

## Аспекты зарубежных реализаций тепло-энергетических возможностей мирного атома

Говорится об основной причине глобального потепления — выбросах парниковых газов и загрязняющих веществ от тепловых электростанций и тепловых машин промышленного и транспортного оборудования. Решение проблемы связано с переходом с карбонового ископаемого топлива на экологически чистые альтернативные возобновляемые источники. Приводятся примеры аспектов прикладных технологий, измерений и обеспечения безопасности. УДК статьи 621.039

# В

**В.А. Грушников<sup>1</sup>**

ВИНИТИ РАН,  
канд. техн. наук,  
viniti@mach04.ru

В последнее время страны пересматривают природоохранную повестку в плане замещения ископаемых видов топлива «зелеными», экологически чистыми возобновляемыми источниками, в первую очередь ветровыми и солнечными. Причина этому — безветрие и облачность, когда ветрогенераторы останавливаются и не функционируют фотовольтные солнечные батареи генерирования электроэнергии. При таких природных условиях эксплуатации не помогут ни огромные ветровые энергопарки в шельфовых зонах Атлантики, Северного и Балтийского морей, на которые сделали ставку страны Северной Европы, ни огромные площади с солнечно-элементными генераторами в пустынных районах Мексики, США и других стран. В связи с этим экологическая стратегия не только возвращает в промышленно-топливную тематику жидкие и газообразные углеводороды, но и наиболее неэкологичные или «грязные» — уголь.

В этих условиях возрастает роль ядерной энергетики, которая, даже после Чернобыльской и Фукусимской катастроф, напугавших все человечество, а Германию заставивших и вовсе отказаться от этого вида энергетики, при соблюдении надлежащих, достаточно эффективных мер безопасности является востребованной и энергоэффективной. Справедливость этого утверждения наглядно демонстрируют успешные реализации в области общих и прикладных технологий, измерений и безопасности процессов Объединенного института ядерных исследований, Объединенного института высоких температур РАН и других российских исследователей и разработчиков, а также зарубежные инициа-

тивы в сфере научной и практической деятельности.

Среди последних — синхротрон, Большой электронно-позитронный коллайдер и Большой андронный коллайдер — самый крупный и мощный в мире ускоритель простейших частиц Европейской организации по ядерным исследованиям ЦЕРН в Швейцарии, а также первый в мире экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР под французским Марселем. В этом рукотворном Солнце используется физический принцип технологии токамак — Тороидальной КАмеры с МАгнитными КАтушками, которая в непереводимой кальке с русского стала общепринятым сокращением.

Компрессорные станции, работающие на природном газе, обладают значительным потенциалом для утилизации отработанного тепла. Сотрудниками лаборатории исследования энергии, окружающей среды и биологических систем отдела теплотехники и энергетических систем факультета технологии и инженерии департамента машиностроения Университета иранского Кума предложен новый четырехтактный комбинированный цикл на базе турбокомпрессорной газозаправочной станции [1]. Так, заправочная станция в Куме включает три газовые турбины номинальной мощностью 25 МВт, каждая из которых обеспечивает потребность в мощности для компрессорной станции. Паровые и органические циклы Ренкина применялись на этой АЭС для рекуперации отработанного тепла и выработки большего количества энергии с использованием турбин реализации кинетической энергии отработанных газов. Исследовано семь органических жидкостей, которые можно применять

<sup>1</sup> старший научный сотрудник, Москва, Россия

**Для цитирования:** Грушников В.А. Аспекты зарубежных реализаций теплоэнергетических возможностей мирного атома // Компетентность / Competency (Russia). — 2023. — № 4. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-4-46-55

### ключевые слова

тепловая энергетика, глобальное потепление, ядерная энергетика, технологии, измерения, безопасность

в термодинамическом органическом цикле Ренкина. Энергетический, эксергетический, эксэргоекономический, эксэргоекологический, аварийно-экономический и аварийно-экологический (6Э) анализы позволили лучше понять систему с разных точек зрения. В связи с этим в среде программно-вычислительного пакета MATLAB был разработан компьютерный код для анализа возможностей составных 6Э.

Проверка термодинамического моделирования разработанного кода была проведена с высокой точностью, в сравнении с программой THERMOFLEX и эталонными данными. Также был проведен анализ чувствительности по основным параметрам. Расширенный анализ на основе эксергии, связанный с эндогенными/экзогенными и предотвратимыми/неизбежными частями, был выполнен для глубокого исследования каждого компонента. Результаты проведенных экспериментов показали увеличение теплового КПД интегрированного цикла примерно на 16 % по сравнению с газовыми турбинами. Камера сгорания имеет наибольшую скорость эксергетического разрушения, а пароперегреватель и экономайзер турбины — наименьший эксергетический КПД. Трифтортрихлорэтановый хладагент/теплоноситель с торговой маркой R113 был выбран как лучшая органическая жидкость с термодинамической точки зрения, а фреон R141b — с экономической и экологической. Также был проведен анализ чувствительности по основным параметрам. Расширенный анализ на основе эксергии, связанный с эндогенными/экзогенными и предотвратимыми/неизбежными частями, был выполнен для глубокого изучения каждого компонента.

Повышение эффективности и безопасности реализации этих технологий обеспечивается результатами достоверных измерений контролируемых параметров. Международная эталонная система для чистых радионуклидов, излучающих бета-частицы: оценка неопределенностей измерений среди этих инструментов является действен-

ной мерой осуществления процедурных мероприятий.

В 2019 г. участники проекта «Расширенная международная эталонная система» (ESIR) разработали жидкостную сцинтилляционную систему, которая способна выдавать очень стабильные эталонные значения в течение длительного периода времени, используя метод, основанный на аппаратной технике «отношения тройного к двойному совпадению» (TDCR). Принятый метод основан на руководстве по выражению неопределенности в измерениях, опубликованном Объединенным комитетом руководств по метрологии. Особое внимание уделялось выбору метода оценки: отклик прибора TDCR не может быть линеаризован, поэтому был реализован метод Монте-Карло и разработан метод управления коррелированными входными данными. Для входного многомерного распределения совпадающих скоростей счета использовалась новая методика выборки; этот подход также может иметь отношение к первичным стандартам, реализованным с использованием метода TDCR. Расчет показал, что стандартная неопределенность порядка 0,1 % будет достижима для типичного радионуклида.

В Государственной ключевой лаборатории моделирования и воздействия интенсивного импульсного излучения Северо-Западного института ядерных технологий китайского Сианя разработан метод анализа пространственно-временного распределения интенсивности импульсных пучков, таких как фотоны, электроны и другие частицы, с помощью полностью оптического датчика изображения (рис. 1) [3]. Дат-



**Рис. 1.** Установка регистрации фотонов и электронов  
[Installation of photon and electron registration]

**справка**

**Международное бюро мер и весов (BIPM)** — это центр, в котором правительства могут действовать сообща по вопросам, связанным с метрологией, координируя всемирную систему измерений и предоставляя возможности для международных сравнений измерений на основе общих затрат. Его отдел ионизирующего излучения поддерживает и разрабатывает высокоточное оборудование, позволяющее национальным метрологическим институтам демонстрировать эквивалентность первичных эталонов радиоактивности. Объем этой услуги расширяется в рамках проекта «Расширенная международная эталонная система» (ESIR), направленного на создание стабильного прибора, способного сравнивать эталоны чистых бета-излучающих радионуклидов, в дополнение к существующим приборам для гамма-излучателей

чик изображения измеряет интенсивность фотонов или частиц, исследуя индуцированное изменение показателя преломления из-за их возбуждения в полупроводнике. Для проверки этой схемы было смоделировано взаимодействие электронного луча с датчиком изображения, как свидетельство, что в полупроводнике можно создать решетку нестационарной фазы. Решетку переходной фазы можно исследовать с помощью лазера, чтобы оценить пространственно-временное распределение интенсивности падающих электронов. Кроме того, датчик изображения на основе InP был создан для анализа импульсных лазерных лучей. Метод накачки-зондирования использовался для записи изображений с различными задержками между анализируемым и зондирующим лазерами и был разработан дифференциальный метод для улучшения временного разрешения, чтобы оно было меньше, чем время действия зондирующих лазеров. Получены последовательные изображения, представляющие пространственно-временное распределение анализируемых лазерных лучей с временным разрешением в несколько сотен пикосекунд, что указывает на способность этой схемы анализировать пространственно-временное распределение импульсных лазерных лучей и открывает путь для перспективных приложений в характеристике импульсных пучков частиц.

Повышению технологичности и достоверности прикладных измерений в немалой степени способствуют достижения в области измерений и контрольно-измерительных приборов с использованием встроенных систем, которые часто ассоциируются с компьютеризацией с акцентом на программном обеспечении и программировании систем. Однако прогресс, достигнутый в аппаратной части, нельзя игнорировать, и без технологических достижений встроенные системы не существовали бы. На самом деле прогресс в области микроэлектроники приводит к постоянной эволюции разнообразных цифровых платформ,

которые постепенно становятся проще в программировании и настройке, тем самым сокращая этап разработки и прототипирования и оказывая влияние на различные области исследований и приложений.

С прицелом на эти ориентиры сотрудниками департамента электроники и информатики в биоинженерии Политехнического университета и Национального института ядерной физики итальянского Милана в рамках углубленного анализа современного состояния и перспектив развития этой специальной области деятельности проведено целенаправленное исследование роли и влияния электроники, электронных измерений и контрольно-измерительных приборов на адекватность, точность и воспроизводимость регистрируемых результатов контроля [4]. В настоящее время обычные настольные инструменты не могут удовлетворить потребности многих современных приложений, требующих таких парадигм, как переносимость, малая задержка, распараллеливание, реконфигурируемость, работа в сети, совместимость с несколькими платформами, распределенная (пограничная) обработка и низкие затраты. Среди различных цифровых платформ микроконтроллеры и программируемые вентильные матрицы широко использовались в научных приборах на протяжении десятилетий, но теперь и они усовершенствованы по производительности.

Это позволило расширить возможности встроенных систем на основе микроконтроллеров и программируемых вентильных матриц в научном оборудовании по сравнению с традиционной парадигмой управления на основе постоянного интерфейса аппаратной части прибора с персональным компьютером. Такая система умеет обнаруживать частицы диаметром до 2 мкм, стабильна, эффективна и представляет прикладную ценность. Также появляется возможность контролировать токсичные летучие органические соединения по принципу электронного носа с набором резистивных сен-

соров с дивергентной селективностью и чувствительностью по разным газам. Блок управляется встроенной системой M5Stack Core2 ESP32 IoT с сенсорным экраном и может быть доработан за счет внедрения беспроводной передачи данных и вычислений для классификации данных. Заметны успехи систем на основе микроконтроллеров и программируемых вентиляционных матриц в технологии LiDAR (Light Imaging Detection And Ranging). В настоящее время технология LiDAR вызывает большой интерес, поскольку она широко используется в различных областях: на автомобильном транспорте, в сейсмологии, археологии, метрологии и военной сфере. Системы LiDAR становятся дешевле за счет широкого применения однопиксельной реализации с быстрым временем обработки и рабочими возможностями на нескольких длинах волн, которые можно адаптировать для приложений быстрого обнаружения и классификации, где достаточно обнаруживать сигналы с характерными характеристиками интенсивности без реконструкции изображения.

В ядерной физике эксперименты в атомной, молекулярной и оптической сферах проводятся с применением, как правило, комбинации большого количества коммерческих или изготовленных на заказ приборов из разных источников и производителей, которые должны работать синхронно и в повторяемом режиме. Синхронизация является важнейшим вопросом в таких экспериментах, технологично решаемым на основе стратегии контроля с использованием программируемой системы, которая сочетает в себе микроконтроллер и высокопроизводительный микропроцессор на одном кристалле. Это позволяет задействовать операционные системы, расширенные протоколы связи и интерпретаторы. Аппаратное обеспечение дает возможность реализовывать (рис. 2) 64 буферизованных цифровых выхода для управления другими аппаратными устройствами, а также четыре входных триггерных канала. Конструкция печатной платы обеспечивает целостность сигнала

и минимальные перекрестные помехи между каналами. В микропрограмме реализованы конечный автомат, написанный на SystemVerilog, и контроллер памяти, позволяющий выполнять большое количество инструкций (более 8 192 000).

Система используется для проведения всего эксперимента в лаборатории, предоставляя триггеры для цифроаналоговых преобразователей, цифровых синтезаторов прямого действия, механических затворов и многих других инструментов. Универсальность платформы также допускает другие модификации, например возможность добавления дополнительных инструкций в конечный автомат. Дальнейшие изменения в проекте могут включать протоколы сетевой безопасности и шифрование для передачи данных, которые до сих пор не были включены, поскольку установка выполняется в изолированной сети. Она представляет собой миниатюрную восьмиканальную электронную систему считывания для компактных детекторов гамма-излучения, сочетающую возможности спектроскопии высокого разрешения с позиционной чувствительностью. Компактность достигается за счет сочетания новой комплементарной металл-оксидной полупроводниковой технологической схемы, в том числе специализированной интегральной схемы ASIC для аналоговой обработки большого тока сигнала от твердотельных фотодетекторов кремниевого фотоумножителя с простым процессором, управляющим сбором данных, передачей и стабилизацией усиления. Принятие автоматической регулировки усиления в ка-



**Рис. 2.** Лидарная сканирующая измерительная технология [LiDAR scanning measuring technology]

**справка****В плане реализации возможностей мирного**

**атома** несомненный интерес представляют собой не только основные технологии изменения состава ядра — ядерная реакция или ядерное превращение с делением ядра и термоядерный синтез, но и прикладные, для решения практических задач. Кроме эффективных мероприятий по реализации процесса деления и синтеза ядра в реакторах АЭС, к ним относятся также поддерживающие процессы энергообеспечения промышленного и транспортного оборота

скаде стробированного интегратора обеспечивает динамический диапазон 84 дБ, сочетая однофотонную чувствительность с расширенным диапазоном энергий входных фотонов (от 20 кэВ до 4 МэВ) при использовании 30-микрорадиационной ячейки.

При помощи этого модуля с правильно объединенными 144 пикселями, соединенными со сцинтилляционным кристаллом бромида лантана толщиной 3 дюйма, в этой работе экспериментально продемонстрировано разрешение по энергии 3 % при 662 кэВ и пространственное разрешение 1 см при оценке координат взаимодействия. Эти результаты соответствуют современному уровню развития техники и превосходят другие недорогие реализации на основе микроконтроллеров. Помимо ядерной физики, такой универсальный прибор может найти широкое применение в сфере образования, окружающей среды и безопасности.

Сотрудниками Института ядерной физики имени Макса Планка (Гейдельберг, Германия) и факультета физики Университета науки и технологии (Ролла, штат Миссури, США) сообщается о реализации далеко не резонансной оптической дипольной силовой ловушки в реакционном микроскопе в сочетании с магнитооптической ловушкой [5]. Кинематически полные эксперименты по многофотонной ионизации были выполнены на оптически захваченных атомах изотопа  ${}^6\text{Li}$  и фотоассоциированных молекулах  ${}^6\text{Li}_2$  в их наивысшем колебательном состоянии. Аппаратное оснащение экспериментов позволяет различать механизмы ионизации, связанные с наличием ИК-поля оптической дипольной ловушки, которые могут возникать при ионизации  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^6\text{Li}_2$  в сильных полях. В серии экспериментов обнаружены слабосвязанные димеры с помощью трехфотонной ионизации фемтосекундными импульсами ( $\tau = 30$  фс) на центральной длине волны 780 нм и измерены непосредственно импульсы фотоэлектронов в совпадении с ионами отдачи.

Лазер магнитооптических ловушек (МОЛ) оставался стабилизированным

по частоте с помощью схемы блокировки смещения биений по отношению к эталонному лазеру. Этот лазер привязан к переходу охлаждения  ${}^6\text{Li}$  с помощью бездоплеровской абсорбционной спектроскопии в испарительной ячейке. МОЛ загружается путем замедления горячих атомов, испускаемых из печи при температуре около 700 °К (426,85 °С), с помощью зеemanовского замедлителя. При «нагрузочной настройке» с естественной частотной шириной охлаждающего перехода в 6 МГц лазерных пучков захвата равновесное число атомов  ${}^6\text{Li}$  около  $7 \times 10^7$  захватывается при температуре около 1 мК. Непрерывный лазер, используемый для дипольной ловушки, представляет собой иттербиевый волоконный лазер серии IPG YLR с центральной длиной волны  $1070 \pm 10$  нм и максимальной выходной мощностью 200 Вт.

Оптическая дипольная ловушка реализована в виде однократно сфокусированного ИК-луча с расчетным диаметром фокуса около 100 м. Глубина ловушки пропорциональна интенсивности света в фокусе и при максимальной доступной мощности составляет примерно 1,8 мК. Мощность лазера в сфокусированном луче можно независимо контролировать либо с помощью аналогового управляющего напряжения для лазера IPG, либо с помощью акустооптического модулятора. После перехода из МОЛ в дипольную ловушку захватывается около  $6 \times 10^5$  атомов, то есть эффективность переноса составляет около 0,9 %, которая в других группах, работающих с  ${}^6\text{Li}$ , колеблется от 0,4 % до 20 %, но обычно составляет около 1 %. Для большинства применений захваченных атомов желательно оптимизировать эффективность переноса. Следовательно, как глубина ловушки, так и фазовая плотность атомов в МОЛ во время переноса должны быть максимальными.

Сотрудниками Центра передовых технологий Раджи Раманни Индаура и Национального института Хоми Бхабха Мумбаи (оба — Индия) представлены новые результаты по использованию датчика температуры

на волоконной брэгговской решетке в условиях высокой радиации и опасных химических веществ установки по переработке ядерного топлива [6]. Датчик разработан с использованием термически регенерированной решетки, полученной в результате термического отжига затравочной решетки типа I, вписанной в телекоммуникационное волокно. Исследования ресурса и средней чувствительности регенерированной решетки проводились до 900 °С. Для оставшейся отражательной способности около 5 % при 900 °С прогнозируемый срок службы решетки составлял около 4 лет. Радиационная стойкость корпусированного датчика ВБР была испытана в условиях высокой радиации до 1 МГр. Брэгговский сдвиг длины волны около 35 нм наблюдался после накопленной дозы гамма-излучения 1 МГр. Разработанный и охарактеризованный датчик на волоконной брэгговской решетке был успешно применен для мониторинга температуры камеры рециркуляции ядерного топлива. Надежное и точное измерение температуры позволило точно контролировать процесс и избежать проливания раствора азотнокислого урана, плутония в технологическую камеру с микроволновым нагревом.

### Эксперименты при высоких температурах

**Э**ксперименты при высоких температурах и высокой плотности требуют одновременного понимания временной и спектральной областей. Спектральная рентгеновская камера — новая система спектральной рентгеновской диагностики с высоким временным разрешением, которая позволяет исследователям различать мягкие и жесткие рентгеновские области. Диагностика предлагает три спектральных канала с широким спектральным диапазоном, один прямой канал, который включает фильтр, и два косвенных канала, которые включают как зеркала, так и фильтры. В экспериментальной реализации израильских специалистов в области прикладных

измерений из отдела физики плазмы Ядерного исследовательского центра «Нахаль Сорек» инновационная оптико-механическая конструкция позиционирует отфильтрованное излучение в трех разных местах вдоль щели штрих-фотокаатода, чтобы обеспечить зависящие от времени спектральные каналы с пикосекундным временным разрешением [7].

Среднее пространственное разрешение в 150...700 мкм достигается с помощью щелей, перпендикулярных щели штрих-фотокаатода, а ширина щели каждого канала оптимизируется в соответствии с длиной волны центрального канала. Система диагностики охватывает спектральный диапазон 30...500 эВ для зеркальных каналов и более 1300 эВ для прямого канала. Временная и пространственная оси стрик-камеры откалиброваны относительно последовательности рентгеновских импульсов. Диагностическая система — спектральная рентгеновская камера испытана и проанализирована в экспериментах с использованием излучения волны Маршака из пены SiO<sub>2</sub>, нагретой лазерным лучом.

В качестве эффективного конструктивно-технологического инструмента исследований и прикладных разработок широко используется термостатическая камера для измерения температуры доплеровского уширения. С переопределением постоянной Больцмана и основной международной единицы измерения температуры — Кельвина международное соглашение о температурной шкале постепенно переносится на термодинамическую температурную шкалу. На основе доплеровского уширения спектра поглощения атома цезия можно измерить термодинамическую температуру ячейки с атомом цезия. Точность измерения температуры и проверка принципа эксперимента зависят от температурной стабильности абсорбционной ячейки. В этом исследовании, проведенном в Национальном институте метрологии Китая, спроектирована и реализована [8] термостатическая камера с системой точного контроля темпе-

### справка

В совместном исследовании ВІРМ, его французского отделения и Национального института метрологии Китая разработан и сформулирован инновационный модифицированный подход [2], который будет использоваться для оценки неопределенностей в будущих сравнительных исследованиях с использованием проекта «Расширенная международная эталонная система» (ESIR)

**справка**

Впечатляют примеры приложений систем с микроконтроллерами и программируемыми вентильными матрицами в оптоэлектронике, физических экспериментах и измерениях импеданса, вибрации и температуры, демонстрирующие потенциал рассматриваемых инновационных технологий. Они оказались весьма эффективными, в частности в приборах контроля наличия частиц тяжелых металлов в воздухе, особенно на основе использования явления магнетизма с применением микроконтроллеров серии STM32F103, которые обладают преимуществами высокой производительности, низкого энергопотребления и высокой расширяемости, а также способны осуществлять бесконтактное удобное, эффективное и точное измерение

ратуры. Она состоит из алюминиевой полости, опорного слоя, экранирующего слоя, теплоизоляционного слоя и медной колонны. Влияние размеров и параметров материала на эффект регулирования температуры проанализировано методом конечных элементов. На основании теоретического анализа оптимизирована конструкция камеры. В эксперименте использовалось водяное охлаждение для обеспечения базовой температуры полости.

Программа управления с отрицательной обратной связью была разработана для регулирования мощности нагрева электронагревательной пленки для достижения быстрого регулирования и стабилизации температуры. Максимальный перепад температуры медного столба внутри камеры постоянной температуры длиной 380 мм и диаметром 210 мм составлял менее 8 мК. Колебания температуры в течение 12 ч были менее 1 мК, температурная стабильность — менее 0,16 мК, а стандартная неопределенность температуры изгиба составила 11,02 мК.

Сдвиг частоты фазы распределенного резонатора является ведущим систематическим эффектом в стандартах частоты атомных фонтанов. Они возникают из-за фазовых вариаций поля в микроволновом резонаторе в сочетании с различным положением атомов в резонаторе при подъеме и опускании. Сотрудники Национальной физической лаборатории британского Теддингтона и физического факультета Пенсильванского государственного университета США продемонстрировали [9] реализации методов точного определения положения облака атомов в микроволновом резонаторе, используя либо приблизительно линейное изменение поперечных компонентов микроволнового поля, либо квадратичное изменение продольной амплитуды микроволнового поля в резонаторе. Показано, что смещение начального положения атомов дает значительно более высокую чувствительность около 50 мкм к вариациям частоты фазы распределенного резонатора, чем часто используемый градиент фонтанов в  $10^{-17}$  и тем

самым вносит незначительный вклад в оценку точности эталона. Эти методы вертикального выравнивания фонтана легко автоматизировать для рутинной работы, они требуют незначительной доли времени усреднения стандарта.

Как и в других измерениях, для первичной бета-дозиметрии важны достоверные поправочные коэффициенты, повышающие точность регистрации контролируемых параметров. Несколько поправочных коэффициентов для первичной бета-дозиметрии в радиационной защите были определены с помощью измерений и моделирования как для хорошо известной экстраполяционной камеры первичного эталона Бема, разработанной и не первый год используемой [10] в Федеральном физико-техническом ведомстве Германии, так и для экстраполяции нового первичного эталона в виде там же разработанной камеры. С помощью последней были измерены поправочные коэффициенты  $k_{el}$  для электростатического притяжения входного окна вследствие собирающего напряжения и  $k_{sat}$  для ионизационных потерь для сбора из-за ионной рекомбинации. Следующие поправочные коэффициенты были определены моделированием для нормального ( $0^\circ$ ), а также наклонного ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $60^\circ$ ) падения излучения:  $k_{ba}$  для обратного рассеяния от собирающего электрода,  $k_{pe}$  для возмущения боковыми стенками камеры и  $k_{ra}$ ,  $k_{ac}$  и  $k_{di}$  для неоднородности внутри собирающего объема. Последние три были объединены в  $k_{ih}$ . Описаны еще шесть поправочных коэффициентов, взятых из литературы, для внесения необходимых поправок. Показано сравнение со значениями, указанными в ISO 6980-2:2004 (для  $0^\circ$ ), а также применение новых коэффициентов к измеренным данным. Вновь определенные поправочные коэффициенты готовы к внедрению в обновленную версию ISO 6980-2.

**Измерение гравитационной постоянной**

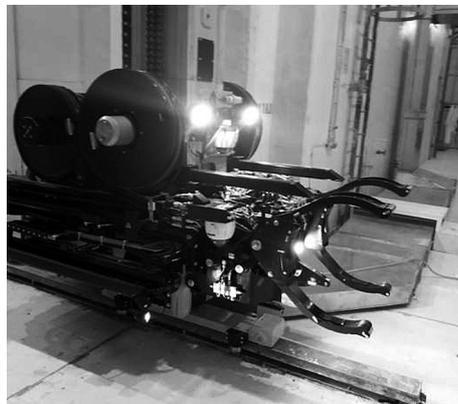
**Н**ьютоновская гравитационная постоянная  $G$  оказалась одной из самых сложных для изме-

рения констант в физике. Улучшенные измерения  $G$  методом атомной интерферометрии существенно ограничено точностью позиционирования атомных облаков и исходных масс, точностью измерения скорости атомов. Сотрудниками Ключевой лаборатории по измерению фундаментальных физических величин и Ключевой лаборатории гравитации и квантовой физики китайского Хубэя предложена идея проектирования исходных масс для определения  $G$  с помощью атомной интерферометрии [11], в которой строится почти однородное гравитационное поле в области движения атомных облаков. Эта конструкция может значительно уменьшить влияние неопределенности начального положения и скорости атома на точность измерения  $G$ , поскольку эти атомные начальные условия влияют на фазовый сдвиг интерферометра, связываясь с гравитационным градиентом. Представлена схема измерения  $G$  с относительной стандартной неопределенностью  $27 \text{ млн}^{-1}$ .

### Роботизированные сканеры: мониторинг и обслуживание

**В** то время как удаленная инспекция промышленных сооружений, например ядерных реакторов, с использованием роботизированных сканеров в настоящее время имеет значительные преимущества с точки зрения безопасности, точности и стоимости, возникают проблемы, связанные с плохой осведомленностью о контексте и точности позиционирования. Это приводит к отсутствию наглядности при планировании маршрута и затруднениям с точной локализацией данных контроля методами неразрушающей оценки. Лидары представляют собой одну из форм датчиков, которые оценивают расстояния под разными углами для картирования окружающей среды с использованием оптических методов. Существующие коммерческие лидары предлагают большой диапазон измерений, что позволяет отображать окрестности. Однако такие датчики имеют санти-

метровую точность и минимальную дальность сканирования, делающие их непригодными для компактных пространств и участков с высокой плотностью расположения соседних объектов. Для эффективного устранения этой проблемы сотрудниками Университета Стратклайда шотландского Глазго разработана [12] представленная в экспериментальных реализациях инновационная структура для использования специализированного 2D-лазерного сканера, инерциального измерительного блока и подхода к объединению данных для локализации внутри объемов с высокой плотностью, в первую очередь ядерных реакторов. Лазерный сканер обеспечивает измерения с точностью до 1 мм для объектов, расположенных на небольшом расстоянии, инерциальный измерительный блок вычисляет углы ориентации робота, которые имеют решающее значение для коррекции угла наклона. Помещения, а тем более сосуды, зачастую изготавливаются из металлических материалов с сильно отражающими поверхностями, что остается проблемным для лазерного сканера. Макет ядерного купола из реалистичного материала был использован для оценки производительности этой конструкции. Наблюдаемые ошибки расстояния и ориентации были ниже 2 мм и  $1^\circ$  соответственно. Фреймворк дополнительно обрабатывается для создания карты окружающей среды с близкого расстояния. Таким образом достигается высокая степень достоверности и точности ре-



**Рис. 3.** Сервисный робот — инспектор [Service robot inspector]

зультатов инспекционных проверок состояния ядерного реактора.

Робототехника в ядерной энергетике все больше используется в проведении сервисных операций мониторинга и обслуживания. Так, например, сотрудниками Нанкинского университета аэронавтики и астронавтики и Университета Макао (оба — Китай) разработана и предлагается [13] для практических реализаций новая мобильная платформа рельсового типа с пьезоэлектрическим приводом, которая имеет потенциальное применение в задачах проверки и обслуживания вакуумной камеры токамака, поскольку она обладает хорошей адаптацией к экстремальным условиям окружающей

среды: сильным магнитным полям, высокому вакууму и высокой температуре. Рельсовая передвижная платформа с пьезоэлектрическим приводом состоит из рельса и пьезоэлектрического привода на раме, работающего с двумя ортогональными изгибными колебаниями. Пьезоэлектрический привод в рамке перемещается по рельсу за счет трения. Создана полуаналитическая модель каркасного пьезоэлектрического привода с использованием метода матрицы переноса, чтобы выявить его динамическое поведение. Изготовлен и собран прототип предлагаемого рамного пьезоэлектрического привода, измерены его вибрационные характеристики для проверки возможности разработанной матричной модели переноса. Кроме того, экспериментально исследованы механические выходные характеристики прототипа мобильной платформы рельсового типа и установлено, что максимальная скорость прототипа мобильной платформы достигла 384,68 мм/с при амплитуде управляющего напряжения 400 В. Его максимальное отношение нагрузки к собственному весу достигло 7,6 при напряжении возбуждения 300 В, а его максимальная выходная сила составляет около 1,8 Н при напряжении возбуждения 400 В, а минимальное разрешение смещения составляет 4 мкм при работе в шаговом режиме. Проведены испытания в экстремальных условиях (температура — 0...120 °С и вакуум —  $3 \times 10^{-3}$ ... $10^5$  Па) для измерения выходных характеристик прототипа мобильной платформы (рис. 3). Результаты экспериментов показали, что прототип платформы способен перевозить грузы в условиях высокой температуры и высокого вакуума.

Рассмотренные примеры реализации технологических, измерительных и безопасностных аспектов общеэнергетических и прикладных ядерных технологий свидетельствуют об их широкой востребованности, проработанности и продуктивности, что позволяет оценивать их как перспективные, а внимание к ним — обоснованным и заслуживающим масштабирования. ■

*Статья поступила  
в редакцию 20.01.2023*

## Список литературы

1. Nourpour M., Manesh M. H., Khoshgoftar S. Modeling and 6E analysis of a novel quadruple combined cycle with turbocompressor gas station, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022, vol. 147, no. 8.
2. Coulon R., Judge S., Liu H., Michotte C. The international reference system for pure beta-particle emitting radionuclides: an evaluation of the measurement uncertainties, *Metrologia: International Journal of Pure and Applied Metrology*, 2021, vol. 58, no. 2.
3. Song Y., Peng B., Xu Q., Song G., Yue Z., Duan B., Han C., Yan W., Yao Z., Ma J., Sheng L., Li B. A method for spatio-temporal characterization of pulse beams with an all-optical image sensor, *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, vol. 151.
4. Carminati M., Scandurra G. Advances in Measurements and Instrumentation Leveraging Embedded Systems, *Review of Scientific Instruments*, 2021, vol. 92, no. 12.
5. Kurz N., Fischer D., Pfeifer T., Dorn A. Reaction microscope for investigating ionization dynamics of weakly bound alkali dimers, *Review of Scientific Instruments*, 2021, vol. 92, no. 12.
6. Kumar J., Singh G., Saxena M. K., Prakash O., Dixit S. K., Nakhe S. V. Development and Studies on FBG Temperature Sensor for Applications in Nuclear Fuel Cycle Facilities, *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 6.
7. Shpilman Z., Silberstein S., Rubin D., Ehrlich Y., Oysher Z., Ferber Y., Levy L. Time-dependent soft and hard x-ray measurements using streak and x-ray diode array diagnostic systems, *Review of Scientific Instruments*, 2021, vol. 92, no. 3.
8. Wang H., Wang X., Pan Y., Wang B., Yang S. Thermostatic Chamber for Doppler Broadening Temperature Measurement, *Proc. SPIE*, 2019, vol. 11439.
9. Burrows K., Hendricks R. J., Szymaniec K., Gibble K., Beattie S., Jian B. Measuring atom positions in a microwave cavity to evaluate distributed cavity phase shifts, *Metrologia: International Journal of Pure and Applied Metrology*, 2020, vol. 57, no. 6.
10. Behrens R. Correction factors for primary beta dosimetry, *Metrologia: International Journal of Pure and Applied Metrology*, 2020, vol. 57, no. 6.
11. Zhao M.-M., Tan Y.-J., Wang P.-P., Shao C.-G., Hu Z.-K. A proposal for designing the source mass to accurately determine G with atom interferometry, *Metrologia: International Journal of Pure and Applied Metrology*, 2021, vol. 58, no. 5.
12. Zhang D., Cao J., Dobie G., MacLeod C. A Framework of Using Customized LIDAR to Localize Robot for Nuclear Reactor Inspections, *IEEE Sensors Journal*, 2022, vol. 22, no. 6.
13. Hao B., Wang L., Wang R., Sun Y., Jin J., Xu Q. Numerical Analysis and Experimental Investigation on a Novel Piezoelectric-Actuated Rail-Type Mobile Platform, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, vol. 27, no. 2.

# Aspects of Foreign Implementation of Peaceful Atom Heat & Energy Possibilities

V.A. Grushnikov<sup>1</sup>, All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of Russian Academy of Sciences, PhD (Tech.), viniti@mach04.ru

<sup>1</sup> Senior Researcher, Moscow, Russia

**Citation:** Grushnikov V.A. Aspects of Foreign Implementation of Peaceful Atom Heat & Energy Possibilities, *Kompetentnost' / Competency (Russia)*, 2023, no. 4, pp. 46–55. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-4-46-55

## key words

thermal power engineering,  
global warming, nuclear power  
engineering, technologies,  
measurements, safety

Having never before been acutely confronted with the problem of global warming, it is necessary to embrace this emergency for all life on Earth. Emissions costs are aggregates of thermal power plants and heat engines of industrial and transport equipment – engines of gas emissions, mainly gas and pollutant emissions. The solution to the problem is associated with the transition from dirty carbon fossil fuels to environmentally friendly alternatives, as renewable wind and solar, mainly (besides them, tidal, currents, etc.) and also natural, but already traditional, such as hydropower and nuclear power. In the given article I suggest to take a look at these solutions in terms of application technology, measurement, and security aspects.

## References

1. Nourpour M., Manesh M. H., Khoshgoftar S. Modeling and 6E analysis of a novel quadruple combined cycle with turbocompressor gas station, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022, vol. 147, no. 8, pp. 5165–5197.
2. Coulon R., Judge S., Liu H., Michotte C. The international reference system for pure beta-particle emitting radionuclides: an evaluation of the measurement uncertainties, *Metrologia: International Journal of Pure and Applied Metrology*, 2021, vol. 58, no. 2, pp. 25–32.
3. Song Y., Peng B., Xu Q., Song G., Yue Z., Duan B., Han C., Yan W., Yao Z., Ma J., Sheng L., Li B. A method for spatio-temporal characterization of pulse beams with an all-optical image sensor, *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, vol. 151, pp. 106–112.
4. Carminati M., Scandurra G. Advances in Measurements and Instrumentation Leveraging Embedded Systems, *Review of Scientific Instruments*, 2021, vol. 92, no. 12, pp. 121–126.
5. Kurz N., Fischer D., Pfeifer T., Dorn A. Reaction microscope for investigating ionization dynamics of weakly bound alkali dimers, *Review of Scientific Instruments*, 2021, vol. 92, no. 12, pp. 132–141.
6. Kumar J., Singh G., Saxena M. K., Prakash O., Dixit S. K., Nakhe S. V. Development and Studies on FBG Temperature Sensor for Applications in Nuclear Fuel Cycle Facilities, *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 7613–7619.
7. Shpilman Z., Silberstein S., Rubin D., Ehrlich Y., Oysner Z., Ferber Y., Levy L. Time-dependent soft and hard x-ray measurements using streak and x-ray diode array diagnostic systems, *Review of Scientific Instruments*, 2021, vol. 92, no. 3, pp. 35–42.
8. Wang H., Wang X., Pan Y., Wang B., Yang S. Thermostatic Chamber for Doppler Broadening Temperature Measurement, *Proc. SPIE*, 2019, vol. 11439, pp. 114–119.
9. Burrows K., Hendricks R. J., Szymaniec K., Gibble K., Beattie S., Jian B. Measuring atom positions in a microwave cavity to evaluate distributed cavity phase shifts, *Metrologia: International Journal of Pure and Applied Metrology*, 2020, vol. 57, no. 6, pp. 72–77.
10. Behrens R. Correction factors for primary beta dosimetry, *Metrologia: International Journal of Pure and Applied Metrology*, 2020, vol. 57, no. 6, pp. 78–82.
11. Zhao M.-M., Tan Y.-J., Wang P.-P., Shao C.-G., Hu Z.-K. A proposal for designing the source mass to accurately determine G with atom interferometry, *Metrologia: International Journal of Pure and Applied Metrology*, 2021, vol. 58, no. 5, pp. 41–50.
12. Zhang D., Cao J., Dobie G., MacLeod C. A Framework of Using Customized LIDAR to Localize Robot for Nuclear Reactor Inspections, *IEEE Sensors Journal*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 5352–5359.
13. Hao B., Wang L., Wang R., Sun Y., Jin J., Xu Q. Numerical Analysis and Experimental Investigation on a Novel Piezoelectric-Actuated Rail-Type Mobile Platform, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, vol. 27, no. 2, pp. 744–752.

**К**ОМПЕТЕНТНОСТЬ

**87872** ПО ОБЪЕДИНЕННОМУ КАТАЛОГУ «ПРЕССА РОССИИ»