясняет сильный сдвиг резонансной частоты нановискеров при переходе от вакуумных условий к комнатной атмосфере в рамках модели связанных осцилляторов. На рисунке 53 приведен расчет АЧХ в модели связанных осцилляторов с разными константами связи (0,1, 4, 13). При одном из значений константы связи возникает резонансный пик на частоте 5,5 МГц, что хорошо согласуется с экспериментом. При этом также возникает достаточно сильный низкочастотный резонанс на частоте около 1,6 МГц. Вопрос – удавалось ли экспериментально наблюдать этот низкочастотный резонанс?

4) В главе 3 автор убедительно демонстрирует возможность создания чувствительного сенсора массы на базе углеродного нановискера. Однако, для измерения массы необходимо использовать сканирующий электронный микроскоп, что может затруднять применение таких сенсоров. Можно ли как-то упростить измерение резонансной частоты нановискера, например, с помощью емкостного метода детектирования колебаний. Автору стоит прокомментировать такую возможность/невозможность.

5) К сожалению, текст диссертации содержит ряд опечаток. Например: стр. 40 лишнее слово «методы» после «(СКМ, также известный как СМПП или SICM)» - стр.49 вместо рис.1 должно быть рис.31 - в формуле (3) для потенциала Леннарда-Джонса небольшая ошибка – один из степенных показателей должен быть 6. - на стр. 29 ошибочная нумерация формулы для длины Дебая – вместо (18) должно быть (3) - в названии таблицы 1 фигурирует «резонансная частота пучка». Про какой пучок идёт речь? Также есть общее замечание к оформлению рисунков - очень маленькие размеры цифр на шкалах и подписи шкал графиков.

Ведущая организация – МГУ имени М.В. Ломоносова в своем **положительном заключении**, утвержденном проректором МГУ имени М.В. Ломоносова, профессором, доктором физико-математических наук Федяниным Андреем Анатольевичем, подписанном Хохловым Алексеем Ремовичем, академиком РАН, доктором физико-математических наук, заведующим кафедрой физики полимеров и кристаллов МГУ имени М.В. Ломоносова и Яминским Игорем Владимировичем, доктором физико-математических наук, профессором кафедры физики полимеров и кристаллов МГУ имени М.В. Ломоносова указала, что диссертация Лукашенко С.Ю. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2, и отметила следующие замечания:

1. Во второй главе проведено моделирование латеральных колебаний, влияющих на размер пятна контакта в tapping моде СЗМ и хоппинг моде СКМ, однако не приведено никаких данных об экспериментальных подтверждениях. Хотелось бы знать, проводились ли эксперименты в этой области.
2. В третьей главе исследовались сложные колебания одиночных вискероов, а также каркасных структур на основе вискероов сложной формы, например, имеющих Г-образную форму. Хотелось бы выяснить мотивацию этих исследований, и могут ли такие сложные колебания найти применение в области СЗМ.
3. В формуле для тепловых шумов туннельного перехода (стр.15, формула 1) пропущен числовой множитель 4.
4. В диссертации сформулировано утверждение, что на практике уровень шумов в токе туннельного микроскопа в основном обусловлен случайными изменениями зазора между зондом и образцом, вызванными механическими, тепловыми и акустическими шумами. В полной мере с этим утверждением согласиться нельзя. Правильно сконструированный туннельный микроскоп работает на уровне фундаментальных шумов, упомянутых автором диссертации.

Соискатель имеет 28 (двадцать восемь) опубликованных работ, индексируемых в базах SCOPUS и Web of Science, из них по теме диссертации 16 (шестнадцать), в т.ч. из Перечня ВАК 16 (шестнадцать).

К наиболее значительным работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся 11 (одиннадцать) публикаций, опубликованных в журналах, состоящих в Перечне ВАК:

1. **Lukashenko, S. Yu.**, Gorbenko, O. M., Zhukov, M. V., Pichakhchi, S. V., Sapozhnikov, I. D., Felshtyn, M. L., Golubok, A. O. Behavioral features of the approach curve of a scanning ion-conductance microscope // *J. Surf. Investig.: X-ray, Synchrotron.* – 2023. – V. 17. – № 3. – P. 585–591. DOI: 10.1134/S1027451023030112
2. **Lukashenko, S. Yu.**, Lysak, V. V., Sapozhnikov, I. D., Mukhin, I. S., Golubok, A. O. Study of micro- and nanomechanical oscillators based on crystalline W and amorphous C whiskers // *AIP Conf. Proc.* – 2015. – V. 643. – № 1. – P. 012114. DOI: 10.1063/1.4932765
3. **Lukashenko, S. Y.**, Golubok, A. O., Komissarenko, F. E., Mukhin, I. S., Sapozhnikov, I. D., Veniaminov, A. V., Lisak, V. Precise mass detector based on carbon nanooscillator // *AIP Conf. Proc.* – 2016. – V. 1748. – P. 050002. DOI: 10.1063/1.4954374
4. Zhukov, M. V., **Lukashenko, S. Yu.**, Sapozhnikov, I. D., Golubok, A. O., Chubinskiy-Nadezhdin, V. I., Komissarenko, F. E. Scanning ion-conductance and atomic force microscope with specialized sphere-shaped nanopipettes // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2017. – V. 917. – № 4. – P. 042022. DOI: 10.1088/1742-6596/917/4/042022
5. **Lukashenko, S. Y.**, Golubok, A. O., Mukhin, I. S., Veniaminov, A. V., Sapozhnikov, I. D., Lysak, V. V. Q-factor study of nanomechanical system "metal tip - carbon nanowhisiker" at low and ambient pressure // *Phys. Status Solidi (A).* – 2016. – V. 213. – № 9. – P. 2375–2379. DOI: 10.1002/pssa.201600199
6. Zhukov, M. V., **Lukashenko, S. Yu.**, Sapozhnikov, I. D., Felshtyn, M. L., Gorbenko, O. M., Golubok, A. O. Scanning ion-conductance microscope with modulation of the sample position along the Z-coordinate and separate Z-axial and lateral (X, Y) scanning // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – V. 2086. – № 1. – P. 012074. DOI: 10.1088/1742-6596/2086/1/012074
7. **Lukashenko, S. Yu.**, Mukhin, I. S., Komissarenko, F. E., Gorbenko, O. M., Sapozhnikov, I. D., Felshtyn, M. L., Golubok, A. O. Resonant mass detector based on carbon nanowhiskers with traps for nanoobjects weighing // *Phys. Status Solidi (A).* – 2018. – V. 215. – № 21. – P. 1800046. DOI: 10.1002/pssa.201800046
8. **Lukashenko, S.**, Mukhin, I., Gorbenko, O., Larionenko, G., Sapozhnikov, I., Felshtyn, M., Golubok, A. Visualization of complex oscillations of carbon nanowhiskers in SEM // *AIP Conf. Proc.* – 2019. – V. 2064. – P. 020002. DOI: 10.1063/1.5089875
9. **Lukashenko, S. Yu.**, Gorbenko, O. M., Sapozhnikov, I. D., Zhukov, M. V., Felshtyn, M. L., Pichakhchi, S. V., Golubok, A. O. On the spatial resolution of a piezoresonance probe sensor with a tungsten needle // *J. Surf. Investig.: X-ray, Synchrotron.* – 2023. – V. 17. – № 3. – P. 578–585. DOI: 10.1134/S1027451023030100
10. Жуков М. В., **Лукашенко С. Ю.**, Сапожников И. Д., Фельштын М. Л., Горбенко О. М., Пичахчи С. В., Голубок А. О. Многомодовый сканирующий микроскоп ионной проводимости с системой пьезоинерциального перемещения // *Научное приборостроение.* – 2022. – V. 32. – № 4. – P. 68–87.
11. Жуков, М. В., Горбенко, О. М., **Лукашенко, С. Ю.**, Сапожников, И. Д., Фельштын, М. Л., Пичахчи, С. В., Голубок, А. О. Влияние поверхностного заряда на ионную проводимость электролита в наноканале // *ФТТ.* – 2023. – Т. 65. – № 12. – С. 2208–2211. DOI: 10.21883/FTT.2023.12.56535.426

## **На автореферат диссертации поступили следующие отзывы:**

- 1) От доктора физико-математических наук, доцента, члена корреспондента РАН, директора Высшей школы теоретической механики и математической физики, Физико-механического института, Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (г. Санкт-Петербург) Кривцова Антона-Иржи Мирославовича:

Замечания к диссертации носят рекомендательный характер. Хотелось бы видеть более детальное обсуждение долгосрочной стабильности колебаний при многократном использовании зондов, а также рассмотреть возможность миниатюризации зондовых систем для массового параллельного анализа наночастиц. Однако эти вопросы скорее расширяют перспективы будущих исследований и не снижают значимости уже достигнутых автором результатов.

- 2) От доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника, профессора кафедры Физики конденсированного состояния и наноразмерных систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Института естественных наук и математики» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург) Шура Владимира Яковлевича:

Вместе с тем, из текста автореферата не ясно, проводилось ли исследование пик-эффекта на различных материалах. Несомненно, следовало провести детальное сравнение измеренного пик-эффекта с теоретическими предсказаниями для того, чтобы лучше понять природу данного явления и возможности применения.

- 3) От кандидата физико-математических наук, научного сотрудника лаборатории Технологии двумерной микроэлектроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института автоматики и процессов управления» Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Владивосток) Азатьяна Сергея Геннадьевича:

Из недостатков работы я могу выделить следующее:

1. Автор не смог предложить корректный перевод с английского, как он написал «труднопереводимого термина», «self-sensing», который он использует несколько раз по тексту автореферата в английском написании (стр. 3, 4, 6, 10). Относительно метода атомно-силовой микроскопии перевести его можно как «автозондирование» или «автоизмерительный» (по отношению к зонду), когда информация о поверхности снимается с зонда непосредственно встроенным в него пьезоэлектрическим (пьезорезонансным) или ёмкостным датчиком, а не сторонней оптической (простой световой или лазерной) системой.
2. То же самое относится к термину «tapping», который автор использует один раз (стр. 7). В атомно-силовой микроскопии этот режим исследования называется полуконтактным, когда зонд периодически касается («постукивает», по-английски «to tap») образца в процессе исследования. Особенно непонятно, почему автор использовал английское написание термина, если и до, и после этого он честно применял русский термин «полуконтактный».
3. Автор неоправданно использовал англицизм (или даже жаргонизм) «биосенсинг» (стр. 7), никак не расшифровывая его, хотя это, скорее всего, означает зондирование био- или биосодержащих объектов или детектирования биохимических реакций.
4. Автор испытывает большую любовь к необоснованному использованию аббревиатур, особенно к не общепринятым. Если использование аббревиатуры «УНВ» («углеродный нановискер») ещё как-то можно понять, хотя всё равно тяжело воспринимать текст, когда их 8 штук на один абзац, то использование таких как «НЧ» («наночастица») и «НП» («нанопипетка») точно можно считать избыточными, сильно усложняющими восприятие текста. А вот общепринятую аббревиатуру «АЧХ» автор использует (несколько раз), но не расшифровывает в тексте, хотя это необходимо делать, потому что это аббревиатура, а не акроним.
5. На рисунке 4 автор не описал его части (в) и (г), а часть (б) описал явно неправильно: «оптическое изображение УНВ». Скорее всего, подписи должны были быть примерно следующие: «СЭМ-изображения покоящегося нановискера (а) и его же в колебательном режиме (б); оптические изображения УНВ в режиме покоя (в) и в колебательном режиме (г)».
6. Это и последующие замечания относятся к оформлению автореферата. В подписях к рисункам автор поставил конечные точки, хотя этого не нужно делать.
7. В англоязычной литературе в вещественных числах разделителем между целой и дробной частью является точка, а в русском языке — запятая. Но на рисунке 4 д, е, ж все надписи на английском языке, а разделитель вещественных чисел запятая, тогда как на рисунке 9 наоборот — надпись на русском, а разделитель точка. Это может ввести читателя в некоторое заблуждение, так как в русском языке точка, а в английском запятая, является разделителем порядков числа. Вообще же, было бы лучше, если бы автор перевёл и русифицировал все рисунки

своего автореферата (и, наверное, диссертации), включая обозначения единиц физических величин на них.

8. Для указания диапазона значений того или иного параметра автор использует числа в виде цифр, разделённые тире с пробелами либо дефисом с пробелами или без. Всю эту конструкцию автор заключает в скобки, оставляя, например, знак порядка величины (тильду, «~»), а также указание единиц физических величин диапазона вне скобок. В одном месте (стр. 14) автор значение и ошибку указывает без скобок, но в скобки берёт указание единицы физической величины значения. А на странице 4 в скобки берёт единичное значение, вынося знак порядка величины и единицу физической величины вне скобок. Всё это немного трудно читать, что сказывается на корректном восприятии текста. В русском языке разделителями границ числового диапазона, если значения пишутся в цифровом виде, являются: многоточие, дефис (или короткое тире), а также обелюс (знак «+»), которые пишутся между граничными значениями диапазона без пробелов. После, через пробел, указывается единица физической величины.
9. Зачем-то автор на странице 13 заключил в отдельные скобки обозначения диаметров соответствующих наночастиц и их точное или примерное значение: «с диаметрами ( $d_{SiO_2}=350$  нм), ( $d_{Au}=100-200$  нм) и ( $d_{TiO_2}\sim 100$  нм), соответственно», что также не облегчает понимание текста автореферата.

- 4) От доктора технических наук, Президента нанотехнологического общества России, Почётного президента группы компаний НТ-МДТ «Спектр Инструментс» (г. Москва) Быкова Виктора Александровича:

Замечаний нет.

- 5) От кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории Радиационной биофизики и биомедицинских технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (г. Москва) Фрони Анастасии Андреевны:

По автореферату имеется незначительное замечание, касающееся единообразия оформления работы.

- 6) От кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург) Евтихиева Вадима Павловича:

В качестве замечаний хочется отметить то, что название диссертации носит довольно общий характер. Приведенное в автореферате описание процесса захвата наночастиц и механизма их удержания в предложенных автором

наноловушках недостаточно подробное. При прочтении автореферата была обнаружена опечатка в пункте 1 «Научная новизна».

Высказанные замечания носят общий характер, и не меняют общей положительной оценки работы.

7) От кандидата технических наук, научного сотрудника лаборатории Физиологии возбудимых мембран Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физиологии имени И.П. Павлова Российской академии наук (г. Санкт-Петербург) Халисова Максима Миндигалеевича:

Автореферат написан понятным языком и логично структурирован, предоставляет возможность полноценного ознакомления с содержанием диссертационной работы. Однако есть несколько замечаний, касающихся оформления автореферата.

1. Для обозначения одной из разновидностей СЗМ автор использует сравнительно редко применяемое название «сканирующий силовой микроскоп» вместо более распространенного – «(сканирующий) атомно-силовой микроскоп». Не лишним было бы привести последнее название при первом упоминании прибора.

2. Автор недостаточно строго соблюдает единый стиль оформления, в частности это касается оформления рисунков. При представлении численных данных в качестве десятичного разделителя в одних случаях используется запятая, в других – точка. Знаки «дефис», «тире», «длинное тире» используются случайным образом, как для указания диапазонов численных значений, так и в тексте, включая подписи к рисункам.

3. При перечислении используемых методов исследования автор указывает «сканирующая зондовая микроскопия, ..., сканирующая (капиллярная) микроскопия токов ионной проводимости», хотя второй метод представляет собой разновидность первого.

4. В тексте автореферата отсутствуют ссылки на некоторые рисунки (1a, 3b).

8) От кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории Оптики поверхности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург) Алексева Прохора Анатольевича:

1. На странице 4 указывается, что «масса осциллятора должна быть сравнима с массой измеряемой частицы». Данное утверждение наводит читателя на мысль, что массы близки по порядку величины или могут отличаться на порядок, но не более. Однако далее следует, что величины отличаются на много порядков. Хотелось бы более строгого критерия, определяющего соотношение массы осциллятора и измеряемой частицы.

2. На странице 11 вводятся значения  $L_h=2\text{мм}$ ,  $L_v=3\text{мм}$ . При этом эти же обозначения вероятно представлены на рис.1 б, но в виде  $L_h$  и  $L_v$ . Требуется пояснение, это опечатка или нет?



- 9) От кандидата биологических наук, ведущего научного сотрудника с возложением обязанностей руководителя группы Ионных механизмов клеточной сигнализации Отдела внутриклеточной сигнализации и транспорта Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института цитологии Российской академии наук (г. Санкт-Петербург) Владислава Игоревича Чубинского-Надеждина:

В качестве замечаний хочется отметить то, что название диссертации носит довольно общий характер. Кроме того, кажется не совсем удачным использование термина «биосенсинг», так как не очень ясно, что под этим имеется в виду. Также, при прочтении автореферата была обнаружена опечатка в пункте 1 «Научная новизна». Высказанные замечания носят общий характер, и не меняют общей положительной оценки работы.

- 10) От доктора физико-математических наук, высококвалифицированного старшего научного сотрудника отделения Физики твердого тела отдела Твердотельной фотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (г. Москва) Казанцева Дмитрия Всеволодовича:

Замечаний нет.

**Все отзывы на автореферат диссертации положительные.**

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается их большим опытом работы в областях сканирующей зондовой микроскопии, наномеханики, моделирования физических процессов в нанодиагностике микро- и наноструктур, что подтверждается публикациями, в которых рассматриваются вопросы, связанные с тематикой диссертационного исследования соискателя.

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

**обоснованы** способы улучшения пространственного разрешения зондов с высоким аспектным отношением в виде вольфрамовых наноигл и стеклянных нанокапилляров;

**описана** технология создания детектора массы на основе углеродного нановискера, выращенного на вершине острой вольфрамовой иглы (радиус около 50 нм), и методика резонансного измерения массы наночастиц в диапазоне ( $10^{-14}$ - $10^{-17}$ ) г на частоте первой гармоники;

**выполнено** сравнение добротности колебаний углеродного нановискера в вакууме ( $10^{-6}$  Па) и в воздушной среде при атмосферном давлении и, как следствие, **обнаружен** и **обоснован** эффект сохранения добротности колебаний при переходе от измерений в вакууме к воздушной среде;

**предложена** методика косвенного определения диаметра апертуры нанокапилляра для случая нелинейных вольт-амперных характеристик и **показано**

согласие результатов косвенных измерений размера наноапертуры с прямыми измерениями в просвечивающем электронном микроскопе;

в нанокapиллярах с диаметром апертуры ~100 нм, расположенных вблизи поверхности на расстоянии сравнимом с диаметром апертуры **обнаружено** увеличение ионного тока по сравнению с током насыщения, **показано**, что при различной концентрации электролита (водного раствора NaCl) внутри и снаружи нанокapилляра превышение тока насыщения достигает ~500 %;

**показано**, что увеличение ионного тока через нанокapилляр связано со знаком поверхностного заряда на образце и полярностью электрического напряжения, и **предложен** метод оценки относительного изменения локального заряда поверхности в жидкости при помощи обнаруженного пика на кривой подвода.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что применительно к проблематике диссертации эффективно, с получением обладающих новизной результатов:

**предложено** объяснение эффекта сохранения высокой добротности резонансных колебаний углеродного нановискера на вершине вольфрамовой иглы при переходе от колебаний в вакууме к колебаниям в воздушной среде, основанное на учете изменения параметра силовой связи в системе связанных осцилляторов «W игла – углеродный нановискер»;

**модифицирована** модель Пуассона-Нернста-Планка-Навье-Стокса, учитывающая изменение вязкости, диэлектрической проницаемости и коэффициентов диффузии ионов электролита в наносужениях и объясняющая возникновение пика на кривой подвода в сканирующем капиллярном микроскопе.

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

1. Разработан детектор массы на основе углеродного нановискера, выращенного на вершине вольфрамовой иглы, который позволяет измерять массу наночастиц в диапазоне ( $10^{-14}$ – $10^{-17}$ ) г.

**Практическое применение:** устройство в перспективе может быть использовано в лабораторных условиях для анализа и мониторинга биологических объектов (вирусы, белки, молекулы ДНК и др.), а также при исследовании процессов создания наноструктур, где требуется сверхчувствительное измерение массы.

**Преимущество:** методика резонансного измерения на первой гармонике обеспечивает стабильность работы, как в вакууме, так и в воздушной среде (за счёт эффекта сохранения высокой добротности колебаний), что расширяет сферу применения.

2. Предложена методика косвенного определения диаметра апертуры нанокapилляров на основе анализа нелинейных вольт-амперных характеристик.

**Практическое применение:** разработанная методика может быть использована

при массовом контроле размеров апертуры нанокпилляров, обладающих нелинейными вольтамперными характеристиками.

3. Определены условия возникновения пика на кривой подвода в СКМ (увеличение ионного тока по сравнению с током насыщения).

**Практическое применение:** возникновение пика на кривой подвода в СКМ позволяет выбирать параметры получения стабильных изображений в СКМ экспериментах.

**Преимущество:** обнаруженный пик на кривой подвода может лечь в основу новой методики по контролю локального заряда на поверхности в электролите.

Полученные в ходе выполнения работы результаты могут быть востребованы в научных и образовательных организациях, занимающихся исследованиями и разработками в области нанодиагностики, таких как:

1. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (Москва),

2. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (Санкт-Петербург),

3. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук» (Москва),

5. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (Санкт-Петербург),

4. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (Санкт-Петербург),

5. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)» (Санкт-Петербург),

6. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт цитологии Российской академии наук (Санкт-Петербург),

7. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт эволюционной физиологии и биохимии имени И. М. Сеченова Российской академии наук (Санкт-Петербург),

8. Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук (Санкт-Петербург),

9. ООО «НТ-МДТ» (Москва),

10. «Центр перспективных технологий» ФемтоСкан (Москва).

**Оценка достоверности результатов исследования выявила**, что научные положения, выводы и результаты, содержащиеся в диссертации, подтверждаются использованием признанных, апробированных и обоснованных физических методов, комплексным характером выполненных экспериментов и исследований численными методами с использованием лицензионных программных пакетов, а

также воспроизводимостью полученных экспериментальных данных. Достоверность экспериментальных данных обеспечена использованием метрологически поверенного оборудования. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими оценками и моделированием.

Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международная конференция SPB OPEN, Академический Университет 2015, 2016, 2017, г. Санкт-Петербург,
2. 18-я Международная молодежная конференция по физике и астрономии Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе 2015, г. Санкт-Петербург,
3. Международная зимняя школа по физике полупроводников 2017, г. Санкт-Петербург – Зеленогорск,
4. Международная конференция STRANN 2016, 2018, г. Санкт-Петербург,
5. Всероссийская конференция «Применение сканирующей зондовой микроскопии в вакууме и различных средах» 2021, 2022, 2023, г. Черноголовка,
6. X Всероссийский Молодежный научный форум с международным участием «Open Science 2023», ПИЯФ, г. Гатчина,
7. Международная конференция "Сканирующая зондовая микроскопия для биологических систем – BIOSPM 2023», Москва,
8. International Conference on Metamaterials and Nanophotonics METANANO 2019, Санкт-Петербург,
9. International Conference on Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies (FLAMN) 2021, Санкт-Петербург,
10. XXVIII Международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», 2024 г. Нижний Новгород,
11. Ежегодная всероссийская молодежная конференция «Методы и приборы для анализа биологических проб - АналитБиоПрибор», 2024 г., Санкт-Петербург.

#### **Личный вклад соискателя:**

- Изготовление экспериментальных образцов, нанокapилляров, наноигл, наноосцилляторов,
- Разработка и участие в создании экспериментальных установок на основе сканирующего электронного микроскопа, объединенного с пьезорезонансным зондовым датчиком с W иглой, поворотным устройством и микроманипулятором,
- Исследование амплитудно-частотных характеристик наноосцилляторов на основе углеродных нановискеров в вакууме и на воздухе,
- Проведение численных и экспериментальных исследований по измерению массы TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> и Au наночастиц,
- Изготовление и подготовка хлорсеребряных электродов и растворов электролитов,
- Измерение «кривых подвода» в сканирующем капиллярном микроскопе на различных образцах и при различных концентрациях электролита,
- Разработка модели и проведение расчетов ионной проводимости нанокapилляра вдали и вблизи от образца,
- Подготовка научных публикаций совместно с соавторами,
- Представление результатов работы на конференциях.

На заседании 11 апреля 2025 года Диссертационный совет принял решение присудить **Лукашенко Станиславу Юрьевичу** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве **15** человек, из них **15** докторов наук, участвовавших в заседании, из **21** человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: за – **15**, против – **нет**, недействительных бюллетеней – **нет**.

Председатель  
диссертационного **совета**  
д.т.н., профессор



  
В.Е. Курочкин

Ученый секретарь  
диссертационного **совета**  
д.ф.-м.н.

  
А.Л. Буляница

Дата оформления заключения  
11 апреля 2025 г.  
М.П.