

Комплекс микрогравитационных испытаний для мобильных и портативных оптических стандартов частоты

Антон Павлович Вялых¹✉, Анастасия Викторовна Семенко², Денис Владимирович Сутырин³, Глеб Сергеевич Белотелов⁴, Сергей Николаевич Слюсарев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹apv11110000@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9630-4479>

²semenko_av@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4584-5977>

³sutyurin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1867-0278>

⁴belotelov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1205-6207>

⁵slyusarev@vniiftri.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы применения оптических квантовых стандартов (квантовых сенсоров) на основе холодных атомов в спутниковой навигации. Описаны преимущества размещения квантовых сенсоров на основе холодных атомов в космосе. Показано, что для повышения точности измерений с использованием квантовых сенсоров необходимо исследовать их работу в состоянии невесомости или микрогравитации на специальных платформах. Дан обзор основных платформ, обеспечивающих условия микрогравитации. Предложен вариант испытательной платформы – комплекс испытаний падения по параболической траектории, представляющий собой горки различных форм с передвигающейся вагонеткой. Подробно описано четыре конфигурации горок, для каждой реализована компьютерная симуляция. Проведён сравнительный анализ характеристик горок, выявлены их преимущества и недостатки, найдена наиболее эффективная конфигурация. Предложен способ повышения качества микрогравитации, который планируется использовать в будущем.

Ключевые слова: оптический стандарт частоты, навигация, гравиметрия, микрогравитация, башня свободного падения, параболический полет, лифт Эйнштейна

Для цитирования: Вялых А. П., Семенко А. В., Сутырин Д. В., Белотелов Г. С., Слюсарев С. Н. Микрогравитационная испытательная платформа для квантовых сенсоров // Измерительная техника. 2022. № 3. С. 45–52. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-3-45-52>

Microgravity test complex for mobile and portable optical frequency standards

Anton P. Vyalykh¹✉, Anastasia V. Semenko², Denis V. Sutyurin³, Gleb S. Belotelov¹, Sergey N. Slyusarev¹

^{1, 2, 3, 4, 5} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering Measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹apv11110000@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9630-4479>

²semenko_av@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4584-5977>

³sutyurin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1867-0278>

⁴belotelov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1205-6207>

⁵slyusarev@vniiftri.ru

Abstract. The questions of application of optical quantum standards (quantum sensors) based on cold atoms in satellite navigation are considered. The advantages of placing OFS based on cold atoms in space are described. It is shown that in order to improve the accuracy of measurements using quantum sensors, it is necessary to study their operation in a state of weightlessness or microgravity on special platforms. A review of the main platforms providing microgravity conditions is given. A fundamentally new version of the test platform is proposed – slides of various shapes with a moving trolley. Four configurations of slides are described in detail, for each a computer simulation is implemented. A comparative analysis of the characteristics of the slides has been carried out, their advantages and disadvantages have been identified, and the most effective configuration has been found. A method for improving the quality of microgravity is proposed, which will be taken into account in the future.

Keywords: optical frequency standard, navigation, gravimetry, microgravity, free fall tower, parabolic flight, Einstein elevator

Введение. В настоящее время неопределённость систематической погрешности оптических стандартов частоты (ОСЧ) на основе ультрахолодных атомов составляет 10^{-18} [1–3]. Это открывает новые возможности для использования данных ОСЧ в прикладной и теоретической физике.

Одной из важнейших областей применения ОСЧ является спутниковая навигация. В настоящее время для этой цели используются цезиевые и рубидиевые [4, 5] стандарты частоты, обеспечивающие точность позиционирования порядка 2 м. Данное значение точности можно существенно повысить путём применения актуальных ОСЧ с неопределённостью менее 10^{-18} . Также ОСЧ участвуют в синхронизации стационарных стандартов частоты на разных континентах, способствуя формированию международной шкалы времени. Кроме того, они требуются при измерениях в приложениях теоретической физики, например, при проверке общей теории относительности Эйнштейна [6] или теории о дрейфе фундаментальных констант [7]. С помощью ОСЧ можно с большой точностью измерять гравитационный потенциал Земли и составлять гравитационные карты как для навигации, так и для поиска полезных ископаемых [8].

Однако на неопределённость воспроизведения единицы частоты значительно влияют неопределённость гравитационного потенциала в месте расположения ОСЧ, движение поверхности земной коры, таяние ледников, приливы и отливы океанов, изменение уровня мирового океана под воздействием атмосферного давления и пр. [9]. Чтобы устранить данные влияющие факторы, можно расположить ОСЧ на орбитальном спутнике Земли [10]. Для достижения этой цели необходимо, во-первых, создать компактный портативный ОСЧ, во-вторых, исследовать его работу в состоянии невесомости или микрогравитации.

Цель настоящей работы – дать обзор основных платформ, обеспечивающих условия микрогравитации, описать комплекс испытаний падения по параболической траектории – вариант испытательной платформы в виде горки различных форм с передвигающейся вагонеткой, а также представить результаты компьютерной симуляции работы каждой горки.

Обзор основных платформ, обеспечивающих условия микрогравитации. Существует несколько различных платформ, обеспечивающих состояние микрогравитации. Они могут располагаться в космосе (орбитальная космическая станция/спутник, например Международная космическая станция, (МКС), суборбитальный космический корабль), работать в воздушном пространстве Земли (метеорологическая ракета, падение с воздушного шара, параболический полёт) или находиться на земле (башни свободного падения (БСП), лифт Эйнштейна). В табл. 1 приведены следующие характеристики основных существующих платформы по созданию условий микрогравитации: t – длительность микрогравитации; $a_{\text{ост}}$ – качество остаточного ускорения; C – стоимость проведения эксперимента в зависимости от массы груза/объекта.

По сравнению с исследованиями на БСП продолжительность эксперимента на космической станции или спутнике практически неограничена, но стоимость его проведения очень высока. Также сложно внести какие-либо изменения в эксперимент (за исключением экспериментов на МКС, выполняемых квалифицированными специалистами), поэтому в космосе необходимо применять совершенные технологии.

Альтернативой спутникам могут быть метеорологические ракеты, достичь микрогравитации также можно при падении с воздушного шара (с приземлением на парашюте) и параболическом полёте на специальном самолёте. При этом длительность микрогравитации составляет несколько минут, стоимость умеренная, но уменьшается качество остаточного ускорения.

БСП имеет существенные преимущества по сравнению с описанными выше платформами для экспериментов в условиях микрогравитации. При сравнимом качестве уровня микрогравитации на БСП возможно несколько циклов измерения за один запуск. Из-за расположения на земле БСП более удобны в эксплуатации и для эксперимента требуются меньшие затраты. Недостатком является малое количество запусков в сутки и короткая продолжительность условий микрогравитации.

Преимущества размещения квантовых сенсоров в космосе. Космос является средой, в которой возможно улучшить характеристики атомных квантовых сенсоров. В космосе есть условия для продолжительного свободного падения. В земном поле тяготения при выключении атомной ловушки, созданной лазерами и магнитными полями, ультрахолодные атомы почти сразу падают под действием притяжения, поэтому наблюдать их возможно лишь доли секунды. Однако в условиях микрогравитации атомное облако существует 5–10 с (а в перспективе – сотни секунд). Характеристики детекторов на холодных атомах (или атомные квантовые сенсоры) существенно улучшились за последние 20 лет (погрешность многих стронциевых оптических часов составляет единицы 17 знака [11, 12], чувствительность к ускорению атомных интерферометров находится на уровне 10^{-11} – $10^{-12}g$ [13, 14]). Размещение данных детекторов в космосе позволит практически полностью реализовать их потенциал.

Таблица 1

Платформы, обеспечивающие условия микрогравитации

Условия микрогравитации	t	$a_{\text{ост}}, \text{ м/с}^2$	$C, \text{ €/кг}$
МКС	Месяцы, годы	10^{-5} – 10^{-6}	1 млн
Суборбитальный космический корабль	10 мин – 10 дней	10^{-2} – 10^{-6}	1 млн
Метеорологическая ракета	2–3 мин	10^{-2} – 10^{-4}	100 тыс.
Падение с воздушного шара	около 10 с	10^{-2} – 10^{-3}	10 тыс. ...1 млн
Параболический полёт	10–20 с	10^{-2} – 10^{-3}	100 тыс.
БСП	2–10 с	10^{-2} – 10^{-6}	100 тыс. ...1 млн
Лифт Эйнштейна	2–4 с	10^{-5} – 10^{-6}	10 тыс. ...1 млн

Гравитационное поле Земли является важной областью исследования. Результаты работы спутниковых гравиметрических миссий GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) [15, 16], CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) [17] и GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) [9] позволили совершить революционный скачок в знаниях о гравитационном поле поверхности Земли и в понимании процессов перераспределения и переноса массы в глобальном масштабе. В частности, в процессе работы миссии GOCE в 2009–2013 гг. впервые на борту спутника был установлен гравитационный градиентометр, с помощью которого определён геоид с погрешностью около 1–2 см для пространственного разрешения 100 км на поверхности Земли [18]. Дифференциальные ускорения, измеренные на борту спутника комплексом сверхчувствительных электростатических акселерометров (разработки фирмы Onega, Франция), позволили найти все компоненты тензора гравитационного градиента с максимальной чувствительностью в диапазоне 10^{-20} мЕ/Гц^{1/2} в ширине полосы измерения 5–100 мГц.

Проекты исследований квантовых сенсоров в условиях микрогравитации. В настоящее время уже проводятся первые эксперименты с созданием условий микрогравитации. Первые предложения по космическим миссиям с использованием ультрахолодных атомов сделаны ещё в начале 2000-х гг. Европейский проект STE-QUEST (The Space-Time Explorer and QUantum Equivalence Principle Space Test) [19, 20] предполагал провести тест общей теории относительности на спутнике. Данный проект стал одним из четырёх кандидатов для третьего запуска по программе Cosmic Vision 2015–2025, но не был выбран для запуска в 2024 г. Американский проект QTEST (The Quantum Test of the Equivalence principle and Space Time) [21, 22] вероятно будет реализовываться на МКС. До 2014 г. существовал проект iSense (Inertial Quantum Sensors) [23]. Цели проекта: разработка набора инструментов и технологий, которые можно использовать при изготовлении строительных блоков для создания прочного портативного устройства на ультрахолодных атомах; демонстрация новой технологической платформы для создания устройства на ультрахолодных атомах, которое способно измерять гравитационное поле с максимально достижимой в то время точностью, но в более портативном формате в сравнении с другими существующими на тот момент аналогами. Этот проект получил продолжение в рамках британского национального Хаба квантовых технологий для сенсоров и метрологии (QTHSM) [24].

Проект CAL (Cold Atom Laboratory) [25] запущен 21 мая 2018 г. на МКС. Его прямым продолжением является проект BECCAL [26], разрабатывающийся в сотрудничестве Немецкого и Американского космических агентств DLR-NASA. Цель проекта – создать на борту МКС многопользовательскую и многоцелевую установку на ультрахолодных атомах. Широкий спектр возможных научных экспериментов в том числе включает опыты по интерферометрии на атомах двух разных веществ для проверки принципа эквивалентности Эйнштейна, исследования волновой оптики вещества,

квантовых декогеренции и отражения, а также сильно взаимодействующих между собой атомов и молекул. Планируются исследования атомов ⁸⁷Rb, ³⁹K, ⁴¹K. На современной стадии проекта разработаны научные цели и технологические требования, готовится проектная концепция и изучается осуществимость проекта.

Европейский проект SOC2 [27], созданный в рамках программы ELIPS-3 [28], направлен на то, чтобы в качестве естественного продолжения миссии ACES (которая основана на цезиевых микроволновых часах) [29] к концу 2020-х гг. установить и начать эксплуатировать на МКС оптические часы, повысив их производительность как минимум на порядок. В проект планируется включить оптические часы, фемтосекундный лазер и микроволновую и оптическую линии для сравнения часов на МКС с наземными часами, расположенными на нескольких континентах и в нескольких странах.

Новый совместный проект iXAtom [30] объединяет знания французской компании iXBlue – экспертов в области оптических гироскопов, фотоники и инерциальной навигации – и специалистов компании LP2N, специализирующихся на атомной интерферометрии. Конечная цель iXAtom – создать новое автономное устройство, технологии которого могут конкурировать с технологиями, основанными на системах глобального позиционирования, но без необходимости внешней связи для калибровки местоположения. В рамках проекта также рассматривается создание гибридного акселерометра [31].

Эксперименты с созданием условий микрогравитации могут осуществляться не только в космосе. Европейским космическим агентством по программе ELIPS-2 был выполнен проект SAI (Space Atom Interferometer) [32]. Его задача – демонстрация возможности применения атомных интерферометров для будущих космических миссий. Был создан атомный акселерометр на атомах рубидия, который мог работать и в условиях микрогравитации, и при нормальной гравитации.

Проект ICE (Interférométrie atomique à sources Cohérentes pour l'Espace) – результат сотрудничества между LP2N (Бордо) и лабораторией LNE-SYRTE. Экспериментальная установка создаётся с целью функционирования как на Земле, так и в условиях микрогравитации в самолёте, выполняющем параболический полёт [33].

Миссия MAIUS [34] демонстрирует работу атомного интерферометра с конденсатом Бозе-Эйнштейна на метеорологической ракете, которая обеспечивает невесомость в течение 6 мин, падая с высоты 260 км. В рамках этого проекта проведены эксперименты MAIUS-1 [35] по исследованию условий микрогравитации в метеорологической ракете, а также MAIUS-2/3 [36, 37]; KALEXUS [38], в котором проводилась спектроскопия атомов калия в метеорологической ракете.

БСП – альтернатива описанным выше способам создания условий микрогравитации. Первые эксперименты проекта QUANTUS [39] проходили на Бременской БСП, обеспечивающей микрогравитацию в течение 5–9 с. Проект основан в 2009 г. для исследовательских экспериментов с ультрахолодными атомами в условиях микрогравитации для будущих миссий в космосе. Разработаны миниатюрные

лазерные системы и электронные компоненты для прочной и компактной экспериментальной установки. Последующие эксперименты проводятся в метеорологической ракете проекта MAIUS. Исследуются атомы ^{87}Rb , ^{41}K . В рамках этого проекта созданы аппараты: QUANTUS-I (эксперимент по созданию конденсата Бозе-Эйнштейна в условиях микрогравитации) [40]; QUANTUS-II (миниатюризация экспериментальной установки QUANTUS-I и проверка новых разработок атомной оптики в микрогравитации) [41]; QUANTUS-III (дальнейшие улучшения) [42].

Преимущества БСП относительно других используемых платформ для создания микрогравитации делают БСП более удобными для испытаний устройств на ультрахолодных атомах. В Германии с 1990 г. работает бременская БСП Центра прикладных космических технологий и микрогравитации (ZARM) [43] в виде высоковакуумной трубы высотой 110 м, время свободного падения составляет 4,7 с. В 2004 г. в БСП добавлена катапульта, обеспечивающая время свободного падения 9,3 с при вертикальном параболическом полете. Эта БСП уникальна благодаря очень большому времени свободного падения.

Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) США управляет двумя объектами в Центре исследований Гленна при НАСА: Zero-G (Центр исследования невесомости) [44], время свободного падения 5,18 с; NASA Glenn 2.2 Second Drop Tower [45], время свободного падения 2,2 с.

Уникальный российский комплекс с длительностью микрогравитации около 3 с при 1–3 запусках в сутки [46] разработан для тестирования огромных установок военно-промышленного комплекса и ракетно-космической отрасли и мало подходит для испытания компактных установок на ультрахолодных атомах из-за небольшого количества возможных запусков в сутки.

Одной из проблем БСП является малое количество запусков в сутки. На решение этой проблемы направлен проект по созданию лифта Эйнштейна институтом технологий Ганновера и университетом Лейбница (Германия) [47]. Установка в лифте Эйнштейна закреплена на платформе, которая движется вертикально вверх и вниз с ускорением, имитируя параболический полет и обеспечивая 2–4 с микрогравитации при высоте 20 м в режиме катапульти. Планируемое количество запусков в сутки – 300, что на 1-2 порядка больше, чем в существующих БСП. Этот вариант подходит для исследования ОСЧ, так как обеспечивает множество запусков за короткое время. Проблемой является высокое пиковое потребление электрической мощности.

Во Франции реализован проект по созданию мини-лифта Эйнштейна [48]. Длительность микрогравитации 400 мс, время на остывание двигателей 12 с. Мини-лифт занимает небольшой объем и обеспечивает множество запусков в сутки (около 900 в течение рабочего дня 8 ч).

Авторы настоящей статьи предлагают разработать подобный проект на гексаподах. При высоте около 3 м мини-лифт Эйнштейна на гексаподах обеспечит длительность микрогравитации 0,5–1,0 с и сможет с большой точностью

устанавливать высоту исследуемой установки, что позволит использовать его для проверки релятивистской геодезии с помощью сличения частот двух расположенных на разных высотах ОСЧ. Также мини-лифт Эйнштейна может быть использован для тестов компактных гравиметров, градиометров на ультрахолодных атомах.

Помимо этого, авторы настоящей статьи предлагают альтернативу башням свободного падения – комплекс испытаний падения по параболической траектории (КИ ППТ). В таком комплексе микрогравитация достигается за счёт свободного падения тела, запущенного с высоты под нулевым углом к горизонту вдоль рельсов, траектория которых является ветвью параболы, либо запущенного вверх по параболической траектории под начальным углом 45° .

Характеристики исследуемых установок КИ ППТ.

В настоящее время во ВНИИФТРИ разрабатываются установки двух типов: мобильный ОСЧ на основе ультрахолодных атомов иттербия, предназначенный для измерения разницы высот двух расположенных в разных точках земной поверхности ОСЧ; портативный ОСЧ на тех же атомах, необходимый при решении задач, где требуется исключительная портативность ОСЧ, в том числе и для работы в космосе.

Мобильный ОСЧ. Примерные размеры мобильного ОСЧ: длина 3 м, ширина 2 м, высота 2 м, масса 500 кг (без учёта транспортного средства). Для установки этого типа к настоящему времени создана вакуумная камера оптического спектро스코па и разработаны конфигурация магнитных катушек для формирования магнитооптической ловушки (МОЛ) и система распределения лазерного излучения, включающая все необходимые частотные отстройки и разделения по направлениям и мощностям. Для такой конфигурации получена первичная МОЛ при мощности охлаждающих пучков более 25 мВт, с использованием луча Зеемановского замедления мощностью 15 мВт. Градиент магнитного поля 35 Гс/см, энергопотребление менее 5 кВт.

Стабилизация лазеров проводится с помощью модифицированной версии системы FSS (FSU) [49] (Time-Base, Германия) за счёт привязки лазеров к высокочастотному оптическому ULE-резонатору. Данная система позволяет стабилизировать несколько лазеров (на длинах волн 759, 798, 1112 нм) одновременно. Размер системы 33×26,5×17,5 см.

В качестве «часовых» лазеров служат две системы размером 32×29×25 см и массой 17,2 кг каждая, изготовленные фирмой Time-Base. Размеры всех основных частей мобильного ОСЧ позволяют поместить его в небольшой фургон и доставить на место проведения измерений.

Портативный ОСЧ. Для получения однолучевой МОЛ разработаны вакуумная камера и схема распределения частот портативной установки. В качестве отражательного элемента используется коническое зеркало из латуни с серебряным покрытием. Для Yb впервые получена однолучевая МОЛ. Благодаря компактным размерам камеры удалось максимально приблизить катушки друг к другу для уменьшения градиента магнитного поля от 35 до 8 Гс/см. Оптимальные предполагаемые параметры портативной установки:

полная масса 250 кг; энергопотребление менее 2,5 кВт. Прогнозируемая длительность одного цикла измерения 0,5–1,0 с.

Обе эти установки можно исследовать на предлагаемом авторах настоящей статьи КИ ППТ.

Конфигурации КИ ППТ. Существует несколько различных конфигураций КИ ППТ: односторонний; двусторонний; круговой и двусторонний замкнутый. Сравнительный анализ четырёх конфигураций КИ ППТ проведён при одинаковой длительности микрогравитации $t \approx 3,5$ с, позволяющей провести несколько циклов измерений.

Для симуляции траекторий, скоростей, ускорений и силы реакции опоры авторами настоящей статьи написано несколько программ на языке Python. В приближении вагонетки как материальной точки форма КИ ППТ повторяет траекторию движения вагонетки. Работа созданных программ основана на общем принципе: для участка траектории, на котором происходит параболический полёт, форма КИ ППТ рассчитывается исходя из сил, действующих на вагонетку. На остальных участках траектория симулируется с учётом введённых параметров, а затем рассчитываются остальные симулируемые величины. Характеристики КИ ППТ рассчитываются в соответствии с получившейся траекторией движения. Здесь параметры – входные данные программы, характеристики – программно рассчитанные значения интересующих физических величин. К входным данным относятся длительность микрогравитации $t = 3,5$ с и параметры КИ ППТ всех типов: масса вагонетки с установкой $m = 500$ кг коэффициент сопротивления воздуха $k_B = 0,7536$ кг/м (вагонетка имеет форму пули, радиус сечения 1 м); коэффициент трения качения $k = 0,02$, радиус колеса тележки $r_{к.т} = 0,342$; остальные параметры (радиус r дуг подъёмов и спусков, длина s участка разгона, ускорение a при разгоне и скорость v_B возвращения вагонетки в исходное положение) указаны в табл. 2.

Односторонний КИ ППТ. Вагонетка разгоняется на прямом участке, затем двигатели выключаются и вагонетка переходит в режим свободного падения. Важно, чтобы свободное падение прекращалось при достижении угла между вектором скорости и горизонтом в пределах $40\text{--}60^\circ$. В рассматриваемом случае для КИ ППТ всех типов, кроме кругового, выбран угол 45° . После достижения данного угла вагонетка, проезжая по дуге, принимает горизонтальное положение и постепенно останавливается. Затем установка поднимается обратно вверх по склону на тросах или с помощью двигателя с заданной скоростью. График симуляции для КИ ППТ этого типа представлен на рис. 1, а.

Двусторонний КИ ППТ. Представляет собой две симметрично расположенные

односторонние КИ ППТ без нижнего горизонтального участка. Благодаря такому расположению кинетическая энергия, полученная при полёте и спуске по дуге, не гасится торможением, а используется для подъёма на противоположный склон вместе с энергией двигателей. После прохождения всей траектории процесс повторяется в обратном направлении. Таким образом, эта конфигурация КИ ППТ не только энергетически выгоднее предыдущей, но ещё и позволяет увеличить количество запусков в единицу времени, поскольку за счёт высоких скоростей подъём происходит быстрее. График симуляции представлен на рис. 1, б.

Круговой КИ ППТ. Траектория движения вагонетки в этом случае аналогична параболическому полёту самолёта, но горизонтальный участок рельсов замкнут в кольцо. Вначале вагонетка разгоняется на всём горизонтальном участке рельсов

Таблица 2

Параметры комплексов испытаний падения по параболической траектории

Тип комплекса	r , м	s , м	a , м/с ²	v_B , м/с
Односторонний	160	200	3,610	3
Двусторонний	160	200	3,610	10
Круговой	80	600	0,883	–
Двусторонний замкнутый	160	800	0,800	10

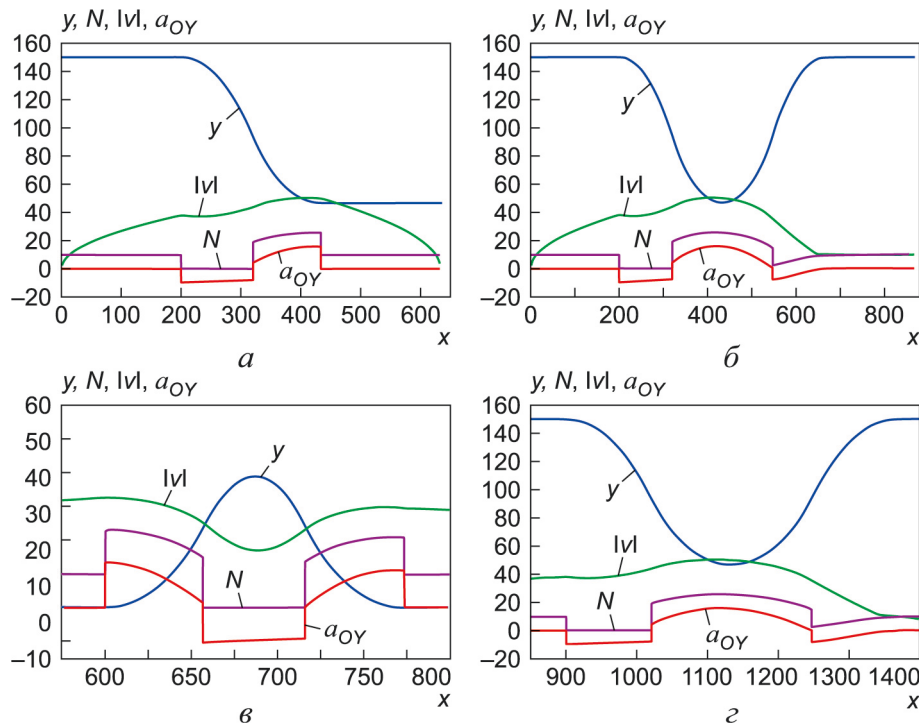


Рис. 1. Зависимости вертикальной координаты y , силы реакции опоры N , модуля скорости $|v|$ и проекции ускорения на ось OY a_{OY} от горизонтальной координаты x для односторонней (а), двусторонней (б), круговой (фрагмент) (в) и двусторонней замкнутой (фрагмент) (г) горок

Fig. 1. Dependences of the vertical coordinate y , support reaction force N , velocity module $|v|$ and acceleration projections on the OY axis a_{OY} from the horizontal coordinate x for one-sided (a), two-sided (b), circular (fragment) (c) and two-sided closed (fragment) (d) slides

и с продолжающими работать двигателями проезжает дугу, которая заканчивается при достижении угла 45° между вектором скорости и горизонтом. Затем двигатели отключаются, происходит свободный полёт по параболической траектории. Возможный вариант подобного комплекса показан на рис. 2. График симуляции приведён на рис. 1, в. Вследствие сопротивления воздуха парабола не совсем симметрична, поэтому, чтобы после полёта движение вагонетки перешло в горизонтальную плоскость по второй дуге того же радиуса, угол между вектором скорости и горизонтом в начале этой дуги должен составлять около -46° . Для наглядной демонстрации влияния сопротивления воздуха на полёт вагонетки на рис. 3 приведено

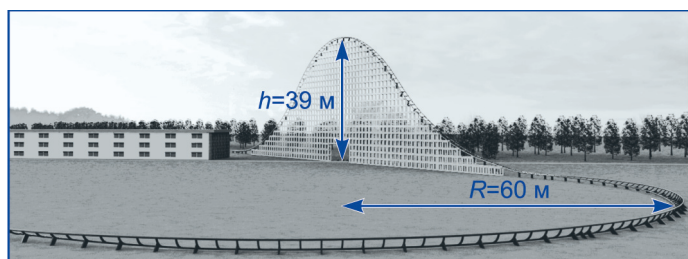


Рис. 2. Визуализация предложенного измерительного комплекса

Fig. 2. Visualization of the proposed measuring complex

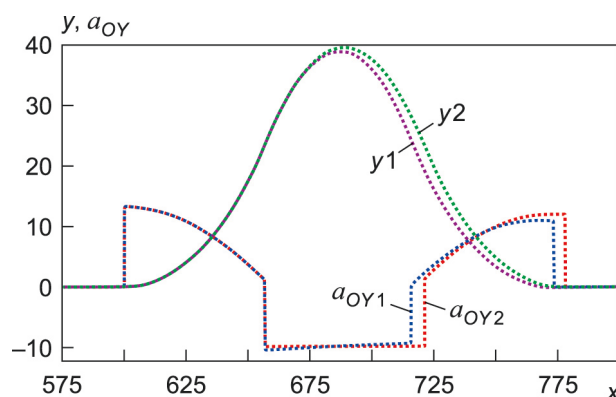


Рис. 3. Зависимости вертикальных координат y_1 , y_2 и проекций ускорения на ось OY a_{OY1} , a_{OY2} (при соответственно ненулевом и нулевом коэффициентах сопротивления воздуха) от горизонтальной координаты x для круговой горки

Fig. 3. Dependences of vertical coordinates y_1 , y_2 and acceleration projections on the OY axis a_{OY1} , a_{OY2} on the horizontal coordinate x for a circular slide (non-zero and zero air resistance coefficient, respectively)

сравнение траекторий и ускорений при нулевом и ненулевом коэффициентах сопротивления воздуха. После прохождения второй дуги вагонетка оказывается в стартовом положении и, используя приобретённую энергию и работу двигателей, разгоняется до такой же скорости, что и в первый раз, после чего второй полёт происходит идентично первому, и так далее. Благодаря тому, что вагонетка свободно летит по параболе вверх, а затем вниз, для достижения времени микрогравитации, одинакового для КИ ППТ всех типов, круговой комплекс может быть меньшей высоты. Это облегчает и удешевляет строительство КИ ППТ такого типа. Ещё одно преимущество – отсутствие необходимости останавливать вагонетку и двигаться в обратную сторону, что увеличивает количество запусков в единицу времени. Существует потенциальная возможность при необходимости одновременно испытывать на таком стенде более одной установки. Для этого достаточно запустить несколько вагонеток друг за другом, причём их движение должно быть полностью синхронным во избежание столкновений. Небольшой недостаток у такого КИ ППТ все же имеется – горизонтальное рельсовое кольцо имеет большую площадь. Однако территорию внутри кольца можно использовать для строительства вспомогательных зданий для работы комплекса.

Двусторонний замкнутый КИ ППТ. Этот комплекс повторяет двусторонний КИ ППТ, но при этом горизонтальный участок замкнут. Такая конфигурация, казалось бы, должна требовать меньше энергии и обеспечивать большее число запусков в единицу времени, чем обычный двусторонний комплекс. Однако, как показано на рис. 1, г, двусторонний замкнутый КИ ППТ требует достаточно высокой скорости вагонетки в конце разгона, что означает необходимость использования кривых большого радиуса на горизонтальном участке рельсов по сравнению с круговой горкой. Более того, размер негоризонтальной части двустороннего КИ ППТ тоже больше размера аналогичной части кругового комплекса. Соответственно увеличивается протяжённость горизонтального участка рельсов. Из-за этого предполагаемые преимущества становятся недостатками: долгое время проезда горизонтального участка снижает количество запусков в единицу времени, а компенсация силы трения на этом участке требует больших затрат энергии двигателей. Ко всем этим недостаткам добавляется увеличенная занимаемая площадь. Поэтому реализация КИ ППТ такого типа не имеет смысла на фоне обычного двустороннего и кругового КИ ППТ.

Для более наглядного сравнения КИ ППТ четырёх типов в табл. 3 сведены значения характеристик, полученных в

Таблица 3

Характеристики КИ ППТ описанных типов

Тип	h , м	E , МДж	P , кВт	L , м	$N/8$	S , m^2	g -force	$t_{общ}$, с	Q , m/c^2
Односторонний	103	3,61	79,5	661	117	945	2,6g	409,5	2,033/0,988
Двусторонний	103	2,4	79,5	925	608	1388	2,6g	2128	2,033/0,988
Круговой	39	1,5	23,7	795	953	50295	2,4g	3335,5	0,676/0,297
Двусторонний замкнутый	103	3,1	26,1	1424	489	161365	2,6g	1711,5	2,032/0,987

ходе симуляций, – высоты h горки, энергия E , затраченной на пять запусков, пиковой мощности P двигателей, длины L рельсов, количества $N/8$ запусков за 8 ч работы, занимаемой горками площади S , перегрузки g -force, общего времени $t_{общ}$ микрогравитации за 8 ч работы, качества Q микрогравитации. Под качеством микрогравитации здесь подразумевается разность

модуля проекции на ось ОУ ускорения, с которым движется вагонетка, и ускорения свободного падения, причём рассматриваются максимальное и среднее по модулю значения данной разницы за время параболического полёта. Цветным фоном в табл. 3 для наглядности выделены средние (жёлтый), худшие (красный) и лучшие (зелёный) результаты, более тёмные оттенки показывают их наилучшие или наихудшие значения.

Односторонний и двусторонний замкнутый КИ ППТ неэффективны по сравнению с КИ ППТ двух остальных типов по энергопотреблению и количеству запусков в сутки. Двусторонний КИ ППТ в сравнении с круговым несколько проигрывает по количеству запусков в сутки и существенно – по высоте конструкции. К тому же, за счёт меньшей скорости движения вагонетки и, соответственно, меньшей силы сопротивления воздуха, качество микрогравитации для кругового КИ ППТ значительно выше, чем для комплексов остальных типов. Однако полученные значения качества микрогравитации всех КИ ППТ существенно меньше многих значений качества микрогравитации, обеспечиваемой платформами (см. табл. 1). Основная причина снижения качества микрогравитации – сопротивление воздуха. Чтобы избавиться от этой проблемы, можно создать вакуум на всём пути движения вагонетки, но в данном случае (из-за больших объёмов воздуха, который требуется откачать) это труднореализуемо. Другой способ, с помощью которого можно улучшить качество микрогравитации – компенсация силы сопротивления воздуха двигателями, которые включаются во время параболического движения и обеспечивают заранее рассчитанную скорость в каждой точке траектории. В данном случае необходимо обеспечить плотное сцепление вагонетки с рельсами для точного контроля скорости. Поскольку контакт с рельсами поддерживается постоянно, а скорость нужно контролировать в каждой точке, такое движение не является свободным полётом, и для его симуляции требуется другой подход, который предполагается реализовать в будущем.

Заключение. Проанализированы существующие платформы, обеспечивающие условия микрогравитации, и результаты проведённых на них экспериментов, в том числе башни свободного падения, и предложена альтернатива – перспективные комплексы микрогравитационных испытаний (односторонняя, двусторонняя, круговая и двусторонняя замкнутая горки). По результатам компьютерной симуляции траектории, модуля скорости, силы реакции опоры и проекции ускорения на ось ординат предложенных горок каждого типа показано, что наиболее эффективной является круговая горка. Для улучшения качества микрогравитации необходимо компенсировать силу сопротивления воздуха на участке параболического движения.

Список источников/References

1. Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., Campbell S. L., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley S. L., Ye J., *Nature*, 2014, vol. 506, 71. <https://doi.org/10.1038/Nature12941>
2. Nicholson T. L., et al., *Nature communications*, 2015, vol. 6, 6896. <https://doi.org/10.1038/ncomms7896>

3. Ushijima I., Takamoto M., Das M. et al., *Nature Photonics*, 2015, vol. 9, pp. 185–189. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.5>
4. Xie Jun, et al., *Satellite Navigation Systems and Technologies*, Springer, Singapore, 2021.
5. Liu Liang, et al., *Nature communications*, 2018, vol. 9, 2760. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05219-z>
6. Schiller S. et al., Precision test of General Relativity and the Equivalence Principle using ultrastable optical clocks: a mission proposal, *Proceeding 39th ESLAB Symposium “Trends in Space Science and Cosmic Vision 2020”*, pp. 39–42, F. Favata, J. Sanz-Forcada, A. Gimenez, eds., ESA SP-588, 2005.
7. Andrew D. Ludlow, Martin M. Boyd, Jun Ye, Ekkehard Peik, Piet O. Schmidt, <https://arxiv.org/abs:1407.3493v2> [physics.atom-ph] (2015), pp. 62–64.
8. Schiller S., et al., *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 2007, vol. 166, pp. 300–302. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2006.12.032>
9. Tapley B. D. et al., *Science*, 2004, vol. 305, 5683, pp. 503–505. <https://doi.org/10.1126/science.1099192>
10. Belotelov G. S., Sutyryn D. V., Slyusarev S. N., Towards a Transportable Optical Frequency Standard on Neutral Ytterbium Atoms, *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2019, vol. 6 (1), pp. 24–31. (In Russ) <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.24.31>
11. Westergaard Philip G., Jérôme Lodewyck, Lisete Maria Lorini, Arnaud Lecallier, *Physical review letters*, 2011, vol. 106 (21), 210801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.210801>
12. Falke Stephan, et al., 2013, <https://arxiv.org/abs/1312.3419v1> [physics.atom-ph].
13. Yu Nan, Kohel J., Kellogg J. et al., *Applied Physics B*, 2006, vol. 84 (4), pp. 647–652. <https://doi.org/10.1007/s00340-006-2376-x>
14. Asenbaum Peter, et al., *Physical Review Letters*, 2020, vol. 125 (19), 191101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.191101>
15. Drinkwater M. R., Floberghagen R., Haagmans R., Muzi D., Popescu A., *Space Science Reviews*, 2003, vol. 108 (1-2), pp. 419–432. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1333-7_36
16. Johannessen J. A., Balmino G., Le Provost C. et al., *Surveys in Geophysics*, 2003, vol. 24, pp. 339–386. <https://doi.org/10.1023/B:GEOP.0000004264.04667.5e>
17. Reigber, C., Jochmann, H., Wünsch, J., et al., *Earth observation with CHAMP*, 2005, pp. 25–30. https://doi.org/10.1007/3-540-26800-6_4
18. Brockmann J. M., Zehentner N., Höck E., Pail R., Loth I., Mayer-Gürr T., Schuh W.-D., *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41 (22), pp. 8089–8099. <https://doi.org/10.1002/2014GL061904>
19. Aguilera D. N., Ahlers H., Battelier A., et. al., *Classical and Quantum Gravity*, 2014, vol. 31 (11), 115010. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/31/11/115010>
20. Altschul B., Bailey Q. G., Blanchet L., et. al., *Advances in Space Research*, 2015, vol. 55 (1), pp. 501–524. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.07.014>
21. Chiow S. W., Williams J., Yu N., Müller H., *Physical Review A*, 2017, vol. 95 (2), 021603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.021603>

22. Williams J., Chiow S. W., Yu N., Müller H., *New Journal of Physics*, 2016, vol. 18 (2), 025018.
<https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/2/025018>
23. Malcolm Jonathan Ian, Doctoral dissertation of philosophy (University of Birmingham, Birmingham, 2016).
24. Bongs K., Boyer V., Cruise M. A., et. al., *Proc. SPIE 9900, Quantum Optics*, SPIE Photonics Europe, 2016, Brussels, Belgium, 990009. <https://doi.org/10.1117/12.2232143>
25. Elliott Ethan R., et al., *Microgravity*, 2018, vol. 4 (1), pp. 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41526-018-0049-9>
26. Warner Marvin, et al., On the design of BECCAL—a quantum optics experiment aboard the ISS, *Proceedings of the 69th International Astronautical Congress*, Bremen, Germany, 1–5 October 2018, IAF, 2018, IAC-18, A2, IP, 7, x46028, available at: <https://iafastro.directory/iac/archive/browse/IAC-18/A2/IP/46028/> (accessed 03.02.2022).
27. Schiller S., et al., *Let's embrace space*, 2012, vol. 2 (45), 452. <https://doi.org/10.2769/31208>
28. Schiller S., et al., *ELIPS-3 The Space Optical Clocks (SOC) Project Final Report*, 2012, available at: <http://www.exphy.uni-duesseldorf.de/PDF/Space%20Optical%20Clocks%20Final%20Report%20v11%20version%20for%20double-sided%20printing%20v3.pdf> (accessed 25.02.2022).
29. Cacciapuoti L., Salomon C., *European Physical Journal Special Topics*, 2009, vol. 172 (1), pp. 57–68. <https://doi.org/10.1140/EPJST/E2009-01041-7>
30. Battelier B., Barrett B., Fouché L., et. al., *Proc. SPIE 9900, Quantum Optics*, SPIE Photonics Europe, 2016, Brussels, Belgium, 990004. <https://doi.org/10.1117/12.2228351>
31. Cheiney P., Fouché L., Templier S., Napolitano F., Battelier B., Bouyer P., Barrett B., *Physical Review Applied*, 2018, vol. 10 (3), 034030. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.034030>
32. Sorrentino Francesco, et al., *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, vol. 327, no. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/327/1/012050>
33. Nyman Robert A., et al, *Applied Physics B*, 2006, vol. 84 (4), pp. 673–681. <https://doi.org/10.1007/s00340-006-2395-7>
34. Grosse Jens, et al., *AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition*, 4–7 August 2014, San Diego, CA, AIAA, 2014, 4210. <https://doi.org/10.2514/6.2014-4210>
35. Stamminger Andreas, et al., MAIUS-1 – vehicle, subsystems design and mission operations, *Proceedings 22nd ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, 7–12 June 2015, Tromsø, Norway, ESA Communications, 2015, pp. 183–191.
36. Elsen Michael, et al., Design of the MAIUS-2/3 Atom Interferometer on a Sounding Rocket, *Proceedings of the 67th International Astronautical Congress (IAC 2016)*, Guadalajara, Mexico, 26–30 September 2016, IAF, 2016, IAC-16.A2.3.2, pp 464–471.
37. Elsen Michael, et al., Final design of the MAIUS-2/3 payload – an atom interferometer on a sounding rocket, *Proceedings of the 69th International Astronautical Congress (IAC 2018)*, 1–5 October 2018, Bremen, Germany, IAF, 2018, IAC-18.A2.3.5, pp. 1026–1031.
38. Dinkelaker Aline, et al., *Frontiers in Optics 2016*, Rochester, New York, 17–21 October 2016, OSA Technical Digest, 2016, FF1H.1. <https://doi.org/10.1364/FIO.2016.FF1H.1>
39. Müntinga Hauke, et al., QUANTUS: Applications of Bose-Einstein condensates in microgravity, *38th COSPAR Scientific Assembly*, Bremen, Germany, 18–25 July 2010, 2010, H04-0015-10, p. 2.
40. Rudolph Jan, et al., *Microgravity Science and Technology*, 2011, vol. 23 (3), pp. 287–292. <https://doi.org/10.1007/S12217-010-9247-0>
41. Herrmann Sven, Hansjörg Dittus, Claus Lämmerzahl, *Classical and Quantum Gravity*, 2012, vol. 29 (18), 184003. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/29/18/184003>
42. Scharringhausen Marco, Quantus Team, Ernst Maria Rasel, Bose-Einstein Condensation in Extended Microgravity, *39th COSPAR Scientific Assembly*, July 14–22, 2012, Mysore, India, 2012, H0.6, p. 1710.
43. Dittus H., *Endeavour*, 1991, vol. 15 (2), pp. 72–78. [https://doi.org/10.1016/S0160-9327\(05\)80008-0](https://doi.org/10.1016/S0160-9327(05)80008-0)
44. Zero Gravity Research Facility User's Guide, 2017, available at: <https://www1.grc.nasa.gov/wp-content/uploads/Zero-Gravity-Research-Facility-users-guide.pdf> (accessed 03.02.2022).
45. 2.2 second drop tower, NASA Glenn Research Center, 2008, available at: <https://www1.grc.nasa.gov/facilities/drop/> (accessed 03.02.2022).
46. Degtyar V. G., 70th anniversary of the state rocket center named after academician V. R Makeyev, *Space Engineering and Technology*, 2018, no. 2 (21), available at: <https://www.energia.ru/ktt/archive/2018/02-2018/02-01.pdf> (accessed: 10.02.2022). (In Russ.)
47. Lotz Christoph, et al., *Logistics Journal: Proceedings*, 2020, no. 12. http://dx.doi.org/10.2195/lj_Proc_lotz_en_202012_01
48. Condon Gabriel, et al., *Physical Review Letters*, 2019, vol. 123 (24), 240402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.240402>
49. Nevsky Alexander, et al., *Optics Letters*, 2013, vol. 38 (22), pp. 4903–4906. <https://doi.org/10.1364/OL.38.004903>

Статья поступила в редакцию 13.01.2022; одобрена после рецензирования 07.02.2022; принята к публикации 10.02.2022.
The article was submitted 13.01.2022; approved after reviewing 07.02.2022; accepted for publication 10.02.2022.