



А. И. Рагулин,
заместитель генерального
директора
ФБУ «Тест-С.-Петербург»



Т. М. Козлякова,
главный метролог
ФБУ «Тест-С.-Петербург»

РАЗВИТИЕ РОССИЙСКОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Ключевые слова: нанотехнологии, обеспечение единства измерений нанотехнологий, измерительные потребности нанотехнологий, методы и средства измерений параметров нанообъектов, стандартизация в сфере нанотехнологий.

В статье подробно проанализировано современное состояние метрологического обеспечения единства измерений в России в области нанотехнологий, подробно исследованы проблемы метрологического обеспечения с учетом измерительных потребностей и стандартизации в этой отрасли. Несмотря на определенный накопленный опыт нашей страны в этой области, еще достаточно много проблем, требующих грамотного подхода и решения.

Основные задачи системы обеспечения единства измерений нанотехнологий

Развитие науки и техники неразрывно связано с развитием системы методов и средств измерений. Применение нанотехнологий поставил перед наукой и техникой ряд новых специфических задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур, с которыми имеют дело нанотехнологии.

Точные, достоверные и прослеживаемые измерения являются основой обеспечения успешного и безопасного развития нанотехнологий, а также подтверждения соответствия нанотехнологий, наноматериалов и продукции nanoиндустрии. Здесь, как нигде более, актуален тезис: «Если нельзя измерить, то невозможно создать».

Все развитые страны осознают необходимость опережающего развития метрологии в этой бурно развивающейся области знаний, поскольку именно уровень точности и достоверности измерений способен либо стимулировать развитие отраслей экономики, либо служить сдерживающим фактором.

В настоящее время в России накоплен определенный научно-технический задел в области обеспечения измерений геометрических параметров в нанодиапазоне. Разработаны эталонные меры малой длины (эталонные сравнения), с помощью которых можно калибровать сканирующие зондовые и электронные растровые микроскопы, являющиеся основными инструментами исследования и оценки геометрических характеристик наноразмерных объектов. Вместе с тем существующие эталонная база и методы

в других видах измерений не отвечают измерительным потребностям нанотехнологий и производства наноматериалов, а также требованиям обеспечения безопасности их использования.

К основным проблемам системы обеспечения единства измерений в области нанотехнологий следует отнести:

- ▶ неотлаженность механизма формирования и актуализации измерительных потребностей, возникающих при разработке и освоении новых нанотехнологий и перспективных видов продукции nanoиндустрии;

- ▶ отсутствие четких и систематизированных требований к точности и динамическим диапазонам средств измерений в нанометрологии;

- ▶ отсутствие стандартных образцов состава и свойств наноматериалов, а также эталонных мер и тест-объектов для калибровки средств измерений, применяемых в области нанотехнологий;

- ▶ слабая оснащенность лабораторий и технологических участков предприятий и организаций, занятых в сфере нанотехнологий;

- ▶ недостаточное количество аттестованных методик измерений, а также методик поверки, калибровки и испытаний средств измерений.

Развитие системы измерений и эффективность ее функционирования в значительной мере зависят от того, насколько эффективно работает механизм постоянного изучения измерительных задач, а также анализа измерительных и калибровочных потребностей в сфере нанотехнологий.

Анализ современного состояния метрологического обеспечения нанотехнологий в нашей стране и за рубежом показывает, что для совершенствования системы обеспечения единства измерений формируемой в России nanoиндустрии необходимо решить следующие задачи:

- ▶ разработать методы и средства измерений параметров nanoобъектов, точность и номенклатура которых достаточна для обеспечения развития нанотехнологий и выпуска конкурентоспособной nanoпродукции;

- ▶ создать новые или модернизировать существующие эталоны путем значительного повышения точности характеристик воспро-

изведения и передачи единиц величин, используемых в области нанотехнологий;

- ▶ разработать методы аттестации стандартных образцов веществ и наноматериалов, а также эталонных мер и тест-объектов для калибровки средств измерений;

- ▶ разработать и аттестовать методики измерений, а также поверки, калибровки и испытаний средств измерений в области нанотехнологий;

- ▶ разработать комплекс нормативно-технических документов по обеспечению единства измерений и провести их гармонизацию с международными требованиями;

- ▶ обеспечить участие в международных сличениях эталонов России для нанотехнологий и nanoиндустрии, а также обеспечить международное признание измерительных и калибровочных возможностей российской nanoиндустрии;

- ▶ оснастить измерительные и аналитические лаборатории, функционирующие в области нанотехнологий, современным высокоточным измерительным оборудованием;

- ▶ создать систему метрологического обеспечения процессов оценки соответствия и безопасности использования нанотехнологий и продукции nanoиндустрии.

Развитие метрологии в области нанотехнологий включает три основных направления.

Первое – эталоны физических величин и эталонные установки, а также стандартные образцы состава, структуры и свойств для обеспечения передачи размера единиц физических величин в нанодиапазоне.

Второе направление – развития нанометрологии должно включать разработку концепции измерений наноструктурированных материалов. Сюда входят аттестованные или стандартизированные методики измерений физико-химических параметров и свойств объектов нанотехнологий, а также методики калибровки (поверки) самих средств измерений, применяемых в нанотехнологиях.

Третье направление развития нанометрологии – метрологическое сопровождение самих технологических процессов производства материалов, структур, объектов и иной продукции nanoиндустрии.

Метрологическое обеспечение производства продукции

Под метрологическим обеспечением понимается установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм для обеспечения единства и требуемой точности измерений.

Проблема обеспечения высокого качества продукции находится в прямой зависимости от уровня метрологического обеспечения производства. Это в значительной мере – проблема умения правильно измерять параметры качества материалов и комплектующих изделий, поддерживать заданные технологические режимы, т.е. измерять множество параметров технологических процессов.

Измерительная информация служит основой для принятия решений о качестве продукции, при внедрении систем качества и только достоверность и соответствующая точность результатов измерений обеспечивает правильность принимаемых решений на всех уровнях управления. Получение недостоверной информации приводит к неверным решениям, снижению качества продукции, возможным авариям.

Объективность и достоверность измерительной информации о состоянии производства и качестве исследуемого объекта

возможны лишь при наличии, во-первых, обоснованных количественных требований к показателям техпроцесса и качеству изделия и, во-вторых, достоверности оценки реализации этих требований. Если этого нет, говорить о возможности получения объективной измерительной информации не представляется возможным.

Метрологическое обеспечение является комплексным понятием и имеет множество составляющих, таких как разработка и производство средств измерений, метрологическая экспертиза за технической документацией, поверка и калибровка средств измерений, разработка и аттестация методик измерений, аттестация испытательного оборудования, анализ состояния метрологического обеспечения (рис. 1).

На разных этапах жизненного цикла продукции метрологическое обеспечение реализуется посредством разного набора составляющих процессов.

На этапе проектирования – метрологическая экспертиза конструкторской документации.

На этапе производства – поверка, калибровка средств измерений, разработка и производство средств измерений, метрологическая экспертиза технологической документации.



Рис. 1. Структура метрологического обеспечения производства

Этап испытаний – аттестация испытательного оборудования, метрологическая экспертиза программ и методик первичной и периодической аттестации.

Поверка и калибровка средств измерений – процессы, устанавливающие пригодность к использованию средств измерений. На основе экспериментов определяются действительные метрологические характеристики средств измерений. На основе сравнения действительных метрологических характеристик, требуемых потребителем или нормативной документацией, определяется пригодность средств измерений.

Основной целью аттестации испытательного оборудования является подтверждение возможности воспроизведения условий испытаний в пределах допустимых отклонений и установление пригодности использования данного оборудования в соответствии с его назначением.

Методики (методы) измерений разрабатываются и аттестуются, как правило, для вновь разрабатываемых средств измерений или для проведения сложных комплексных измерений. Методика (метод) измерений представляет собой установленную совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с гарантированной точностью в соответствии с принятым методом. Можно говорить, что методика измерений является технологией процесса измерения.

Измерительные потребности и возможности обеспечения нанотехнологий

Под измерительными потребностями понимается совокупность средств и методов измерений, обеспечивающих получение достоверных и признаваемых значений необходимых параметров и характеристик продукции на всех этапах жизненного цикла.

Если проследить уровень измерительных потребностей по всему жизненному циклу продукции, то мы видим, что максимум потребностей падает на этап исследований (рис. 2).

Измерениям подлежат свойства, размеры, структура, состав исследуемого объекта. При этом требуется очень высокая точность и как можно больше измеренных параметров.

Немаловажно на этапе исследований строго соблюдать условия окружающей среды, чтобы не исказить результаты измерений.

Как видно из графика, измерительные возможности весьма далеки от измерительных потребностей. Причина такого разрыва двоякая: с одной стороны, исследователи не заказывают метрологам сверхточных приборов. С другой стороны, не все исследователи умеют работать на метрологическом оборудовании. Они нуждаются в четких методиках измерений.

На этапе промышленного производства продукции наибольший объем метрологических работ приходится на стадию передачи продукции от производства к рынку (рис. 3).

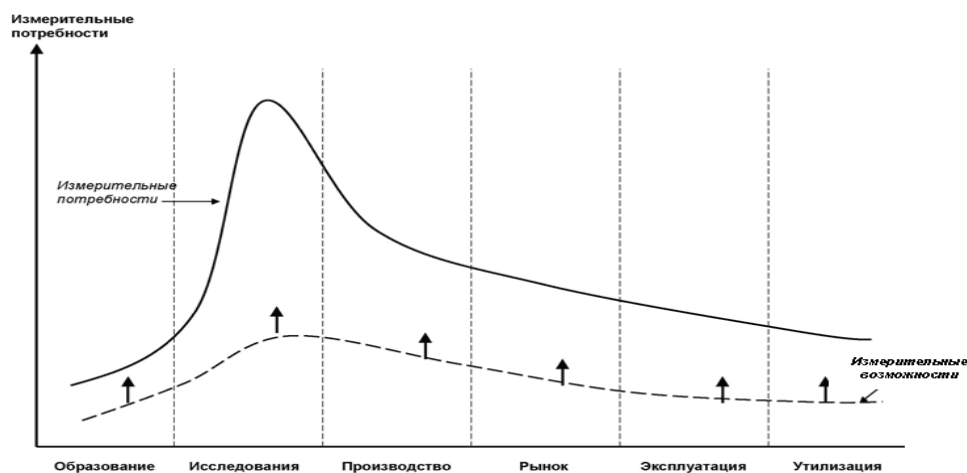


Рис. 2. Измерительные потребности при исследованиях

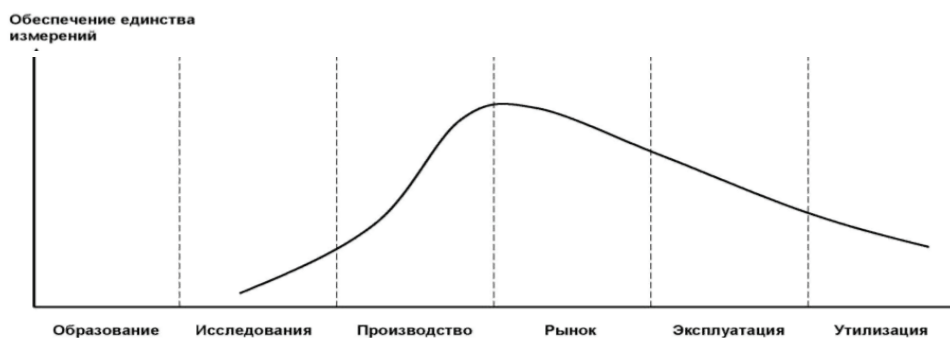


Рис. 3. Измерительные потребности при производстве

Требования, которые предъявляются к измерениям в nanoиндустрии, имеют свои особенности. Основные из них следующие:

- ▶ высокая эффективность измерительных систем;
- ▶ измерение необходимых количественных параметров должны быть измерены в полном объеме;
- ▶ минимально приемлемое количество измеренных параметров;
- ▶ минимальные время и стоимость;
- ▶ проведение измерений в условиях производственного процесса, в том числе и при неблагоприятных условиях, а также при воздействии вибрации, в определенной степени – при загрязненном воздухе и т. д.

Россия из-за длительного и глубокого кризиса 1990-х годов в экономике и научно-технологическом комплексе вступила в мировую гонку в области метрологического обеспечения нанотехнологий с некоторым опозданием.

Одним из главных признаков отставания является отсутствие метрологического обеспечения измерений при разработке и промышленном освоении нанотехнологий и производстве наноматериалов, старение, а по отдельным направлениям развития нанотехнологий – практически отсутствие научного и специального оборудования, приборов и устройств, отвечающих современным мировым требованиям, а также отставание в развитии других составляющих инфраструктуры nanoиндустрии.

При этом нельзя не отметить определенные достижения – в России организовано промышленное производство целой линейки таких нанотехнологических средств измерения, как сканирующие зондовые микроскопы

(конкурентных на мировом уровне), а также стандартных образцов – эталонных мер топологии поверхности прецизионной точности (единиц – долей нанометра). Появились аттестованные методики измерений, национальные стандарты поверки и калибровки нанотехнологических средств измерения.

Новые возможности продукции nanoиндустрии и свойства материалов, создаваемых в результате применения нанотехнологий, предъявляют особые требования к применяемым средствам измерений и их метрологическому обеспечению. Эти средства измерений должны обладать новыми функциональными возможностями, расширенными диапазонами измерений и повышенной точностью (например, точность измерения длины должна возрасти в 10–15 раз), что ужесточает требования к уровню обеспечения единства измерений в стране.

Прежде всего, это относится к точности, диапазонам измерений и функциональным возможностям первичных эталонов и обуславливает необходимость их совершенствования, а также, возможно, и создания новых исходных эталонов. Решение проблем метрологического обеспечения нанотехнологий не ограничивается совершенствованием эталонов, потребуется модернизация существующего и создание более современного, отвечающего новым задачам поверочного оборудования, а также разработка нормативных документов на методы и средства поверки средств измерений, применяемых в nanoиндустрии и других областях использования нанотехнологий, на методики выполнения измерений в связи с развитием нанотехнологий.

Не менее сложна проблема воспроизводимости измерений. Речь идет даже не о тех измерениях, которые сопровождаются разрушением или повреждением измеряемого объекта. В частности, после извлечения объекта из предметного столика позиционера СЗМ или физического перемещения СЗМ по объекту (для соответствующих моделей СЗМ) вернуться в ту же точку для проведения повторных измерений практически невозможно. Ошибка физического позиционирования значительно превышает величину поля, одновременно контролируемого СЗМ.

В последние годы в связи с осознанием стратегических и экономических преимуществ использования нанотехнологий в промышленности в наиболее развитых странах, наряду с программами развития нанотехнологий, выполняются программы работ по метрологическому обеспечению измерений в этой отрасли.

Под метрологическим обеспечением понимается установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм для обеспечения единства и требуемой точности измерений.

Так, например, в Национальном бюро стандартов и технологий NIST (США) осуществляется проект под названием «Нанометрическая программа по материаловедению».

В рамках этой программы проводятся исследования по разработке измерительных технологий, проводятся сличения, осуществляется стандартизация и тестируются методы калибровки. Для обеспечения особых условий окружающей среды на территории NIST в Гейтерсберге завершено строительство специальной модернизированной измерительной лаборатории.

В РТВ (Германия) проблемы нанометрологии возложены на отделение точного машиностроения. Ведутся работы по разработке сканирующих количественных микроскопических датчиков, необходимых для решения размерных и иных измерительных задач с неопределенностями до субнанометрических значений.

В Национальной физической лаборатории NPL (Великобритания) проблемами нанометрологии занимается отделение размерной и оптической метрологии. Для обес-

печения высокоточной калибровки датчиков перемещения в субнанометровом диапазоне в NPL разработан комбинированный оптико-рентгеновский интерферометр.

Национальное Бюро метрологии и Национальная испытательная лаборатория Франции ведут разработку эталонного средства измерений, способного измерять длины трехмерных объектов с нанометровыми неопределенностями. Реализация этого проекта позволит в ближайшие годы удовлетворить имеющиеся потребности в метрологическом обеспечении нанотехнологий.

Предполагается, что в XXI в. область нанотехнологий станет ведущим направлением деятельности различных секторов промышленности: наноэлектроники, наноинженерии, наноматериалов, нанобиотехнологий, нанотехнологий для систем безопасности. Создание и производство всех видов продукции наноиндустрии невозможно без разветвленной и всеохватывающей системы обеспечения единства измерений России (рис. 4).

Пути развития национальной системы измерений и эффективность её функционирования будут зависеть от того, насколько эффективно будет работать механизм постоянного изучения измерительных задач, а также анализа измерительных потребностей в сфере нанотехнологий, сопоставления их с имеющимися измерительными возможностями, выработки обоснованных требований к эталонной базе, системе эталонных мер и стандартных образцов и разработки новых методов измерений, испытаний, поверки и калибровки средств измерений.

Следует отметить, что наблюдается отставание измерительных возможностей метрологии от постоянно возрастающих потребностей современных технологий, что отрицательно влияет на реализацию технологических инноваций во многих производственных секторах экономики.

Измерительные возможности характеризуются оценкой точности измерений, гарантируемой потребителям метрологических услуг, т.е. качество предоставляемых услуг.

Актуальность опережающего развития измерительных возможностей в связи с интенсивным внедрением новых наукоемких технологий подтверждает доклад

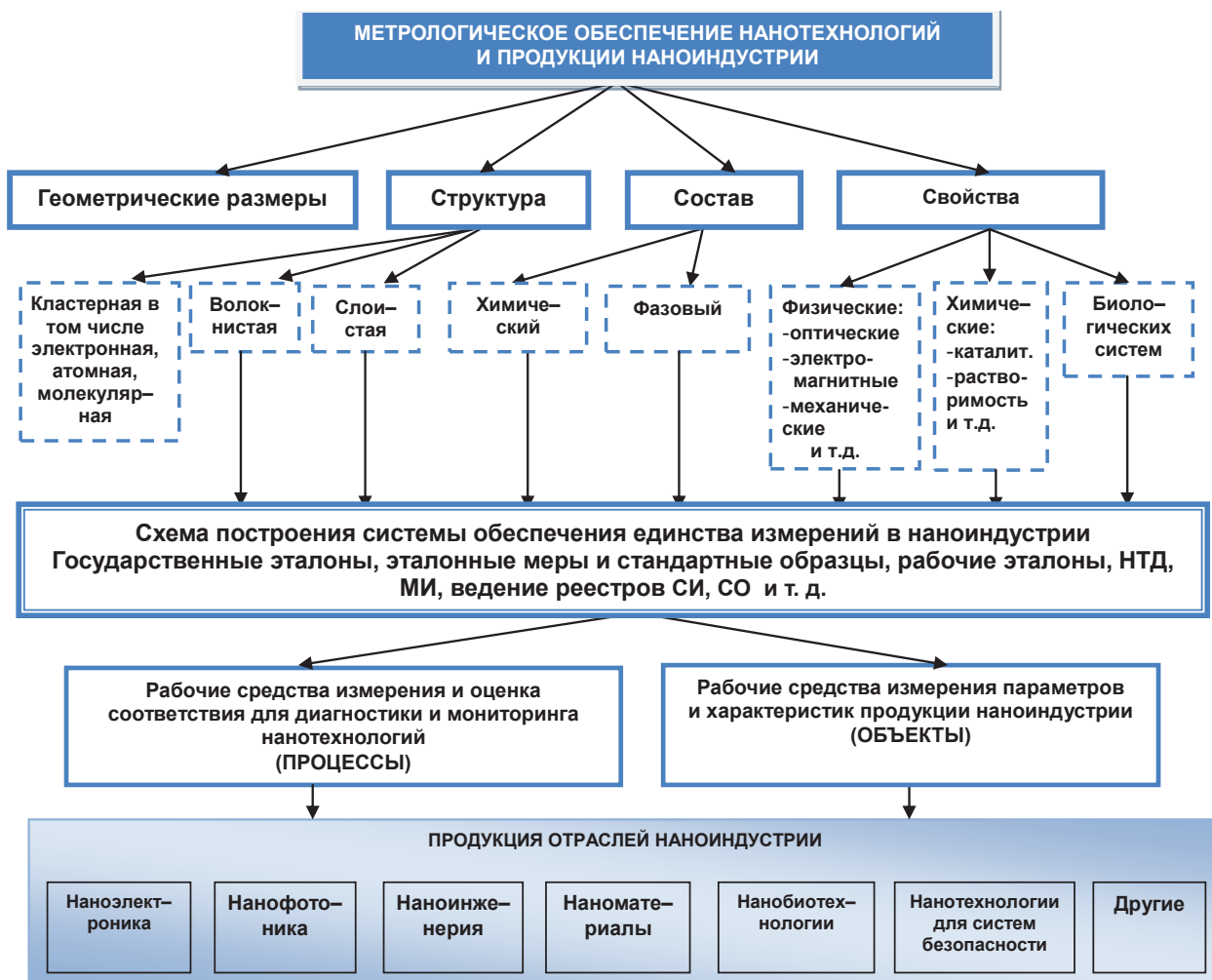


Рис. 4. Система обеспечения единства измерений в сфере нанотехнологий

Национального института стандартов и технологий США (NIST), 2007 г., содержащий оценку системы измерений США и оценки преграды, сдерживающих ускорение разработок и внедрение новых технологий, повышение конкурентоспособности продукции на мировом рынке.

По результатам оценки были сделаны следующие выводы:

- ▶ основным препятствием на пути инноваций практически во всех сферах экономики, медицины, здравоохранения, обороны, экологии в США является недостаточная точность различных методов и средств измерений;

- ▶ практически во всех новых технологиях сдерживающим фактором их развития служит отсутствие точных и чувствительных датчиков различных величин, необходимых для реализации мониторинга процессов и создания систем управления не только новыми

технологическими процессами, но и условиями окружающей среды;

- ▶ отсутствие эталонов для оценки качества создаваемых технологий, включая недостаточные совместимость и взаимодействие программного и аппаратного обеспечения устройств управления разрабатываемых технических средств, также служит барьером для инноваций во многих развивающихся технологиях.

Сделанные NIST выводы о состоянии и потребности системы измерений в значительной степени справедливы и для европейских стран и России.

Это особенно важно, т. к. сегодня развитие метрологии проходит под знаком формирования глобальной системы измерений, основным принципом которой является «доверие к результатам измерений – через их прослеживаемость к государственным первичным эталонам».

Под эгидой Международного бюро мер и весов (МБМВ) в г. Париже 14 октября 1999 г. была подписана Договоренность «Взаимное признание национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами (НМИ)». Свыше 68 стран являются участниками этого документа, в том числе и Россия.

Указанная Договоренность обеспечивает признание российских государственных эталонов на международном уровне, что открывает дорогу признанию мировым сообществом результатов испытаний и измерений, привязанных к этим эталонам, в т.ч. в рамках Всемирной торговой организации (ВТО).

Развитие стандартизации и нормативно-методического обеспечения в сфере нанотехнологий, наноматериалов и продукции наноиндустрии

Стандартизация выполняет значительное число полезных функций. Она содействует достижению совместимости продукции или систем, способствует повышению качества, оптимизирует номенклатуру выпускаемой продукции и в общем виде содействует распространению новых технологий. В России ведутся работы по стандартизации в области нанотехнологий, однако интенсивность ее пока еще отстает от интенсивности стандартизации стран с наиболее активно развивающейся наноиндустрией.

Междисциплинарный характер нанотехнологий, различная терминология и различные исследовательские, технологические и измерительные подходы и методы, используемые в различных отраслях различными научными центрами и лабораториями, привели к разобщенности, затрудняющей осуществление успешного информационного обмена. Учитывая нынешнее состояние и степень развития нанотехнологий и производства нанопродукции, становится очевидной важность стандартизации, без развития которой выход нанопродукции на рынок будет закрыт.

В настоящее время обозначились следующие основные проблемы стандартизации в области нанотехнологий:

- ▶ отсутствие единой терминологии;

- ▶ отсутствие системной классификации нанотехнологий, наноматериалов и продукции на их основе, а также технических требований к ним;

- ▶ разобщенность исследователей и разработчиков нанотехнологий, и как следствие – отсутствие единых подходов к стандартизации, в частности к терминологии;

- ▶ отсутствие заинтересованности промышленности и представителей бизнес-сообщества в разработке стандартов в сфере нанотехнологий.

Стандартизация в сфере нанотехнологий и безопасности использования продукции наноиндустрии должна осуществляться с учетом «Концепции развития национальной системы стандартизации», одобренной распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 февраля 2006 г. № 266-р.

Для успешного развития нанотехнологий в Российской Федерации и выпуска конкурентоспособной нанопродукции в области стандартизации необходимо активизировать разработку национальных стандартов на нанопродукцию, а также национальных стандартов по общим вопросам метрологического обеспечения наноиндустрии.

По мнению экспертов, вопросы оценки безопасности в сфере нанотехнологий заслуживают отдельного рассмотрения. При этом создаваемая система должна предусматривать нормативно-методическое, инструментальное и метрологическое обеспечение оценки безопасности использования продукции наноиндустрии, а также контроль окружающей среды и процедуру аттестации предприятий и объектов наноиндустрии на соответствие требованиям.

Важность построения на современном этапе системы оценки безопасности использования наноматериалов понимают во всех странах, активно развивающих нанотехнологии. В частности, среди разрабатываемых в США стандартов около 40% посвящены вопросам безопасности, а около 23% – вопросам метрологии. В Японии доля финансирования работ, связанных с метрологией, составляет 18%, а доля финансирования работ, которые обладают большим риском отрицательного воздействия на здоровье и окружающую среду, составляет более 30%.

Начиная с 2005 г., работы по международной стандартизации нанотехнологий проводятся ТК ИСО 229 «Нанотехнологии», секретариат которого ведет Британский институт стандартов, и ТК МЭК 113 «Стандартизация нанотехнологии для электрических и электронных изделий и систем», ведение секретариата которого осуществляет Немецкий институт стандартов (рис. 5).

ТК ИСО 229 состоит из консультативной группы и трех рабочих групп (РГ): «Терминология и номенклатура», «Измерения и характеристики» и «Медицинские, экологические аспекты и безопасность нанотехнологии». В состав активных членов входят 29 стран, включая Российскую Федерацию, 10 стран являются наблюдателями на заседаниях ТК.



Рис. 5 Взаимодействие ИСО ТК 229 и МЭК ТК 113



Рис. 6. Структура Технического комитета ТК 441

Координация профильных ТК по стандартизации в нанотехнологии

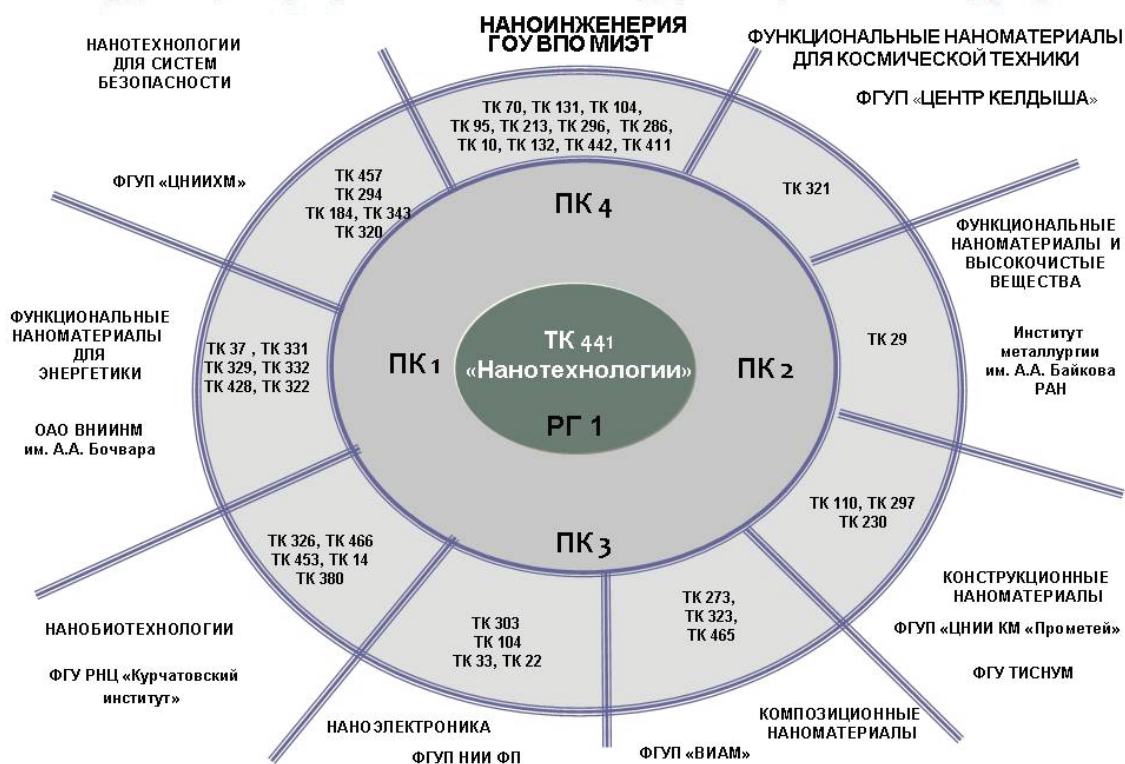


Рис. 7. Взаимодействие ТК 441 с профильными комитетами

ТК МЭК 113 состоит из двух объединенных с ТК ИСО 229 рабочих групп «Терминология и номенклатура», «Измерения и характеристики» и РГ 3 «Характеристики наноматериалов для электротехнических компонентов и систем».

ТК включает 15 стран – активных членов, включая Россию, и 13 стран-наблюдателей, являющихся членами МЭК. ТК МЭК 113 взаимодействует с ТК ИСО 229.

В России в 2005 г. также создан Технический комитет по стандартизации в области нанотехнологий ТК441 «Нанотехнологии».

Структура и состав Комитета показана на рис.6.

В России в последние годы активизировались системные скоординированные работы по организации научных исследований оценки влияния нанотехнологии и различных наноматериалов на здоровье людей и экологическую среду, а также разработки санитарно-гигиенических требований и соответствующей нормативно-методической базы. Поэтому сегодня актуальной задачей является формирование

инфраструктуры обеспечения безопасности, основу которой должны составлять системы производственного, санитарно-гигиенического, экологического контроля и мониторинга, опирающиеся на различные виды измерений, обеспечивающих оперативный и достоверный контроль состояния и динамику изменения загрязненности производственной и окружающей среды на объектах нанотехнологии.

В процессе своей деятельности по разработке научно-технической документации ТК 441 взаимодействует со многими профильными комитетами (рис.7).

В заключении следует отметить, окончательное формирование Российской системы стандартизации, обеспечения единства измерений, оценки соответствия и безопасности конкурентоспособных нанотехнологий, наноматериалов и продукции нанотехнологии реально завершить в период до 2015 г. с учетом реализации «Программы развития нанотехнологии в Российской Федерации до 2015 года».

© А. И. Рагулин

© Т. М. Козлякова