


БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА «СТАНДАРТИЗАЦИЯ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой СИ
 П.С. Серенков
«12» 06 2025 г.


РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ
РАЗМЕРОВ В МИКРО- И НАНОДИАПАЗОНЕ НА БАЗЕ
НАНОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ NNM-1

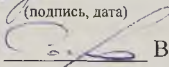
Специальность 1-54 01 01 Метрология, стандартизация и сертификация (по направлениям)

Специальность 1-54 01 01-01 «Метрология, стандартизация и сертификация (машиностроение и приборостроение)»

Студент группы 11305121

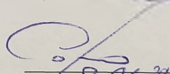
 08.06.2025 В.В. Сенюта
(подпись, дата)

Руководитель

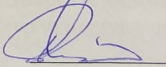
 В.Л. Соломахо
(подпись, дата) д.т.н., профессор

Консультанты:

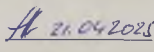
по основной части

 В.Л. Соломахо
(подпись, дата) д.т.н., профессор

по экономическому разделу

 Ф.Ф. Кашлей
(подпись, дата) ст. преподаватель

по разделу «Охрана труда»

 26.04.2025 Т.Л. Автушко
(подпись, дата) ст. преподаватель

Ответственный за нормоконтроль

 13.06.2025 М.А Гомма
(подпись, дата) ст. преподаватель

Объем проекта:

расчетно-пояснительная записка – 139 страниц;

графическая часть – 13 листов;

магнитные (цифровые) носители – 1 единиц.

РЕФЕРАТ

Дипломный проект содержит 139 с. машинописного текста с 46 илл., 23 табл., библиография 54 источников, приложения на 20 с. и 13 листов графической части формата А4.

Метрологическое обеспечение, контроль размеров наночастиц, наноизмерительная машина NMM-1, мера высоты ступени, мера ширины шага, схема метрологической прослеживаемости, методика калибровки

Объектом исследования является измерение линейных размеров в микро- и нанодиапазоне. Предметом исследования является метрологическое обеспечение измерения линейных размеров на базе наноизмерительной машины NNM-1. Целью дипломного проекта является разработка методики калибровки меры высоты ступени как части метрологического обеспечения измерений в нанометровом диапазоне.

В рамках дипломного проекта были проанализированы области применения измерений в микро- и нанодиапазоне и нормативные акты, устанавливающие требования к метрологическому обеспечению измерений и изложению методики калибровки; изучены существующие методы и средства измерения линейных размеров в микро- и нанодиапазоне, а также существующие меры размера в микро- и нанодиапазоне, и определено их место в реализации метрологического обеспечения; выделены основные источники погрешности измерений наноизмерительной машины NMM-1. В процессе работы над дипломным проектом разработаны проект методики калибровки для меры высоты ступени и калибровочная иерархия. Результаты исследования по тематике диплома нашли отражение в реферате на тему «Нанотехнологии и наноматериалы как ключевой фактор обеспечения конкурентоспособности национальной экономики в современных условиях», представленном и награжденном дипломом на Республиканской олимпиаде по менеджменту 2025 года.

ABSTRACT

The degree project contains 139 pages of the typewritten text with 46 plates., 23 tab., bibliography sources 54, applications 20 p. and 11 sheets of the graphical part of A4.

Metrological support, nanoparticle size control, NMM-1 nano-measuring machine, step height standard, step width standard, metrological traceability scheme, calibration technique

The object of the study is the measurement of linear dimensions in the micro- and nanoscale range. The subject of the research is metrological support of linear dimensions measurement on the basis of the NNM-1 nano-measuring machine. The aim of the thesis project is to develop a calibration procedure of the step height standard as a part of metrological support of measurements in the nanometre range.

Within the framework of the thesis project the fields of application of measurements in micro- and nanorange and normative acts establishing requirements to metrological support of measurements and developing calibration procedure were analysed; existing methods and means of measuring linear dimensions in micro- and nanorange, as well as existing standarts in micro- and nanorange were studied and their place in the implementation of metrological support was determined; the main sources of measurement error of NMM-1 nano-measuring machine were identified. In the process of work on the thesis project the project of calibration procedure for the step height standard and calibration hierarchy were developed. The results of research on the subject of the thesis were reflected in the research review on the topic 'Nanotechnology and nanomaterials as a key factor in ensuring the competitiveness of the national economy in modern conditions', presented and awarded at the Republican Olympiad on Management 2025.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23 апреля 2021 г. № 245 О Государственной программе «Наукоемкие технологии и техника» на 2021–2025 годы;
2. О критериях нанотехнологической продукции / С. Ф. Остапюк, А. А. Шмаков, В. В. Кондаков [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 3. – С. 5-6;
3. Закон Республики Беларусь от 5 сентября 1995 г. № 3848-XII Об обеспечении единства измерений;
4. Метрология. Основные термины и определения : РМГ 29-2013 ГСИ ; Введен 01.01.2015;
5. Нуреева Д. Н. Нанотехнологии: возникновение и развитие // Вестник Казанского технологического университета. 2012. №6;
6. Нанотехнологии. Часть 1. Основные термины и определения: ГОСТ ISO/TS 80004-1-2017 введ. 02.08.2017. – Минск : Госстандарт : Белорус. гос. ин-стандартизации и сертификации, 2017, 8 с.;
7. Нанотехнологии. Часть 2. Нанообъекты. Термины и определения: ГОСТ ISO/TS 80004-2-2017 введ. 01.07.2017. – Минск : Госстандарт : Белорус. гос. ин-стандартизации и сертификации, 2017, 16 с.;
8. Полонянкин, Д. А. Применение нанотехнологий и наноматериалов в производстве : учебное пособие / Д. А. Полонянкин. — Омск : ОмГТУ, 2023;
9. Varghese R. J. et al. Introduction to nanomaterials: synthesis and applications //Nanomaterials for solar cell applications. – Elsevier, 2019. – С. 75-95.;
10. Гмошинский И. В., Шипелин В. А., Хотимченко С. А. Наноматериалы в пищевой продукции и ее упаковке: сравнительный анализ рисков и преимуществ //Анализ риска здоровью. – 2018. – №. 4. – С. 134-142.;
11. Исаева, Е. С. Применение наночастиц в косметологии / Е. С. Исаева, И. А. Макарова // Технологии материалов : III Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых, преподавателей : сборник научных трудов, Ульяновск, 25 ноября 2021 года. –

Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2022. –

С. 46-48.;

12. Яковлев Г. И., Первушин Г. Н., Пудов И. А., Дулесова И. Г., Бурьянов А. Ф., Сабер М. Структуризация цементных вяжущих матриц многослойными углеродными нанотрубками // *Construction materials*. 2011. №1 1;

13. Bei D., Meng J., Youan B. B. C. Engineering nanomedicines for improved melanoma therapy: progress and promises // *Nanomedicine*. – 2010. – Т. 5. – №. 9. – С. 1385-1399;

14. Панькина, М. В. Особенности применения нанотехнологий в легкой промышленности / М. В. Панькина // *Моя профессиональная карьера*. – 2019. – Т. 2, № 5;

15. Iannacci J. Introduction to MEMS and RF-MEMS: From the early days of microsystems to modern RF-MEMS passives // *Rf-Mems Technology for High-Performance Passives*; IOP Publishing Ltd.: Bristol, UK. – 2017. – С. 2053-2563;

16. Citation (APA): Klöpffer, W., Curran, M. A., Frankl, P., Heijungs, R., Köhler, A., & Olsen, S. I. (2007). *Nanotechnology and Life Cycle Assessment. A systems approach to Nanotechnology and the environment: Synthesis of Results Obtained at a Workshop Washington, DC 2–3 October 2006*. European Commission, DG Research, jointly with the Woodrow Wilson International Center for Scholars;

17. Representation of results of particle size analysis Part 1: Graphical representation : ISO 9276-1:1998;

18. Нанотехнологии. Часть 6. Характеристики нанообъектов и методы их определения. Термины и определения : ГОСТ ISO/TS 80004-6-2016 ; Введен 01.08.2018. – Минск : Госстандарт : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2018 – 38 с.;

19. Соломахо, В. Л. Методы измерений наноразмерных частиц / В. Л. Соломахо, А. А. Багдун // *Приборостроение-2019 : материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]*. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 246-248;

20. Введение в нанотехнологию : учебник / В. И. Марголин, В. А. Жабров, Г. Н. Лукьянов, В. А. Тупик. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 464

21. Приборы и методы исследований в материаловедении : учебное пособие / В. В. Строкова, П. С. Баскаков, М. Н. Сивальнева, И. Ю. Маркова. — Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. — 165 с.;

22. Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ / И. Ю. Пашкеев, О. В. Самойлова, В. И. Гераскин, Т. М. Лонзингер ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет, Кафедра физической химии. — Челябинск : Издательский центр ЮУ, 2015. — 47 с.;

23. Галлямов М. О., Яминский И. В. Сканирующая зондовая микроскопия: основные принципы, анализ искажающих эффектов // [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.spm.genebee.msu.su/members/gallyamov/gal_yam/gal_yam1.html. — Дата доступа. — 13.04.2025;

24. Рыков, Сергей Александрович. — Сканирующая туннельная микроскопия и атомарно-силовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур: учебное пособие / С. А. Рыков; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. — Частично дополнено и переработано. — Санкт-Петербург, 2022;

25. Парфенов В. А., Юдин И. А. Атомно-силовая микроскопия и ее применения в науке, технике и реставрации [Текст] / Парфенов В. А., Юдин И. А. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2015. — № 9. — С. 61-70;

26. В. Ф. Дряхлушин, В. П. Вейко, Н. Б. Вознесенский, “Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия и ближнепольные оптические зонды: свойства, изготовление и контроль параметров”, Квантовая электроника, 37:2 (2007), 193–203;

27. Ясинский В. М. Сканирующая ближнеполевая оптическая микроскопия: результаты и перспективы. — 2004;

28. НЭ РБ 65-22 Национальный эталон единицы длины в нанометровом диапазоне / [Электронный ресурс] // Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений: [сайт]. — URL:<https://oei.by/etalon/view?id=101369> (дата обращения: 21.04.2025);
29. Багдюн, А. А. Методы и технические средства обеспечения единства измерений размера наночастиц = Methods and Technical Means for Ensuring Uniformity of Nanoparticle Size Measurements / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Наука и техника. — 2022. — № 6. — С. 473-479;
30. Багдюн, А. А. Погрешность передачи размера единицы длины — метра в нанометровом диапазоне измерений при использовании наноизмерительной машины /А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2022. Т. 67, No 1. С. 86–93. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-86-93>;
31. Vorburger T. V. et al. Nano-and Atomic-Scale Length Metrology. — 2006;
32. Huebner U. et al. A nanoscale linewidth/pitch standard for high-resolution optical microscopy and other microscopic techniques //Measurement Science and Technology. — 2007. — Т. 18. — №. 2. — С. 422;
33. Zhang Y. et al. High-Precision Regulation of Nano-Grating Linewidth Based on ALD //Micromachines. — 2022. — Т. 13. — №. 7. — С. 995;
34. Багдюн, А. А., Соломахо, В. Л. Анализ мер в микро- и нанометровом диапазоне, применяемых при метрологической оценке средств измерений [Текст] / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Метрология и приборостроение. — 2025. — № 1. — С. 35-37;
35. CRM for the Calibration of Nano Step-height KRC-NSC-100 / [Электронный ресурс] // Kims Reference Corp. : [сайт]. — URL: https://www.kimsreference.com/en/bbs/content.php?co_id=en-ergy_1_en&me_code=1050&con_id=1&ckattempt=1 (дата обращения: 25.04.2025);

36. Nanuler Calibration Standard / [Электронный ресурс] // Standards Calibration – Standard step : [сайт]. — URL: <https://www.sciencetec.fr/en/produit/standards-calibration-standard-step/> (дата обращения: 26.04.2025);

37. Постановление Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 20 апреля 2021 г. № 38 «Об осуществлении метрологической оценки для утверждения типа средств измерений и стандартных образцов»;

38. Астафьева, Л. Е., Войтек, И. В. Метрологическая оценка рабочих эталонов. Практика установления и реализации требований к ее организации / Л. Е. Астафьева, И. В. Войтек // Метрология и приборостроение. — 2021. — № 3. — С. 13-20;

39. Соломахо, В. Л., Цитович, Б. В. Единство измерений и инструменты его реализации – метрологический потенциал повышения качества продукции и процессов [Текст] / В. Л. Соломахо, Б. В. Цитович // Неразрушающий контроль и диагностика. — 2025. — № 1. — С. 12-18;

40. Санитарные нормы и правила «Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях» и гигиенический норматив «Показатели микроклимата производственных и офисных помещений», утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 30.04.2013г. № 33;

41. Санитарные нормы и правила «Требования к контролю воздуха рабочей зоны», утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 92 от 11.10.2017

42. Гигиенический норматив «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны», утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 92 от 11.10.2017;

43. СН 4.003-2019 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»;

44. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы "Шум на рабочих местах, в транспортных средствах, в помещениях жилых,

общественных зданий и на территории жилой застройки", утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 16.11.2011г. № 115;

45. Санитарные нормы и правила «Требования к производственной вибрации, вибрации в жилых помещениях, помещениях административных и общественных зданий», утвержденными постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 132 от 26.12.2013;

46. СН 04.03-2020 «Естественное и искусственное освещение»;

47. Охрана труда. Методические указания и контрольные задания для студентов заочной формы обучения инженерно-педагогического факультета специальности 1-08 01 01 "Профессиональное обучение (по направлениям)" / Белорусский национальный технический университет, Кафедра "Охрана труда"; сост.: Б. М. Данилко, Т. Н. Киселева, Г. Л. Автушко. - Минск: БНТУ, 2011;

48. Санитарные нормы и правила, утверждённые постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 14 декабря 2012 г. № 198 «Требования к обеспечению безопасности и безвредности воздействия на работников производственных источников ультрафиолетового излучения»;

49. Санитарные нормы и правила «Требования при работе с видеодисплейными терминалами и электронно-вычислительными машинами», утвержденными постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 59 от 28.06.2013;

50. Гигиенический норматив «Показатели безопасности и безвредности факторов производственной среды и трудового процесса при работе с видеодисплейными терминалами и электронно-вычислительными машинами», утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 37 от 25.01.2021;

51. Санитарные правила и нормы 6.11-4 - 2005 "Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников

ионизирующего излучения", утвержденные Постановлением Главного государственного санитарного врача республики беларусь 01 апреля 2005 г. № 36;

52. ТКП 339-2022 Правила устройства и защитные меры электробезопасности;

53. Постановление Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь 3 июня 2003 г. № 70 «Об утверждении межотраслевых общих правил по охране труда»;

54. СН 005-2020 Пожарная безопасность зданий и сооружений.