

БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. ИММАНУИЛА КАНТА

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Выпуск 4

Сборник научных трудов

Под редакцией А. Д. Быковой

Издательство
Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта
2025

УДК 004
ББК 22
Ф947

Рецензенты

М. Ю. Овчинников, д-р физ.-мат. наук, профессор, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН;
А. А. Шпилевой, канд. физ.-мат. наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта; *М. Д. Верещагин*, Ph. D., директор ВШ компьютерных наук и искусственного интеллекта, Балтийский федеральный университет им. И. Канта; *Н. М. Тихомиров*, д-р техн. наук, начальник научно-технического управления ОАО «Концерн “Созвездие”»;
Б. В. Потапов, д-р техн. наук, профессор АО ВНИИСТ; *В. И. Абрамова*, канд. техн. наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта;
А. В. Юров, д-р физ.-мат. наук, профессор, Балтийский федеральный университет им. И. Канта

Ф947 **Фундаментальные и прикладные исследования в области высоких технологий** : сборник научных трудов / под ред. А. Д. Быковой. — Калининград : Издательство БФУ им. И. Канта, 2025. — Вып. 4. — 126 с.
ISBN 978-5-9971-1022-2

Включает теоретические и прикладные исследования магистров, аспирантов, молодых ученых, преподавателей и специалистов в области высоких технологий. Охватывает широкий круг вопросов, касающихся информатики, информационных систем, математического моделирования, приборостроения, программирования, радиофизики и телекоммуникаций.

Адресован широкому кругу специалистов в сфере высоких технологий, аспирантам и студентам высших учебных заведений.

УДК 004
ББК 22

ISBN 978-5-9971-1022-2

© Оформление, БФУ им. И. Канта, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Сапрыкин О. А., Толстель О. В., Дронов П. А., Нестеренко А. Н., Приданников С. Ю., Дикарев В. А., Симбаев А. Н., Дудоров Е. А., Чеха В. В.</i> Концепция комплексного изучения Луны и планет Солнечной системы с применением инфраструктуры орбитальных автоматических станций, межпланетных буксиров, спутниковых группировок и напланетных роботов	4
<i>Скворцов В. С., Пиотровский К. М., Плетенский М. З.</i> Архитектура и реализация автоматизированной веб-системы учета посещаемости студентов с использованием pfc-меток, qr-кодов и gps	52
<i>Леонов Ф. М.</i> Агрегатор поиска научных статей: комплексный анализ архитектурных решений и перспектив развития.....	61
<i>Туманов Д. М., Якушев Р. А.</i> Разработка мини-приложения онлайн-радио для социальной сети вконтакте	71
<i>Савченко М. П., Печуконис Ф. Д.</i> Цепь отрицательной обратной связи для компенсации неизохронности автогенератора с варикапами.....	84
<i>Ребриев А. В., Щербань П. С.</i> Использование ТРИЗ при проектировании ТНПА для обследования райзеров и морских нефтегазовых платформ	95
<i>Пликаускайте Э. А.</i> Сероводородная коррозия нефтегазового оборудования: причины, последствия и методы защиты.....	112
<i>Юрова А. А., Барсуков О. И.</i> К вопросу о массивном векторном поле во фридмановской метрике	119

**О. А. Сапрыкин, О. В. Толстель, П. А. Дронов
А. Н. Нестеренко, С. Ю. Приданников, В. А. Дикарев
А. Н. Симбаев, Е. А. Дудоров, В. В. Чеха**

**КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИЗУЧЕНИЯ ЛУНЫ И ПЛАНЕТ
СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНФРАСТРУКТУРЫ
ОРБИТАЛЬНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, МЕЖПЛАНЕТНЫХ БУКСИРОВ,
СПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВОК, КОСМИЧЕСКИХ И НАПЛАНЕТНЫХ РОБОТОВ**

Для исследований Луны и планет используются автоматические космические аппараты разового исполнения с заранее сформулированной научной программой. Это приводит к отрывочности получаемой информации. Анализируя текущие программы создания окололунных станций, авторы приходят к выводу, что для комплексного исследования Луны необходимо создавать орбитальную станцию на низкой орбите Луны высотой 100—200 км. Проводится анализ функций лунной орбитальной станции, необходимость специализации модулей под эти функции и состав модулей. Схема комплексного исследования планеты с использованием стационарных комплексов, многоэтажных взлетно-посадочных комплексов и иных составляющих инфраструктуры, описанных в статье, справедлива не только для Луны, но и для других планет Солнечной системы. Решения, найденные для лунной орбитальной станции, масштабируемы: элементы станции, способы их доставки, операционное взаимодействие у Луны могут быть использованы применительно к другим планетам. Предлагаемые решения складываются в концепцию комплексного изучения Луны и планет с применением инфраструктуры орбитальных автоматических станций. Особенности перспективы открываются при освоении извлечения рабочего тела и топлива для двигательных установок инопланетных станций из вещества планеты назначения, например из атмосферы планет: водорода, азота, метана, гелия, кислорода. Это приведет к качественно новому уровню исследований — с использованием многоэтажных устройств: взлетно-посадочных комплексов, орбитальных танкеров-заправщиков, научной аппаратуры. Подробно рассматривается двигательная установка станции — ключевой элемент в предлагаемой инфраструктуре. Также рассмотрены транспортные миссии к станции, научно-исследовательские и разведывательные миссии, космические и напланетные роботы. Предлагаемая концепция систематизирует технические, технологические и научные вопросы развития космических исследований, переводит их с уровня разовых экспериментов и миссий на уровень промышленных платформ, серийных изделий, реализации комплексной научной программы.

For lunar and planetary exploration, single-use automated spacecraft with a predefined scientific program are used. This results in fragmented information. Analyzing current lunar station development programs, the authors conclude that comprehensive lunar exploration requires the creation of an orbital station in low lunar orbit, at an altitude of 100—200 km. The functions of a lunar orbital station, the need for specialized modules for these functions, and the module composition are analyzed. The concept of comprehensive planetary exploration using station complexes, reusable launch and landing systems, and other infrastructure components described in the article is applicable not only to the Moon but also to other planets in the Solar System. The solutions developed for the lunar orbital station are scalable: the station components, their delivery methods, and operational interactions near the Moon can be applied to other planets. The proposed solutions align with the concept of comprehensive lunar and planetary exploration using the infrastructure of orbital automated stations. Particular prospects open up with the development of extracting the working fluid and propellant for space station propulsion systems from the target planet's material. For example, from planetary atmospheres: hydrogen, nitrogen, methane, helium, and oxygen. This will lead to a qualitatively new level of research, using reusable devices: ascent and descent systems, orbital refueling tankers, and scientific equipment. The station's propulsion system, a key element in the proposed infrastructure, is examined in detail. Also considered are transport missions to the station, scientific research and reconnaissance missions, and space and planetary robots. The proposed concept systematizes the technical, technological, and scientific aspects of space exploration development, moving them from the level of one-off experiments and missions to the level of industrial platforms, serialized products, and the implementation of a comprehensive scientific program.

Ключевые слова: лунная орбитальная станция, инопланетная орбитальная станция, электроракетная двигательная установка, многоразовый взлетно-посадочный комплекс, танкер-заправщик, лунная база, стационарный плазменный двигатель, межпланетный комплекс, узловой модуль, космическая инфраструктура

Keywords: lunar orbital station, alien orbital station, electric rocket propulsion system, reusable takeoff and landing complex, refueling tanker, lunar base, stationary plasma engine, interplanetary complex, nodal module, space infrastructure

Введение

В последние годы наблюдается резкий рост интенсивности освоения космоса. С приходом частных компаний выход в космос стал в разы доступнее: за последние годы стоимость запусков упала более чем в десять раз по сравнению с 1970—2010 годами. Количество спутников на орбите достигло 12 тыс., в 2023 году поставлен рекорд — запущено около 3 тыс. аппаратов за год, а с 1 января по 1 июля 2025 года было выполнено 149 запусков ракет. Объем мировой космической экономики в 2024 году вырос до 613 млрд долларов.

Строятся новые космодромы в разных странах, запускаются новые ракеты, в том числе тяжелые и с возвращаемыми ступенями. Увеличи-

ваются количество спутников и их группировок, запущены в работу конвейеры по их изготовлению, создаются средства их дозаправки в космосе, совершенствуются технологии спутниковой связи. Развивается космический туризм, снят первый художественный фильм на борту орбитальной станции. На спутниках и станциях проводятся все более сложные эксперименты по созданию новых веществ, лекарств недоступных на Земле. Научно-исследовательские аппараты исследуют дальние планеты Солнечной системы и астероиды, рассматривается возможность перехватить межзвездную комету, залетевшую в Солнечную систему. Рассматриваются проекты исследований спутников Юпитера и Нептуна, поиска жизни на них.

Наращиваются околоземные станции МКС и Тяньгун, разрабатываются РОС, Lunar Gateway и частные американские околоземные станции Haven 1 и Axiom Space. Посадочные аппараты разных стран достигли поверхности Луны и продолжили ее исследование. Уточняются карты поверхности Луны на основе современных спутниковых данных высокого разрешения, планируются спутниковые группировки, системы связи и глобального позиционирования для Луны. Разрабатываются различные виды роботов для работы на Луне. В США и Китае создаются космические ракеты и корабли для посадки на Луну в ближайшие 2—3 года. Создаются проекты лунных баз на Южном полюсе (вблизи горного хребта Малаперт) в лавовых трубках и под слоем реголита, технологии производства стройматериалов из реголита, проектируются атомные электростанции для обеспечения деятельности этих баз и добычи ресурсов на Луне. Проводятся исследования по выращиванию растений для создания продуктов питания в условиях космоса, а также на Луне и Марсе. Увеличивается количество миссий к Марсу, наращивается его исследование марсоходами и вертолетами, планируется высадка человека на Марс и его дальнейшая колонизация. Разработан концепт марсианского спутника-ретранслятора для управления марсоходами и в будущем — для связи с астронавтами.

Илон Маск анонсировал строительство крупнейшего в мире производственного комплекса — так называемой «гигабазы» (Gigabay) в Техасе, где SpaceX планирует выпускать до 1000 многоразовых ракет Starship в год для регулярных полетов на Марс и создания там постоянной колонии. Подписан первый контракт на размещение научной полезной нагрузки на корабле Starship для доставки ее к Марсу. Первый полет космического корабля к Марсу с человекообразным роботом Optimus анонсирован Маском уже на конец 2026 года.

Рассматриваются проекты терраформирования Венеры и Марса. Проектируются космические буксиры с термоядерным двигателем, испытан твердотопливный двигатель для старта ракеты с поверхности Марса. Рассматриваются миссии к самому далекому транснептуновому объекту Солнечной системы — Седне (из пояса Койпера) на расстояние более 75 астрономических единиц (далее — а. е.). Прошел конкурс на

проект межзвездного корабля поколений на основе современных технологий. Для исследования Вселенной начал работать уникальный орбитальный телескоп Джеймс Уэбб, предложена концепция космического телескопа с жидким зеркалом в 8 раз большим (до 50 м), чем максимально существующие. Исследуется возможность организации миссии к фокусу гравитационной линзы Солнца (550 а. е.) с целью использования ее в качестве телескопа для исследования экзопланет возле других звезд. Таким образом, очевидно, что человечество стремится к экспансии на планеты Солнечной системы для дальнейшего изучения и освоения космоса.

Из большого спектра проектов и задач в этом направлении ниже рассмотрены несколько наиболее важных с точки зрения авторов статьи задач — околопланетные орбитальные станции, средства транспортировки их частей к месту назначения, спутниковые средства поддержки их работы, буксиров доставки грузов к таким станциям и роботов для работы на поверхности этих небесных тел.

Неудачное завершение полета российской автоматической станции «Луна-25», стартовавшей 11 августа 2023 года, широко освещалось в средствах массовой информации, а также среди ученых. Во многом резонанс вокруг этой миссии состоит в том, что последняя советская научная станция летала на Луну 47 лет назад — срок для науки настолько большой, что равносильен забвению темы. Возрождение интереса к Луне связывают с открытием в 1994 году космическим аппаратом (далее — КА) Clementine (США) в полярных областях Луны водяного льда, косвенно подтвержденного в ходе полетов КА Lunar Prospector (1998, США), с бота КА Chandrayaan-1 (2008—2009, Индия) [1], а также при контактном воздействии разгонным блоком Centaur с борта КА LCROSS (2009, США) [2]. Безусловно, обнаружение воды на Луне — весьма важное событие. Это открывает новые возможности в освоении Луны, использовании ее человеком, в создании биосферы Луны и технологий освоения планет.

Тем не менее вне зависимости от конечных результатов миссий «Луна-25» и ее современников — Chandrayaan-3 (Индия, запуск осуществлен 14 июля 2023 года), «Чанъэ-6» (Китай, запуск осуществлен 3 мая 2024 года, возврат образцов лунного грунта с обратной стороны Луны реализован 25 июня 2024 года) и др., вне зависимости от того, будет ли подтверждено наличие воды на Луне, вполне отчетливо возникает вопрос о необходимости комплексного исследования Луны и планет Солнечной системы. То есть такого исследования, при котором вся планета (или естественный спутник) рассматривается как объект исследования — от экватора до полюса, во всех ландшафтных областях — видимых и невидимых — и на максимальной доступной величине глубин от поверхности. Иначе 50-летние остановки в исследованиях, заблуждения относительно перспектив изучения или использования объектов исследования, ошибки в оценке приоритетности исследований, оценке потенциалов развития космических технологий — неизбежны.

Крайне низкий уровень содержания воды в реголите, выявленный в результате высадок американскими астронавтами в 1969—1972 годах, а также при возвращении советских лунных станций «Луна-20» и «Луна-24» (менее 0,1 % от массы), оказалось, в совокупности не говорит об отсутствии воды на естественном спутнике Земли.

Отрицательные ответы на ожидаемые результаты в науке являются столь же ценными, как и положительные, и, как правило, не становятся причиной сворачивания исследований. Просто природа оказывается сложнее наших представлений о ней.

Многообразие природы настолько велико, что обобщать экспериментально полученные единичные факты можно только после получения информации из максимального количества районов планеты (спутника, астероида). Практически все проводимые космические эксперименты свидетельствуют об анизотропности наблюдаемого пространства. Отличаются и условия, и формы вещества — на поверхности, в недрах планет, вблизи или в удалении от звезд, в галактическом ядре или на периферии галактики, в скоплениях галактик и супергалактик, в черных дырах, в квазарах.

Именно поэтому развивается инструментарий исследований, расширяется их масштаб. Как следствие, при исследованиях наиболее близкого к Земле «естественного» соседа — Луны — площадью около 38 млн км² (более чем в два раза превосходит площадь современной России) практика разовых миссий по аналогии «Луна-25» (как и всех предыдущих полетов советских автоматических станций) приводит к практически бесконечному во времени периоду исследований. Сегодня Российская космическая программа предполагает до конца десятилетия помимо проекта «Луна-25» (или «Луна-Глоб») совершить еще четыре научных миссии к Луне. Это всё единичные полеты в конкретные области Луны, намеченные на основании текущих научных представлений. Как заявлено на официальном сайте Роскосмоса [3], российская космическая «программа предусматривает создание необходимого задела для полномасштабного исследования Луны после 2025 года и осуществление к 2030 году высадки человека на Луну». Неоднократно руководители Роскосмоса заявляли о том, что российская и китайская космические программы исследования Луны после завершения программы автоматических аппаратов могут взаимно сочетаться в рамках проекта «Лунная база». При этом понятие «база» не раскрывается. О чем может идти речь?

1. Лунная база

Под «базой» в 1970-х годах советские конструкторы понимали пилотируемый объект, на котором периодически либо постоянно могли бы присутствовать космонавты [4]. Опыт эксплуатации орбитальных станций «Мир», МКС показывает, что постоянное поддержание рабо-

тоспособности такой базы даже в режиме относительно редких посещений космонавтами является очень сложной и дорогостоящей логистической задачей. Стоимость доставки грузов на Луну десятикратно превышает стоимость транспортировки грузов на объекты, расположенные на низкой околоземной орбите (далее — НОО), трехкратно превышает стоимость доставки к околоземным астероидам, входящим в группу NEA [5], и может достигать 200—300 тыс. долл. за килограмм.

Такая стоимость логистики на пилотируемый космический объект сегодня недоступна ни одной стране, включая США. Именно поэтому НАСА предложила вариант не инопланетной «базы», а орбитальной — проект международной космической платформы IOP-G (International Orbital Platform — Gateway) [6]. Концепция «гибкого пути», стоящая во главе космической «базы» IOP-G, предполагает исследования Луны как одну из важных задач, наряду с полетами в точки либрации L1, L2, L4, L5 системы Земля — Луна, полетами на границу зоны тяготения Земли — либрационную точку L1 системы Земля — Солнце, подготовку к длительным автономным полетам к Марсу, астероидам. Выбранная для проекта орбита NRHO (Near-Rectilinear Halo Orbit) — это эллиптическая гало-орбита в полярной плоскости Луны с параметрами высоты от 3000 до 70 000 км [7].

По сути, проект IOP-G позиционируется создателями как постепенное превращение окололунной станции в межпланетный корабль (точнее в его прообраз), поскольку одной из главных задач, выполняемых в течение его первых десяти лет полетного функционирования, является увеличение длительности автономного пилотируемого полета (полета без логистической поддержки с Земли). Например, если в начале эксплуатации экипаж должен будет находиться на борту IOP-G в течение примерно месяца-двух (то есть в течение периода, обеспечиваемого запасами пилотируемого корабля), то в дальнейшем при полете IOP-G, например, в точку либрации L1 системы Земля — Солнце пилотируемый полет планируется осуществить в течение одного года без возможности срочной эвакуации экипажа и без доставки грузов с Земли. И это действительно будет новым уровнем пилотируемых полетов, открывающим путь к межпланетным полетам в Солнечной системе. Напомним, на низкой околоземной орбите экипаж может при необходимости срочно вернуться на Землю в течение двух-трех часов.

Отдавая должное широте проекта IOP-G, его мультизадачности, трудно заметить, что орбитальное построение IOP-G, скажем так, весьма «неудобно» с точки зрения поддержки исследований именно Луны. Так, например, размерность взлетно-посадочных модулей (далее — ВПМ), требуемых для обеспечения грузопотока «Луна — орбита», как показывают расчеты [8] для NRHO более чем на 100% превышает размерность аналогичных по грузоподъемности ВПМ для низких круговых орбит (с высотой 100—400 км). При этом высоты орбиты IOP-G над поверхностью Луны столь велики, что ценность проведения, например,

дистанционных исследований Луны даже с перигейного участка орбиты NRHO вызывает большие сомнения (не говоря уже об апогейном участке).

Если оставить спор о приоритетах пилотируемых полетов (к Луне, астероидам, точкам либрации, к Марсу), продолжающийся в кругах специалистов уже как минимум 15 лет, а рассмотреть конкретную задачу исследования и освоения Луны, то проект IOP-G оказывается далеко не оптимальным — ни с точки зрения затрат, ни с точки зрения темпов научных, технических, технологических исследований, ни с точки зрения конкретно принятой реализации.

Максимальную научно-техническую ценность (знания, опыт) дает присутствие человека на поверхности Луны. Однако транспортировка человека на межпланетные расстояния, по опыту программы «Аполлон», в 20 раз превышает стоимость доставки аналогичного по массе «неживого» полезного груза.

Замена человека телеуправляемым роботом — популярное на текущий момент решение. Например, вот уже почти два десятилетия на поверхности Марса с Земли управляются несколько американских луноходов. Телеуправление марсианскими роботами производится в supervisory режиме, когда оператор не может отслеживать работу робота в реальном времени, а лишь задает последовательность одного или нескольких необходимых режимов автоматической работы и ждет сигнализации об их завершении для последующего планирования.

Гораздо больший интерес представляет копирующий режим, когда оператор работает в реальном времени и при определенном сенсорном оснащении, по сути, присутствует с помощью телеуправления на месте работы робота. Именно такое «телеприсутствие» позволяет исследователю получить наиболее полное представление о происходящем. Однако телеуправление роботами в копирующем режиме на поверхности Луны с Земли не всегда реализуемо из-за задержки сигнала на 2—3 с. Эксперимент «Learning», проведенный в 2013 году российской компанией НПО «Андроидная техника» и Институтом искусственного интеллекта DFKI (г. Бремен), показал, что при задержке прохождения сигнала на 45 мс управление в копирующем режиме антропоморфным роботом становится проблематичным. Эксперимент состоял в том, чтобы поочередно управлять через сеть Интернет двумя антропоморфными роботами, находящимися в г. Магнитогорск (Россия, робот SAR-401) и г. Бремен (Германия, робот Aila) операторами задающих устройств, находящимися в географически противоположных постах управления [9].

В некоторых задачах этот проблемный фактор с задержкой сигнала удается обойти. В частности, экипажам советских аппаратов «Луноход-1» и «Луноход-2» удалось управлять их передвижением на поверхности Луны [10]. Эта возможность проявилась благодаря относительной детерминированности (определенности, прогнозируемости, четкости) обстановки и выполняемых оператором стандартных алгоритмов. Но в реальной обстановке неопределенность условий и выполнения опера-

ций (недетерминированность) присутствует практически всегда. Пример — незапланированное завершение функционирования аппарата «Луноход-2» после более чем 39-километрового маршрута по Луне, [11]. Поэтому дистанционное управление роботами, находящимися на Луне, с помощью операторов, находящихся на поверхности Земли, хотя и возможно для решения некоторых задач, но не является универсальным решением.

Например, для выполнения роботом в копирующем режиме задач, связанных с точной моторикой, свойственной человеческим пальцам, потребуется физическое присутствие человека на расстоянии не более 112 500 км (с учетом результатов эксперимента «Learning» и длительности прохождения обратного сигнала). То есть, если исследования Луны требуют тонкой моторики человека (в частности, для установки научного и технического оборудования, его подключения, для ремонта техники, для профилактического обслуживания и т. д.), необходимо присутствие человека как минимум на окололунной орбите (если речь идет об исследованиях Луны). То есть для удаленного управления в режиме online (в том числе, в копирующем режиме работы робототехники) необходима окололунная орбита с высотой над поверхностью не более 100 000 км.

Таким образом, наличие орбитальной станции на низкой орбите у Луны позволяет реализовать концепцию «телеприсутствия» человека в любой точке поверхности без физической его высадки на Луну, а кроме того, в два раза снизить размерность взлетно-посадочных модулей (автоматических или пилотируемых), следующих на поверхность планеты. Реализация этого проекта обеспечит создание инопланетной базы в любом районе Луны, причем не одной, а их множества.

2. Орбитальные станции у Луны или у Земли

Существует мнение о том, что прямые полеты на поверхность Луны (или других планет) энергетически более рациональны, чем полеты через промежуточную орбитальную станцию. Еще одно мнение, обсуждаемое в публикациях на тему освоения Луны, — выгода использования околоземной станции на низкой орбите Земли при возвращении корабля от Луны на Землю. И то, и другое утверждение являются умозрительными, опирающимися на часть факторов, выделенных из множества. В реальных условиях некоторые факторы, роль которых на этапе проектирования либо непонятна, либо проигнорирована, могут оказаться определяющими. Их реальное значение можно установить только опираясь на детальные проектные баллистические расчеты, а также на практику космических полетов.

Так, например, для полетов космического аппарата на Луну вариант с переходом на орбиту станции и стыковка с последней, безусловно, связан с дополнительными энергетическими затратами. В зависимости от баллистического построения орбиты станции, эти затраты могут со-

ставлять от нескольких десятков до нескольких сотен метров в секунду характеристической скорости. Тем не менее при более детальном рассмотрении энергетически «выгодного» варианта прямой посадки на Луну выясняется, что для посадки в заданный район Луны с точностью в несколько сотен метров (а это для обслуживания напланетных аппаратов является обязательным условием) требуется обеспечить довольно длительное (несколько суток или несколько недель) фазирование КА на промежуточной окололунной орбите с постоянными коррекциями реактивными двигателями. Все это время КА расходует свой полетный ресурс и рабочее тело двигательной установки (далее — ДУ). В варианте со стыковкой к орбитальной станции КА после стыковки и до отделения от станции может находиться в режиме консервации или полетного тестирования. Более того, часть оборудования, топлива, которое требовалось КА для полета к Луне, но не потребуется на ее поверхности, может быть оставлено на борту станции в виде орбитального модуля. Это позволяет в разы увеличить массу научной и другой аппаратуры, доставляемой на поверхность [12].

Кроме того, поскольку орбита станции контролируется постоянно и может корректироваться с использованием двигателей малой тяги с высокими удельными импульсами тяги (на уровне более 1500 с, то есть с минимальной тратой рабочего тела на борту), окна для дат посадки КА и их возвращения на станцию можно определять очень точно. В сочетании с полярной лунной орбитой это обеспечит глобальный доступ с борта станции к любой точке на поверхности Луны. За счет небольшой высоты полета окололунной станции (например, для высот 100...200 км) размерность взлетно-посадочного модуля также может быть минимизирована. Сам ВПМ становится возможным создать в многоэтажном исполнении, а это в разы снижает грузопоток от Земли. В совокупности все эти вновь учтенные факторы полностью оправдывают некоторое увеличение запасов топлива на сближение и стыковку с окололунной станцией, что представлено на рисунке 1.

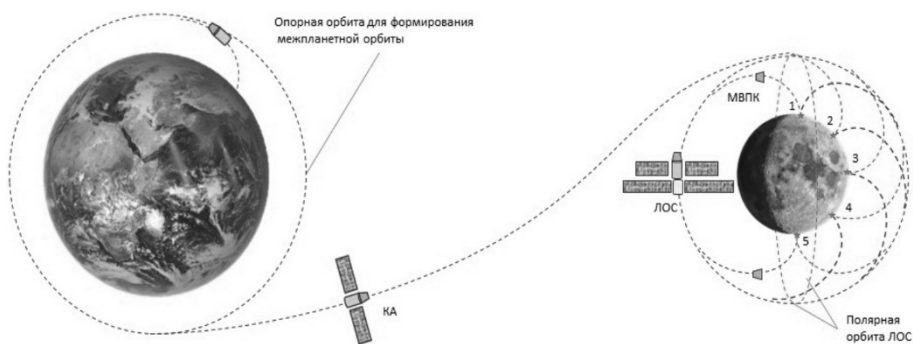


Рис. 1. Типовая миссия к Луне с использованием полярной лунной орбитальной станции:

1, 2, 3, 4, 5 — районы посадки многоэтажного взлетно-посадочного комплекса (МВПК)

Для полетов по маршруту «Луна — Земля» симметричное применение той же логики полетов уже через околоземную станцию на низкой орбите здесь не работает. В отличие от окололунной области, где прилетные скорости КА от Земли составляют не более 2,4 км/с (вторая космическая скорость для Луны), возвращение КА от Луны происходит со скоростями, близкими ко второй космической для Земли — порядка 11,1...11,2 км/с [13].

При этом Земля обладает атмосферой, несопоставимой по плотности с «атмосферой» Луны. Это означает, что при возвращении аппарата от Луны возникают проблемы с тепловыми нагрузками прохождения КА в атмосфере, с механическими перегрузками на конструкцию, с точностью обеспечения «коридора» входа в атмосферу для выдерживания требований по точности посадки. В работе [14] показано, например, что если при прямом возвращении КА на Землю от Луны точность посадки спускаемого аппарата сегментально-конической конфигурации в районе нового космодрома «Восточный» может быть баллистически обеспечена с минимальной широтной «невязкой» на уровне менее $0,0011^\circ$, то для варианта использования технологии торможения в атмосфере с повторным входом в атмосферу точность посадки не обеспечивается вовсе — из-за неопределенности условий входа в атмосферу при повторном входе аппарата в атмосферу, как показано на рисунке 2.

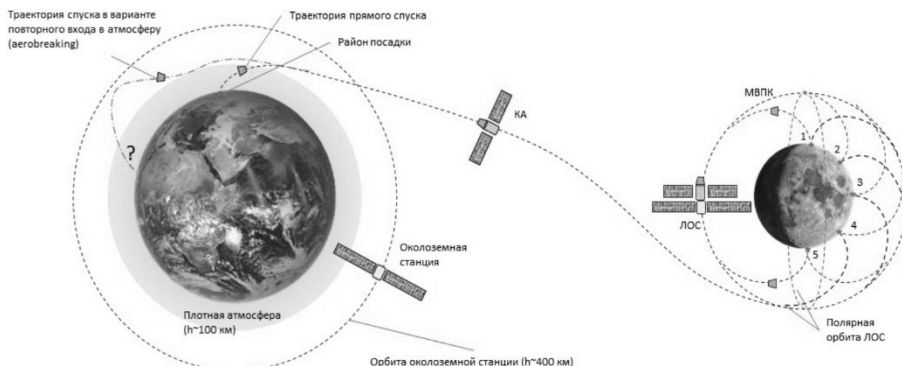


Рис. 2. Типовые схемы возвращения КА от Луны на Землю

Рассмотрим вариант перелета КА от Луны не напрямую на Землю, а на НОО, где находится орбитальная станция. Неизбежно возникает вопрос, каким образом КА может оказаться на этой орбите. Это возможно лишь в двух вариантах: либо КА прибывает к Земле по технологии торможения в атмосфере с использованием множества маневров (скорее всего, активных, корректирующих), либо по технологии «медленных» перелетов — на малой тяге, с длительным фазированием и плавным изменением высоты орбиты. В первом случае остается открытым вопрос о том, каким образом при технологии торможения в атмосфере обеспечить точность прибытия в область станции, причем в условиях, когда сама станция является подвижным объектом. На этот вопрос пока

ответа нет. Во втором случае становится очевидным, что речь не может идти о грузах, нуждающихся в оперативной доставке, тем более о пилотируемых полетах. Необходимость орбитальных околоземных станций, взаимодействующих с КА на малой тяге, пока также неясна при наличии альтернативы обслуживания такого рода КА с помощью автоматических либо пилотируемых кораблей.

Таким образом, если роль окололунной станции вполне просматривается в качестве промежуточного транспортировочного узла (а также станции телеуправления робототехникой на поверхности), то роль околоземной орбитальной станции пока выглядит в целом неубедительно, особенно при обосновании ее использования на трассах «Луна — Земля». Использование станции на НОО для сборки лунных экспедиционных комплексов до их отправки к Луне вероятно [15]. Этот вид работ для станций на НОО еще мало исследован, хотя в последнее время часто заявляется в числе основных при обосновании замысла новых околоземных станций.

3. Функции лунной орбитальной станции

Лунная орбитальная станция (ЛОС) — совершенно новый объект проектирования, отличающийся от прошлых и существующих станций на НОО. Учитывая сложнейшую логистику этого объекта и изменчивость (динамичность) его задач во времени, можно утверждать, что речь идет не только и не столько о пилотируемой (или посещаемой человеком) станции, сколько об автоматическом (преимущественно беспилотном) модульном объекте. Если проанализировать актуальные задачи ЛОС, просматриваемые в ближайшие 50—100 лет, то логично сформулировать несколько важных свойств, актуальных с самого начала эксплуатации ЛОС и пролонгируемых во времени, которыми она должна обладать. Это способности:

- к поддержанию заданной орбиты и проведения ее коррекции;
- к стыковке с несколькими космическими аппаратами одновременно и их энергоснабжению в составе станции;
- к заправке состыкованных аппаратов, включая транзитные заправки (от аппарата к аппарату) через станцию;
- к реконфигурации для обеспечения решения различных задач, а также для неограниченного во времени существования самой станции (свойство открытой архитектуры);
- к ретрансляции сигналов с обеспечением каналов связи между Землей и поверхностью планеты.

Каждая функция, обеспечиваемая ЛОС, нуждается в отдельном и детальном рассмотрении. Эти функции и следующие за ними особенности построения ЛОС частично были рассмотрены в работе [16] применительно к оценке состава модулей, их массы и динамики изменения массы станции.

В настоящей работе особое внимание уделено обеспечению функций поддержания заданной орбиты и проведения ее коррекции — от нее зависит целесообразность реализации остальных. Однако и расчет других функций также необходимы некоторые комментарии. Так, например, для того, чтобы дать предварительные оценки массы ЛОС, в упомянутой работе [16] приведен предварительный состав модулей лунной станции, которые на разных этапах эксплуатации с высокой степенью вероятности будут востребованы на ее борту.

В общем случае ЛОС может включать в себя некоторые модули, представленные ниже на рисунке 3:

- 1) энергодвигательный модуль (два варианта размерности — ЭДМ 1 и ЭДМ 2);
- 2) танкер-заправщик (ТрЗ);
- 3) многоразовый пилотируемый взлетно-посадочный комплекс (МПВПК);
- 4) многоразовый беспилотный взлетно-посадочный комплекс (МБВПК);
- 5) узловой модуль для беспилотных миссий (УМб);
- 6) узловой модуль для пилотируемых миссий (УМп);
- 7) жилой модуль (ЖМ);
- 8) пилотируемый транспортный корабль (ПТК) «Орёл»;
- 9) модуль-стапель (МСт);
- 10) складской модуль (СкМ).

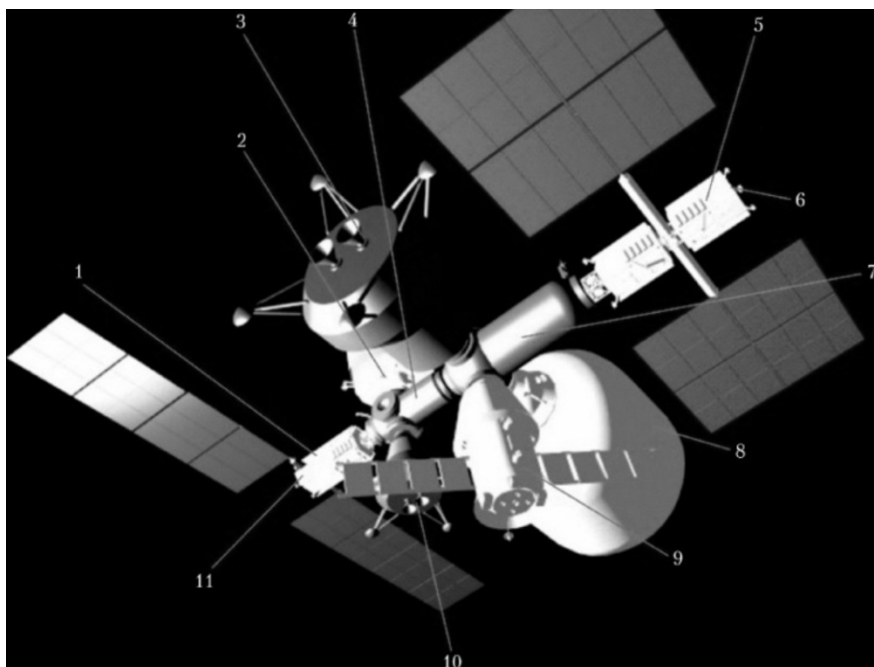


Рис. 3. Некоторые модули лунной станции:
1, 5 — ЭДМ1, ЭДМ2; 2 — ТрЗ; 3, 10 — МПВПК, МБВПК; 4, 7 — УМб, УМп;
8 — жилой модуль; 9 — пилотируемый транспортный корабль «Орёл»;
6, 11 — двигатели ЭДМ2 и ЭДМ1 соответственно

Данный состав модулей (кораблей, комплексов) в различной комбинации друг с другом обеспечивает, по сути, все возможные задачи по изучению и освоению Луны на ближайшие 50—100 лет. Минимально необходимые способности ЛОС (из перечисленных выше) обеспечивают:

- энергодвигательный модуль;
- танкер-заправщик,
- узловой модуль для беспилотных миссий,
- узловой модуль для пилотируемых миссий.

Эти объекты обеспечивают смысл создания ЛОС на любом этапе ее эксплуатации. По мере развития масштаба исследований, освоения Луны состав модулей ЛОС будет в соответствии с необходимостью новых функций изменяться.

Соответственно будет меняться и масса ЛОС. По оценочным данным [16], масса ЛОС может изменяться в пределах от 26 до 109 т. При этом предполагалось, что каждый модуль специализирован под обеспечение одной или нескольких связанных между собой функций. Это означает, что состав модулей, кораблей оптимизирован и оценочные их массы минимизированы. Если же использовать модули с комбинированным набором функций, слабо связанных между собой (так называемые *универсальные* или комплекслируемые по решаемым задачам модули), то масса ЛОС неизбежно увеличится. Это связано с тем, что при комбинации выполнения не одной, а нескольких слабо связанных между собой функций, размерность обеспечивающих систем (таких как системы электроснабжения, системы терморегулирования, бортовой вычислительной системы, системы управления бортовым комплексом, радио-телекоммуникационной системы, конструкции, бортовой кабельной сети) растет, поскольку увеличивается количество абонентов для каждой из них.

Увеличение массы ЛОС — не единственное негативное следствие применения универсальных (комбинированных по функциям) модулей. Второе (и, пожалуй, главное) негативное следствие комплексирования задач для модулей — попытка разработчика каждый раз приспособливать модуль под «новые» задачи и тем самым открывать новую опытно-конструкторскую работу (далее — ОКР). Новая ОКР, как правило, на порядок увеличивает стоимость работ проекта. На деле же под «новыми» задачами практически всегда подразумевается комбинация старых (известных) задач в новых пропорциях между собой.

В случае специализации модулей разработчик по каждому модулю (обеспечивающему какую-то определенную функцию — всего их порядка десяти) открывает ОКР, выполняет его, а дальше занимается промышленным производством этих модулей — их серийным тиражированием и планомерной (по мере необходимости, технологического развития) модификацией. Эффект от такого подхода может многократно превзойти экономический эффект от оптимизации транспортируемых в межпланетных перелетах масс, который, как уже было сказано, также следует искать в рамках подхода *специализации* каждого элемента создаваемой инопланетной инфраструктуры.

4. Концепция комплексного изучения других планет солнечной системы с применением станционной инфраструктуры

Вывод, который логично следует из изложенного выше, следующий. Под «лунной базой», в первую очередь, следует понимать орбитальную лунную (околопланетную) станцию, обладающую глобальными возможностями по дистанционному управлению робототехникой в любых районах поверхности, а также по обеспечению логистики всех грузов и пилотируемых кораблей, которые следуют на поверхность и обратно.

Обратимся к вопросу комплексного изучения других планет Солнечной системы. В работе [17] рассматриваются различные схемы организации научных экспедиций автоматических КА к планетам Солнечной системы, а именно:

- на пролетных траекториях;
- с орбит спутника планеты;
- с высадкой зондов на планету;
- с использованием многоразовых взлетно-посадочных комплексов и орбитальных танкеров-заправщиков.

В работе обосновываются преимущества реализации схем исследования с использованием многоразовых взлетно-посадочных комплексов и орбитальных танкеров-заправщиков (рис. 3) в сравнении с остальными схемами, уже реализованными в истории космических полетов.

Суть способа состоит в том, что создается комплекс из двух космических аппаратов: орбитального танкера-заправщика (далее — ОТЗ) и многоразового взлетно-посадочного комплекса (далее — МВПК), как показано на рисунке 4. При полете к месту назначения — к планете — оба КА составляют единое целое — межпланетный комплекс (далее — МК). После прибытия в сферу тяготения планеты КА отделяются друг от друга. ОТЗ переходит на околопланетную орбиту (например, полярную, обеспечивающую наблюдение всех районов планеты — глобальную фотосъемку, картирование, радиолокационную съемку).

МВПК осуществляет спуск в заранее или оперативно выбранный район планеты и производит высадку, в процессе которой использует комплекс научных инструментов для контактных и бесконтактных исследований вещества, а также для панорамной съемки с высоким разрешением. МВПК, имея некоторый запас топлива на борту, может совершать локальные перелеты на расстояния от сотен до нескольких тысяч километров (так называемые прыжки). В процессе каждого такого прыжка осуществляется фото- и видеосъемка по маршруту (направлению) прыжка. Высота прыжка может регулироваться за счет глубокого дросселирования (изменения тяги) двигателей МВПК. В зонах радиовидимости орбитального танкера-заправщика с борта МВПК передается необходимая научная и служебная информация на борт ОТЗ для по-

следующей передачи на Землю (в составе ОТЗ предусмотрен мощный радиокомплекс). Использование прыжков МВПК позволяет отказаться от использования роверов и других мобильных средств (планеров, дронов, аэростатов), управление которыми на больших расстояниях от Земли требует, по сути, создания автономных интеллектуальных систем. Использование же реактивной тяги — универсального способа передвижения — имеет очевидные преимущества от других способов передвижения на планетах.

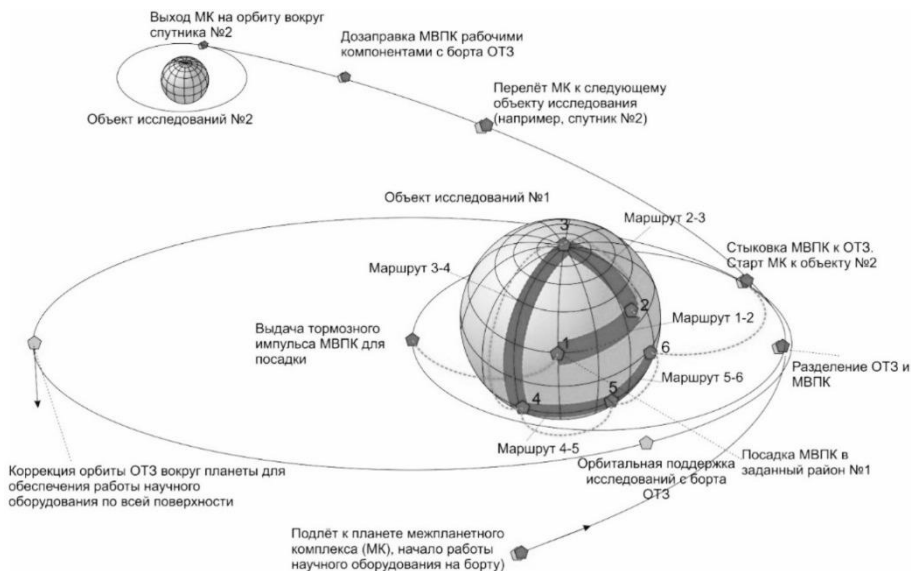


Рис. 4. Схема исследования системы планеты с использованием многоразовых взлетно-посадочных комплексов и орбитальных танкеров-заправщиков

Межпланетный комплекс, таким образом, совмещает в своем составе «станционную» часть (это орбитальный танкер-заправщик) и «корабельную» (это многоразовый взлетно-посадочный комплекс). Реализация изображенной на рисунке 4 схемы позволяет приобрести комплексные научные знания о планете. Например, в случае обозначенных на рисунке шести высадок МВПК на поверхность планеты ученые могут получить множество контактных (инопланетных) данных с трех широт планеты (включая полярную и экваториальную) и с трех-пяти меридианов. В дополнение к контактным инопланетным исследованиям схема реализует также исследования глобального дистанционного зондирования планеты с возможностью коррекции маршрута перемещений «прыгающих» взлетно-посадочных комплексов с борта ОТЗ. Такого рода схемы исследований вполне могут соперничать с пилотируемыми полетами к планетам по качеству и количеству получаемых научных данных, не говоря уже о несопоставимом превышении трудоемкости пилотируемых полетов по отношению к миссиям автоматических КА.

Как видим, предлагаемая схема инопланетного исследования, изображенная на рисунке 5, — не что иное, как вариант использования инопланетной орбитальной станции (далее — ИОС) аналогично варианту использования ЛОС. Орбитальный танкер-заправщик — это, по сути, связка из трех модулей (ТрЗ + ЭДМ2 + УМб), описанных в работе [16], адаптированная к условиям планеты назначения. МВПК — вариант МБВПК 1, адаптированный к планете назначения.

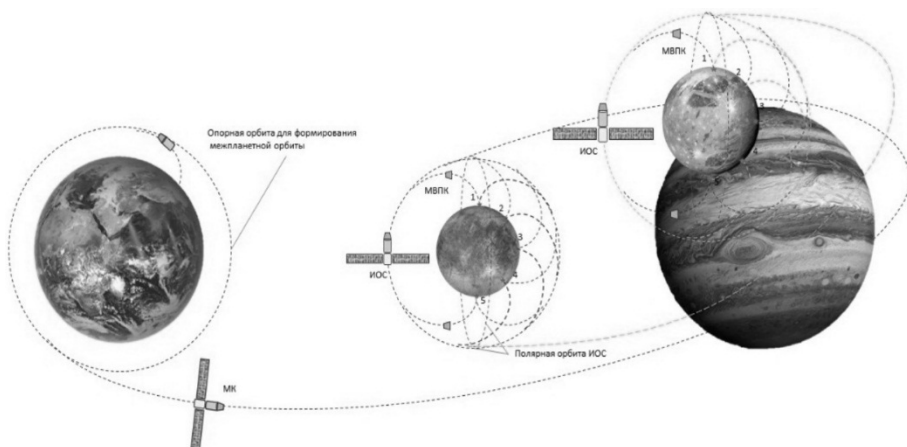


Рис. 5. Использование инопланетных орбитальных станций при полете в систему Юпитера:
1, 2, 3, 4, 5 — порядковые номера мест посадки на спутники Юпитера Европу и Ганимед

Разумеется, важным вопросом реализации этой схемы полетов является количество топлива на борту ОТЗ (более конкретно, ТрЗ) и МВПК. Необходимая общая масса топлива для реактивных двигателей МВПК при спуске на планету, «прыжках» и при возвращении к ОТЗ может составлять тонны и даже десятки тонн. Тем не менее если предположить, что ОТЗ будет доставляться к планете с использованием множества электроракетных двигателей малой тяги с высоким удельным импульсом (например, типа СПД-140 с удельной тягой около 2800 с), то на его борту вполне реально доставить к планете достаточное количество стабильного реактивного топлива. Кроме того, возвращение МВПК на ОТЗ после последней запланированной точки посадки можно и не проводить, если его ресурс будет к этому времени исчерпан. Если же ресурс МВПК будет позволять и дальше его эксплуатировать, он может быть законсервирован на борту ОТЗ до момента доставки с Земли дополнительного топлива.

У предлагаемой схемы исследований раскрываются совершенно новые (дополнительные) перспективы, если предположить, что на планете или в ее окрестностях будет найдено топливо естественного происхождения для реактивных двигателей МВПК, а также для электроракетных двигателей (далее — ЭРДУ) ОТЗ. Таким топливом может быть

метан, водород, гелий, азот. В атмосфере спутников планет-гигантов (и самих этих планет) эти вещества можно найти в неисчерпаемых количествах. Например, в атмосфере Юпитера содержится 92,5% водорода, 7,2% гелия [18]. В атмосфере Титана (спутника Сатурна) содержание азота достигает 98,4%, а метана — 1,6% [19]. В атмосфере Плутона содержится 98...99% азота. В таблице даны обобщенные сведения из имеющихся источников по содержанию газов в атмосферах некоторых планет Солнечной системы и их наиболее крупных спутников.

Состав газов в атмосферах некоторых планет

Планета (спутник)	Водород, %	Метан, %	Гелий, %	Азот, %	Кислород, %	CO ₂ , %	Тип атмосферы (давление на поверхности, бар)
Юпитер	89...92,5	~1	7,2...10	<1	<1	<1	Плотная (>1000)
Юпитер (Европа)	1	...	...	...	99	...	Разряженная (1×10^{-9})
Юпитер (Ганимед)	<1	...	...	...	99	...	Разряженная ($0,2...1,2 \times 10^{-8}$)
Юпитер (Каллисто)	...	...	...	...	...	>90	Разряженная ($7,5 \times 10^{-10...-12}$)
Юпитер (Ио)	...	...	...	...	<1	...	Разряженная, вблизи вулканов переменноплотная* (0,33...3,0)
Сатурн	93...96,3	<1	<3,2...7	<1	<1	<1	Плотная (>1000)
Сатурн (Титан)	<1,6	1,6...5	<1	95...98,4	<1	<1	Плотная (1,5)
Сатурн (Энцелад)	<1	1,7	<1	4	<1	3,2	Разряженная, переменная** (н/д)
Уран	83	<2	15	...	...	...	Плотная (>100)
Уран (Титания)	...	...	...	...	...	>90	Разряженная, сезонная (10^{-13})
Нептун	77...83	1...2	16...22	<1	<1	<1	Плотная (>1)
Нептун (Тритон)	...	0,025	...	>99	...	...	Разряженная ($4...6,5 \times 10^{-5}$)
Плутон	<1	0,25	<1	98...99	<1	<1	Разряженная, сезонная (10^{-5})

Примечание. * — состоит преимущественно из вулканических газов (90% SO₂, менее 10% SO); ** — на 91% состоит из водяного пара.

Как видим из таблицы, планеты-гиганты могут служить неисчерпаемыми источниками водорода и гелия, а их спутники — источниками азота, метана, кислорода, двуокиси углерода, воды.

Технология извлечения необходимых газов из атмосферы планет на борту КА пока не разработана. Однако это представляется вполне реализуемым техническим вопросом. В случае разработки такой технологии (накопления и использования природных газов на борту КА) схемы

полетов упомянутых межпланетных комплексов (в составе с ОТЗ и МВПК) могут быть реализованы многократно одними и теми же космическими аппаратами, что раскрывает большие возможности комплексного изучения Солнечной системы, представленные на рисунке 6. Причем задолго до появления возможности пилотируемых полетов к исследуемым объектам.

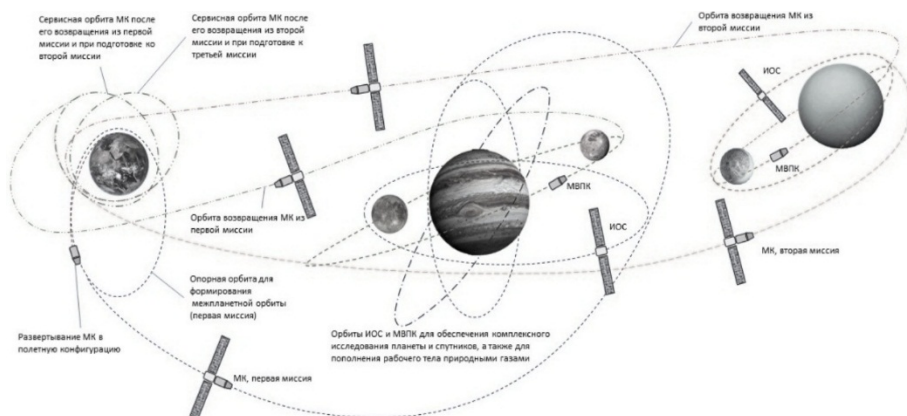


Рис. 6. Использование многоразовых межпланетных комплексов для исследований систем Юпитера и Урана

Рабочим телом для ЭРДУ ОТЗ могут быть гелий, азот. Накопление этих естественных газов на борту ОТЗ в области планеты-гиганта и ее спутников может создать условия для возвращения МК к Земле на малой тяге, например, для доставки образцов грунта с исследуемых планет. При возвращении МК в область Земли пилотируемая экспедиция может обслужить его, провести необходимую модернизацию и подготовить комплекс к повторному использованию. В таком случае космическая техника для автоматических исследовательских аппаратов Солнечной системы (вслед за средствами выведения и за пилотируемыми кораблями, где это уже реализовано) также становится многоразовой.

При использовании ОТЗ в качестве ИОС не реализуется возможность телеоператорного управления робототехникой в режиме реального времени (когда оператор находится на борту «станции» и управляет робототехникой, размещенной на МВПК). Это отличает ИОС от ЛОС, где, напротив, присутствие человека вполне ожидаемо. Тем не менее даже при отсутствии такой возможности (что с большой вероятностью будет все же временной ситуацией) схема представляется прогрессивной. В случае ОТЗ (ИОС) робототехника на борту МВПК будет типовая, выполняющая стандартные операции научных исследований, и полностью автоматизированная, с элементами систем искусственного интеллекта (далее — ИИ), таких как:

- измерения физических условий на планете;
- изучение химического состава атмосферы и грунта;
- взятие проб грунта, жидкостей, газов;

- фото- и видеозапись среды;
- зондирование глубин грунта с использованием буровых установок, электромагнитных зондов и т. д.

Набор такого рода инструментов уже вполне сформировался в среде ученых и требует лишь технического совершенствования и унификации.

Ключевой элемент орбитальных лунных и инопланетных станций — энергодвигательный модуль, обеспечивающий коррекцию орбиты ЛОС или МК, полетное энергоснабжение других модулей, а также каналы связи и ретрансляции сигналов. Рассмотрим, каким образом может быть создан этот модуль, например, в варианте использования для ЛОС.

5. Двигательные установки энергодвигательных модулей для лунной орбитальной станции

Освоение Луны потребует развитой инфраструктуры технических средств поддержки [20], перечень которых представлен на рисунке 7.

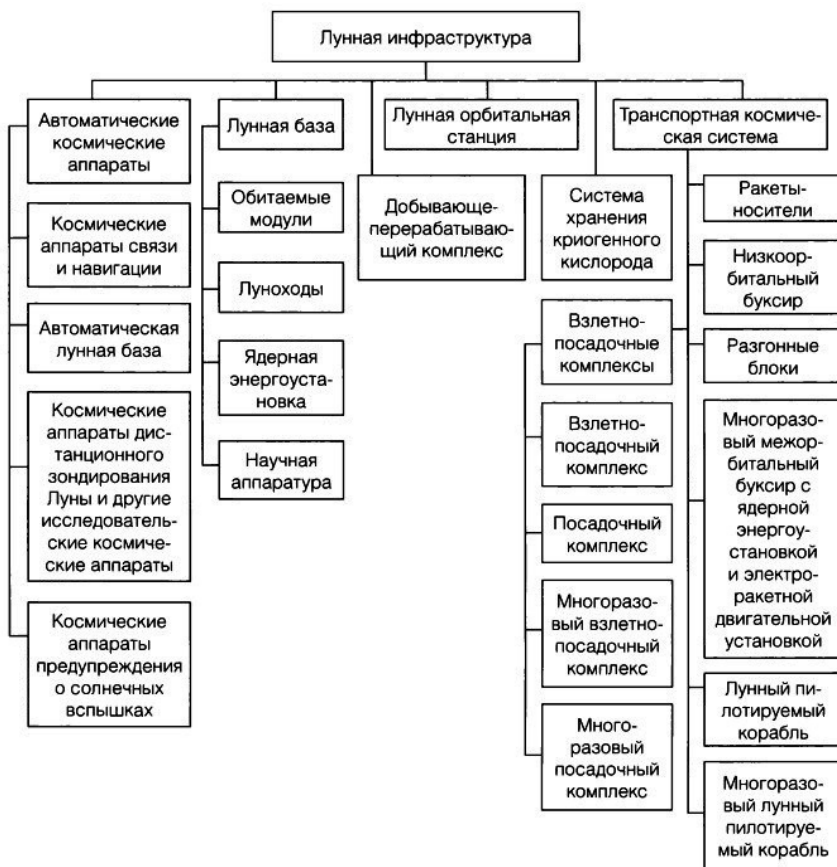



Рис. 7. Перечень объектов космической инфраструктуры для исследования Луны и планет

Одной из важнейших составляющих является лунная орбитальная станция. Представленный выше на рисунке 3 проект лунной орбитальной станции предусматривает ее размещение на низкой круговой орбите высотой 200 км над поверхностью Луны. При такой орбите, как отмечалось, будет достигнута экономия массы МПВПК и МБВПК. С такой орбиты с минимальной задержкой сигнала можно управлять в реальном времени роботами на поверхности Луны. При этом дистанционное зондирование поверхности с такого расстояния можно проводить с высоким разрешением.

В исследовании [8] указано, что отрицательной чертой низкой круговой орбиты является необходимость корректировки орбиты станции, вызванной рядом причин, в первую очередь неоднородностями гравитационного поля Луны, так называемыми лунными масконами. Необходимое для корректировки приращение скорости станции в год оценивается в 70 м/с. Дороговизна доставки топлива к лунной орбитальной станции для коррекции ее орбиты «подсказывает» использование двигательных установок с высоким удельным импульсом, основанных на стационарных плазменных двигателях (далее — СПД), использующих энергетику, получаемую от солнечных батарей (далее — СБ). Исходя из этого, целесообразно использование в составе станции так называемого энергодвигательного модуля (далее — ЭДМ), обеспечивающего энергией от СБ все системы станции, и содержащий в своем составе двигательную установку.

В работах [8; 21] был рассмотрен СПД-140. Показано, что 1 т ксенона хватит на 10 лет поддержания орбиты при массе станции 26 т (вариант автоматической станции). К настоящему моменту в АО «ОКБ «Факел»» проведены испытания модернизированного двигателя СПД-140М с улучшенными характеристиками, работающего как на ксеноне, так и на более дешевом и доступном криптоне [22]. Ниже, на рисунке 8, представлен внешний вид этого двигателя (слева) и его характеристики (справа). Видно, что на текущий момент удалось форсировать работу двигателя и достичь при мощности разряда 8 кВт значения удельного импульса тяги 2800 с, что соответствует скорости истечения потока рабочего тела около 27 км/с.



Параметры СПД-140М	Значение при мощности разряда, кВт:		
	6	6	8
Напряжение разряда, В	400	750	700
Тяга, мН	335	230	340
Удельный импульс тяги, с	2240	2715	2800
Масса, кг	≤ 8,1		
Ресурс прогнозируемый, ч	> 25000		
Статус	Лабораторная модель		

Рис. 8. Внешний вид и характеристики СПД-140М

Важной чертой является прогнозируемый ресурс работы двигателя в 25 000 ч, а это почти 3 года непрерывной работы. Такой высокий ресурс основывается на большой истории отработки и испытаний этих двигателей и выступает наиболее значительным подтвержденным при летных испытаниях: к настоящему моменту безотказно эксплуатируются более 100 двигателей СПД-140, это самый мощный серийно выпускаемый двигатель с подтвержденной летной историей [23—25].

Ниже, на рисунках 9 и 10 показаны характеристики — графики зависимости тяги и удельного импульса тяги двигателя СПД-140М от напряжения разряда.

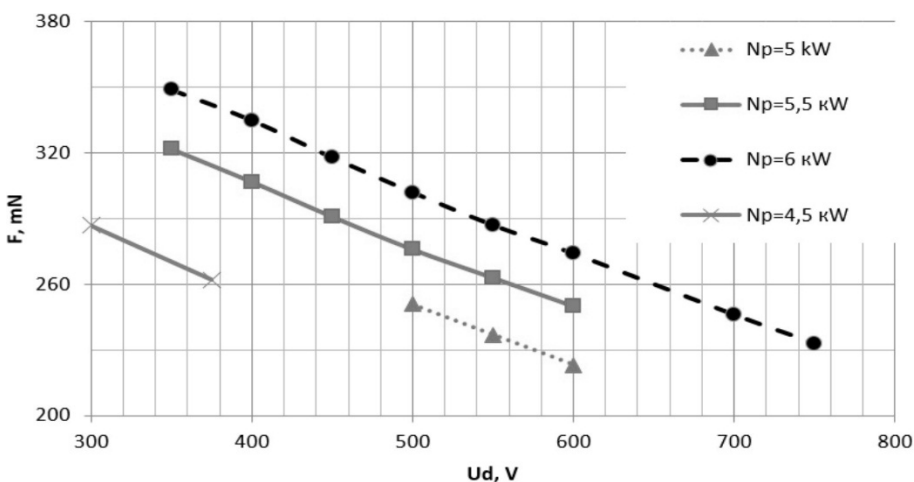


Рис. 9. Зависимость тяги СПД-140М от напряжения разряда

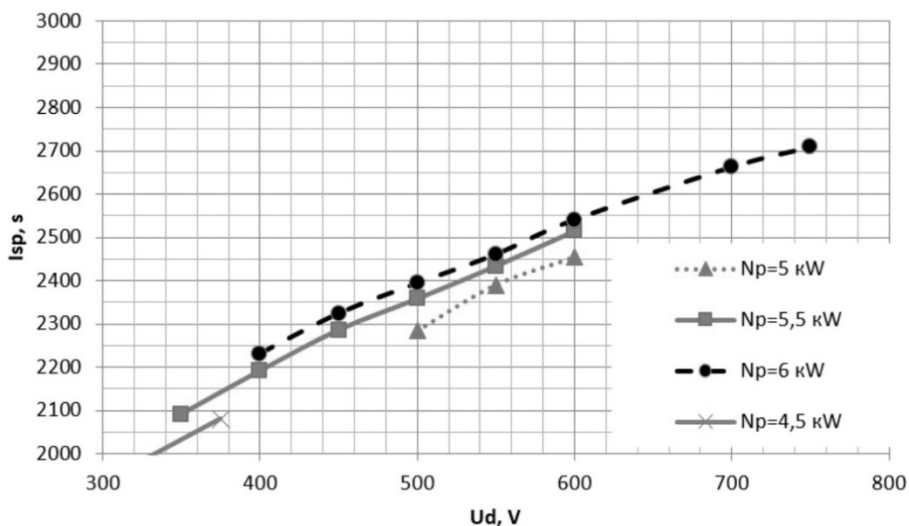


Рис. 10. Зависимость удельного импульса тяги СПД-140М от напряжения разряда

В АО «ОКБ «Факел»» имеются конструкторские проработки двигательных блоков на поворотном устройстве. Такой блок позволяет управлять направлением вектора тяги двигателя СПД, фактически добавляя функции двигательной установки системы ориентации. На рисунке 11 представлен общий вид такого двигательного блока.



Рис. 11. Общий вид двигательного блока ITU140 на поворотном устройстве

Соответственно, в работе [8] ДУ с таким двигательным блоком на базе СПД-140 предполагалась для ЭДМ1, работающего на начальном этапе существования станции, когда в ее состав включены только модули, обеспечивающие ее функционирование в автоматическом режиме. Далее, в работах [26—28] был представлен облик ДУ для ЭДМ2 — модуля большей массы и энергетики, обеспечивающего энергией станцию, когда в ее состав введены все модули, в том числе и для обеспечения пилотируемых миссий с блоком ITU140M. В этом случае предполагалось, что масса станции при полном развертывании увеличится до 109 т, для корректировки ее орбиты потребуется больше рабочего тела и будут необходимы три таких двигательных блока. Ниже, на рисунке 12, показаны ДУ для ЭДМ1 и ЭДМ2.

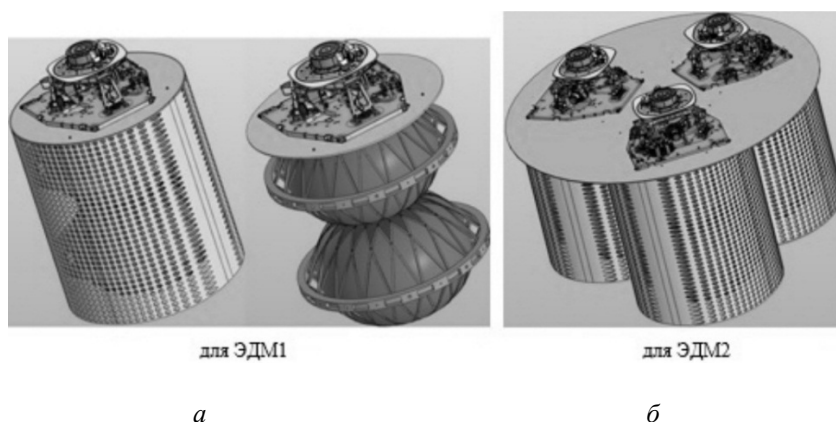


Рис. 12. Общий вид (облик) двигательной установки ЭДМ лунной станции:
а — ЭДМ1 - с одним двигателем; *б* — ЭДМ2 — с тремя двигателями

В качестве баков для таких ДУ предполагается использовать композитные баллоны высокого давления (КБВД) разработки АО «Решетнёв», вмещающие до 350 литров ксенона, показанные на рисунке 12: в правой части рисунка с ДУ для ЭДМ1 обечайка корпуса убрана и под посадочной плитой с ДУ видны два таких баллона.

Ранее на рисунке 3 было показано, что ЭДМ 1 (1) расположен с левой стороны комплекса станции, а ЭДМ 2 (5) — с правой. Соответственно, двигатель ДУ ЭДМ1 (11) направлен влево, а двигатели ДУ ЭДМ 2 (6) — в противоположную сторону. Предполагается следующий сценарий наращивания структуры станции. Сначала на орбиту вокруг Луны выводится ЭДМ1 массой около 5 т [8]. Далее к нему стыкуется узловой модуль для беспилотных миссий (4). Уже к нему стыкуются танкер-заправщик (2) и многоразовый беспилотный взлетно-посадочный комплекс (10). Таким образом происходит формирование левой, беспилотной, части станции общей массой до 26 т.

Далее формируется правая часть, обеспечивающая пилотируемые миссии: к УМб (4) пристыковывается узловой модуль для пилотируемых миссий (7), к которому могут пристыковываться многоразовые пилотируемые взлетно-посадочные комплексы (3) и пилотируемый транспортный корабль (9). К УМп пристыковывается и ЭДМ2 (5). При этом, как уже упоминалось, двигатели ДУ ЭДМ2 направлены в противоположную сторону. Поэтому после исчерпания ресурса двигателя и полного израсходования рабочего тела в ЭДМ1 станция будет развернута на 180° и продолжит работу на двигателях ЭДМ2 (6). Эта концептуальная модель может быть скорректирована: например, с точки зрения обеспечения надежности сохранения станции как дорогостоящего объекта, уже на ЭДМ1 также могут быть установлены три двигательные установки, как сейчас принято для ЭДМ2.

Следует отметить, что предлагается вариант размещения орбитальной окололунной станции на круговой полярной высокой окололунной орбите (далее — ВЛО) с высотой от поверхности Луны 10 000 км [29; 30]. Такая орбита имеет определенные преимущества, обусловленные небесной механикой. Ранее заявленные преимущества низкой круговой орбиты, как оптимальной для доставки грузов на поверхность и с поверхности на орбиту остаются за ней. При этом в работе [20] именно низкая окололунная орбита высотой 100 км рассматривается как наиболее подходящий вариант для использования орбитальной окололунной станции и как будущего космопорта — места, откуда будут стартовать миссии к другим планетам Солнечной системы. Это станет возможным при определенном уровне освоения Луны: в случае, если на ее базах будет налажено производство компонентов топлива или рабочих тел для космических двигателей.

В работе [20], вышедшей 15 лет назад, произведен подробный анализ многих объектов космической инфраструктуры для исследования Луны, представленных на рисунке 7. В частности, орбитальная окололунная станция анализируется не только как космопорт. Произведен подробный, тщательный, многостраничный анализ средств жизнеобеспечения такой орбитальной станции. За последнее время не наблюдается иных публикаций (кроме упомянутых) о какой-либо проработке этого вопроса. Было только одно краткое сообщение «Роскосмоса», что лунная орбитальная станция планируется. Можно предположить, что сейчас все ресурсы РКК «Энергия» направлены на создание Российской орбитальной станции (далее — РОС). После достижения определенных результатов в этом направлении, очевидно, этот опыт и эти конструкторские решения будут использованы и для создания ЛОС.

6. Двигательная установка буксира на солнечной энергетике для перелетов между околоземной орбитой и лунной орбитальной станцией

В уже упоминавшейся фундаментальной и системной работе [20] имеется целая глава, посвященная транспортной космической системе обеспечения существования лунной и окололунной инфраструктуры. В ней два параграфа из шести посвящены многократным электроракетным буксирам и оптимизации параметров многократного электроракетного буксира, что составляет почти половину объема главы. Это показатель того, что важность использования электроракетных двигателей с высоким удельным импульсом тяги для логистики к Луне и обратно была оценена еще 15 лет назад.

За прошедший период такие двигатели получили широкое распространение, в том числе для довыведения и разведения аппаратов современных спутниковых группировок [23—25]. Более 100 двигателей

СПД-140 были использованы для довыведения спутников с массой несколько тонн с геопереходной на геостационарную орбиту. В 2015—2022 годах в АО «ОКБ «Факел»» был создан и испытан мощный двигатель СПД-230, специально рассчитанный для планетолета на ядерной энергетике. Этот двигатель при мощности до 25 кВт показал значение тяги до 1 Н и удельный импульс тяги до 3200 с, то есть скорость истечения рабочего тела достигла 31 км/с.

В последние годы в Интернете получили распространение ролики, показывающие конструкцию и миссию так называемого атомного ракетолета «Зевс», выходили статьи в научно-популярных журналах. На выставке «Армия-2024» летом 2024 года в павильоне «Космос» на ВДНХ Санкт-Петербургское КБ «Арсенал» представило макет такого аппарата, показанный на рисунке 13.

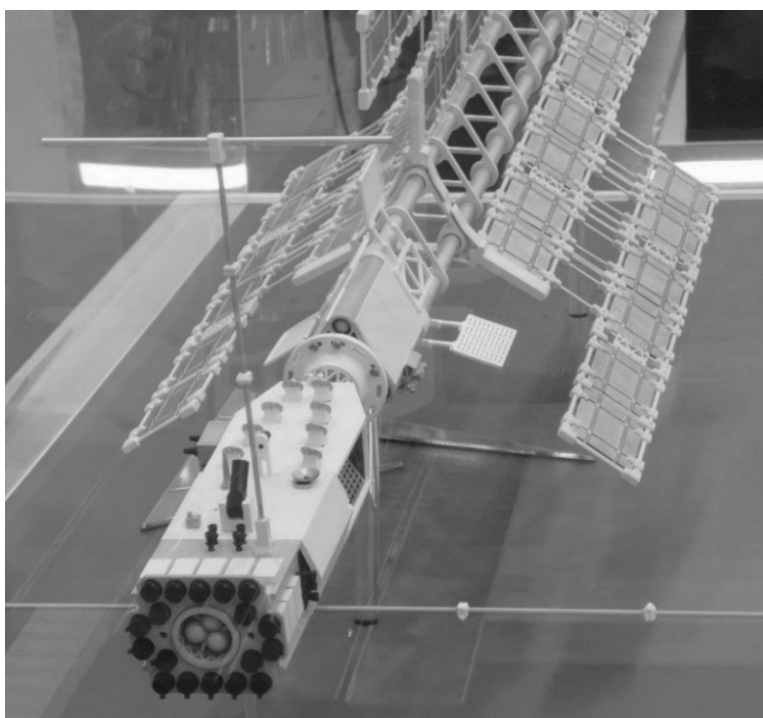


Рис. 13. Общий вид проекта ядерного буксира на основе СПД-230

На дальнем конце конструкции (на фотографии не виден) расположен атомный реактор мощностью около 500 кВт. Показанные на фото от верхнего края до центра ажурные конструкции — фермы системы охлаждения реактора, разработанные специально для работы в невесомости. От центра к переднему краю располагается блок полезной нагрузки, а на переднем торце — двигательная установка. Более подробный ее вид представлен ниже, на рисунке 14. Это вид уже другого отдельного макета. Здесь в отличие от предыдущего рисунка, посадочный фланец двигателей окрашен в черный цвет, а двигатели — в сереб-

ристый. На оконечном фланце установлены 18 двигателей СПД-230 (наружные магнитные катушки на макетах не имеют обмоток, установлены только сердечники). В центре находятся баки хранения ксенона. Номинальная мощность двигателя СПД-230 — 15 кВт с возможностью форсирования до 25 кВт, совокупное энергопотребление 18 двигателей составляет 450 кВт, остальные 50 кВт, вырабатываемые ядерным реактором идут на другие цели.

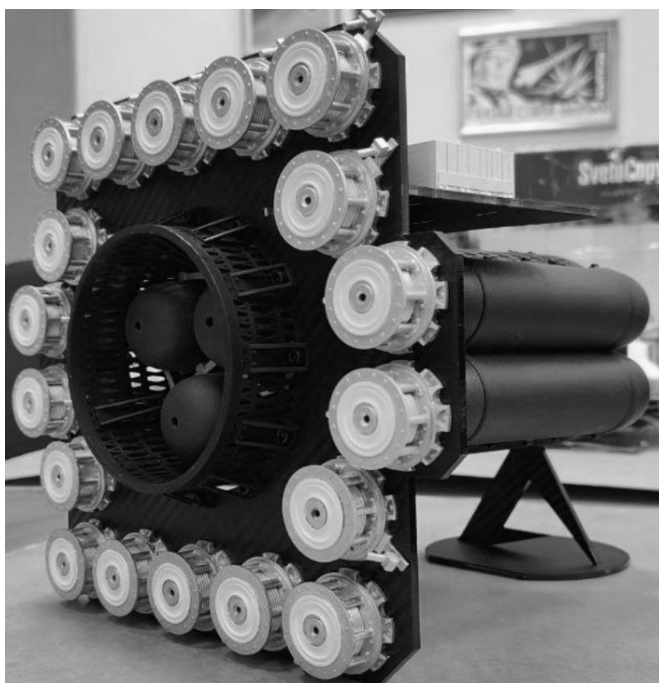


Рис. 14. Общий вид макета ДУ ядерного буксира на базе СПД-230

В апреле 2025 года было подписано соглашение «Роскосмоса» с Курчатовским институтом по ядерной космической программе [31]. Указывается, в частности, что будет запущен новый федеральный проект «Космический атом». Это касается ядерных энергетических установок и для космических буксиров, и для станции на поверхности Луны. В июне 2025 года в одном из выступлений президент озвучил актуальность такой программы.

После реализации проекта будет создан мощный инструмент освоения Солнечной системы: такой буксир сможет лететь к самым отдаленным ее частям, преобразуя ядерную энергию реактора в движение через электроракетные двигатели. В периодике были сообщения о начале подготовки инфраструктуры космодрома Восточный к запуску тяжелых ракет «Ангара-А5М» для вывода частей такого буксира. Потребуется два пуска такой ракеты, чтобы вывести на орбиту две половины конструкции, после чего предстоит ее сборка на орбите в единое целое. Первый пуск «Ангара-А5М» планируется на 2027 год. Ракета должна

вывести в испытательный полет перспективный транспортный корабль нового поколения. Можно предположить, что создание и эксплуатация «Зевса» начнется не раньше 2030—2032 годов. Сейчас идет резкий всплеск активности разных стран в увеличении лунных миссий, планируются станции на ее поверхности. Увеличится грузопоток к Луне, не все грузы требуют срочной доставки. Есть ли способ ускорить создание буксира на малой тяге от орбиты Земли до орбиты Луны?

Сдерживающим фактором по времени является разработка ядерного космического реактора. При этом значительная часть тяги двигателей будет расходоваться на перемещение его самого, так как масса его значительна. Что, если пока отложить на будущее рассмотрение всего проекта и собрать буксир только для перелетов от Земли к Луне, где есть определенный уровень солнечной энергии с меньшим количеством двигателей? Предварительный анализ показал, что эффективность по доставке грузов от Земли к Луне буксира на трех СПД-230 с учетом того, что не нужно будет перемещать вместе с собой реактор и систему охлаждения, примерно такая же, как и у «Зевса». Очевидно, такая же картина возможна и для миссии к Венере, где плотность Солнечного потока также высока. Таким образом, появилась идея «легкого» буксира на солнечной энергетике [21].

Были проведены подробные расчеты [32], в которых закладывались точные значения элементов ДУ, взятые из [21], и предположения по массе конструкции аппарата. Получены таблицы зависимостей сроков доставки полезной нагрузки от орбиты Земли к орбите Луны от массы этой полезной нагрузки. В частности, было получено, что такой буксир за 278 дней сможет доставить к орбите Луны 4586 кг полезной нагрузки, потратив 3211 кг ксенона.

Как уже говорилось — рассматривается вариант ДУ, который можно создать уже сейчас. То есть все изделия должны иметь летную историю. Это подтолкнуло к решению заменить в проекте двигатели СПД-230 на СПД-140М [26; 28; 33], как это показано на рисунке 15.

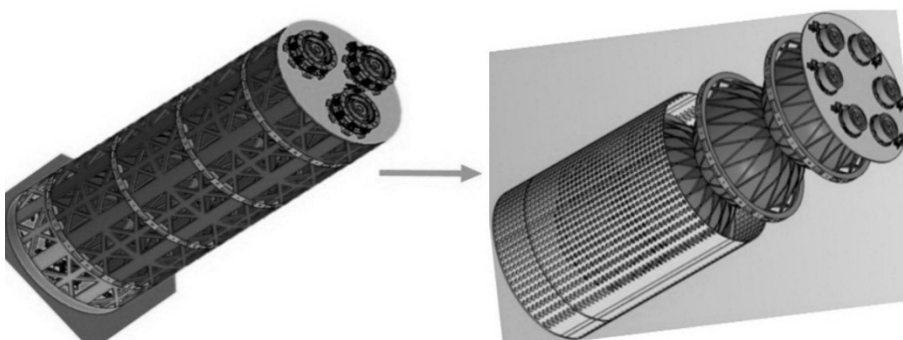


Рис. 15. Модель ДУ буксира на солнечной энергетике для перелетов с околоземной орбиты до лунной орбитальной станции: слева — на трех СПД-230, справа — на шести СПД-140М (убрана часть обечайки, чтобы были видны баллоны блока хранения)

Замена позволила понизить суммарную энергетику буксира с 75 кВт (3×25 кВт) до 48 кВт (6×8 кВт). При этом суммарная тяга уменьшилась с 3 Н (3×1 Н) до 2 Н ($6 \times 0,34$), а суммарный импульс тяги с 3200 с до 2800 с (см. данные в таблице рисунка 8 в последнем столбце, для 8 кВт). При этом для СПД-140М есть более точное прогнозирование ресурса до 25 000 ч (2,85 года) и стало возможным более точным определить, сколько раз может быть заправлена ДУ для повторных миссий. При коэффициенте складирования 1,8 кг/л в баке объемом 350 л помещается около 630 кг ксенона. Для 4 баков — около 2,52 т. При этом через каждый двигатель пройдет 420 кг. Это составляет треть его ресурса. То есть после возврата буксира на 6 СПД 140М, доставившего груз от орбиты Земли до орбиты Лунной станции и порожняком (на данном этапе освоения Луны) вернувшегося обратно, его можно будет еще три раза повторно заправить и использовать, прежде чем заменять двигатели. Таким образом, двигательная установка в данной конфигурации может быть использована четыре раза и может считаться многоцветовой.

В настоящее время идет детальная прорисовка элементов ДУ, по результатам которой будут проведены баллистические расчеты полезной нагрузки миссии в зависимости от срока доставки. Как отмечено в [33], скорейшее создание такого буксира позволит в ближайшее время начать транспортировать к Луне полезные грузы, необходимые для подготовки к созданию лунной базы и параллельно отработать технологию создания ядерного буксира «Зевс». Поэтому в названии работы [33] он определен как «доядерный буксир».

7. Малые космические аппараты разведки околопланетных условий

Для разведки обстановки и условий на планетах и их спутниках используют специальные миссии к ним: космические аппараты, оснащенные различными приборами, фиксирующими физические параметры небесного тела и химический состав его атмосферы и поверхности. Полученная информация используется для разработки текущих планов дальнейших исследований и общих планов освоения небесного тела. Исторически первыми для таких миссий использовались двигательные установки на жидкостном ракетном топливе. Последние десятилетия расширяется доля миссий, использующих электроракетные двигательные установки.

Ниже описывается предлагаемый пример такой миссии. На рисунке 16 представлена часть модели малого аппарата для миссий на орбите возле Луны — например мониторинг лунной поверхности или создание спутниковой группировки системы глобальной связи для Луны. На верхней части рисунка показан корпус аппарата без панелей солнечных

батарей. На переднем, обращенном к нам торце установлен двигатель СПД-50М производства АО «ОКБ «Факел»», который работает на ксеноне и будет выполнять роль маршевого двигателя, для выведения аппарата с околоземной орбиты до целевой. Двигатель имеет летную историю [25].

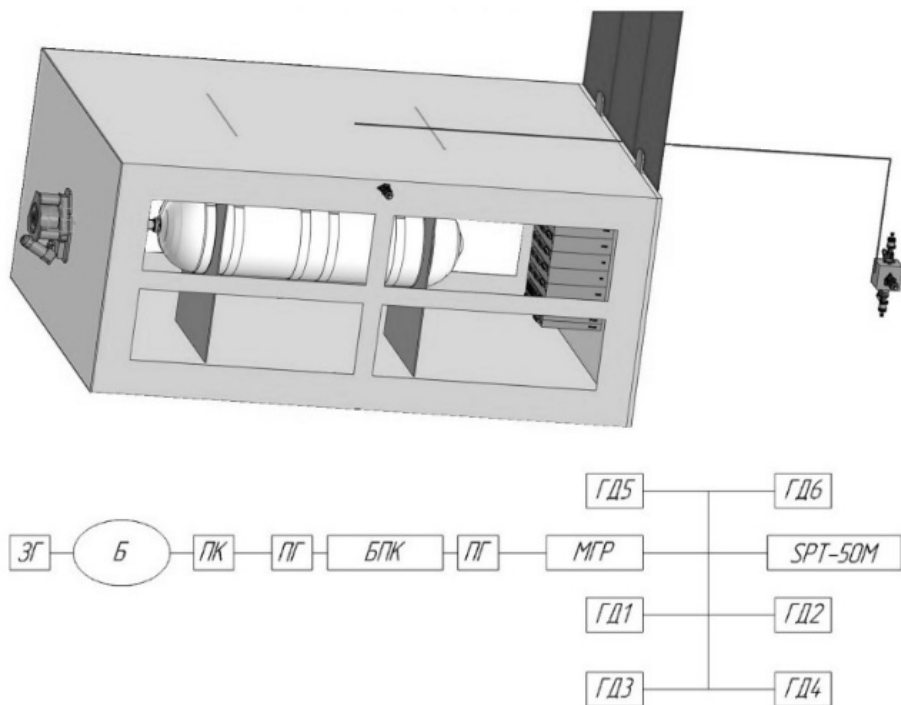


Рис. 16. Часть модели малого аппарата и его ОДУ для миссий к Луне и около нее (верхний вид).

Гидравлическая схема ОДУ: Б — баллон; ПК — пусковой клапан; БПК — блок подачи ксенона; ГД1-ГД6 — газовые двигатели ЭНД-10; МГР — модуль газораспределения; ПГ — проверочная горловина; ЗГ — заправочная горловина, СПД-50М — стационарный плазменный двигатель (нижний вид)

Также у аппарата имеются 6 двигателей системы ориентации. Четыре из них установлены в специальной прямоугольной обойме и смотрят в разные стороны, обеспечивая ориентацию аппарата по рысканью и тангажу. На верхней грани корпуса видны еще два таких двигателя, смотрящие в противоположные стороны и обеспечивающие изменение ориентации по крену. Это малогабаритные газовые двигатели ЭНД-10 с электроподогревом рабочего тела, также имеющие летную историю [34], работающие в данном случае на ксеноне, так как маршевый двигатель работает на ксеноне, а объем рабочего тела для задач ориентации невелик. Поэтому ставить дополнительный бак с азотом, на котором могут работать двигатели нецелесообразно. Проще использовать некоторое количество ксенона из общего объема.

Панели солнечных батарей вместе с осью их крепления, на которой они ориентируются на Солнце не показаны, чтобы было видно каркас аппарата с баком рабочего тела — ксенона. За передней гранью, с ее обратной стороны скрыты еще некоторые компоненты объединенной двигательной установки (далее — ОДУ). Такое название установка имеет вследствие совмещения в ней и маршевой и ориентационной частей. Сразу под рисунком с моделью аппарата показана гидравлическая схема аппарата, с указанием сокращенных названий частей.

Размер такого аппарата $1150 \times 800 \times 500$ мм, сухая масса (без топлива) — 100 кг. Это вариант малогабаритной универсальной платформы, сформировавшейся как проектный облик в последние 3 года. Этот вариант предназначен для выхода на окололунную орбиту и длительной работы на ней.

Перечислим некоторые составляющие двигательной установки. На рисунке 17 слева показан баллон высокого давления, имеющий металлический лейнер и намотку из композитного материала. Для размера универсальной платформы выбран баллон объемом 8 л, вмещающий около 16 кг ксенона. В правой части рисунка крупным планом показана обойма с четырьмя газовыми двигателями. Она устанавливается на специальном кронштейне в точке продолжения линии, проходящей через центр масс аппарата.

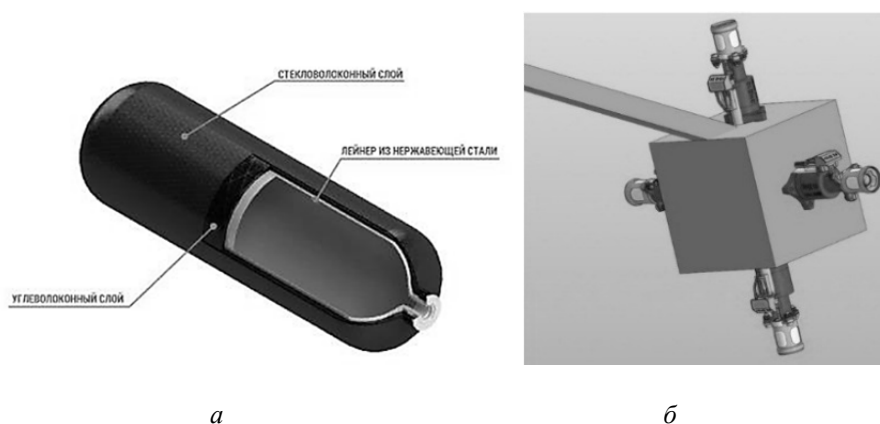


Рис. 17. Элементы ОДУ малого аппарата:

а — баллон высокого давления; *б* — блок из четырех двигателей ориентации ЭНД-10

На рисунке 18 показан СПД-50М, единственный из двигателей производства АО «ОКБ «Факел», имеющий три внешние магнитные катушки. Несколько сотен таких двигателей были поставлены для развертывания группировки спутникового Интернета. Случаев отказа в работе двигателей не зарегистрировано. Справа показан крупным планом газовый двигатель ЭНД10, также применяющейся в системах ориентации летных изделий [34].

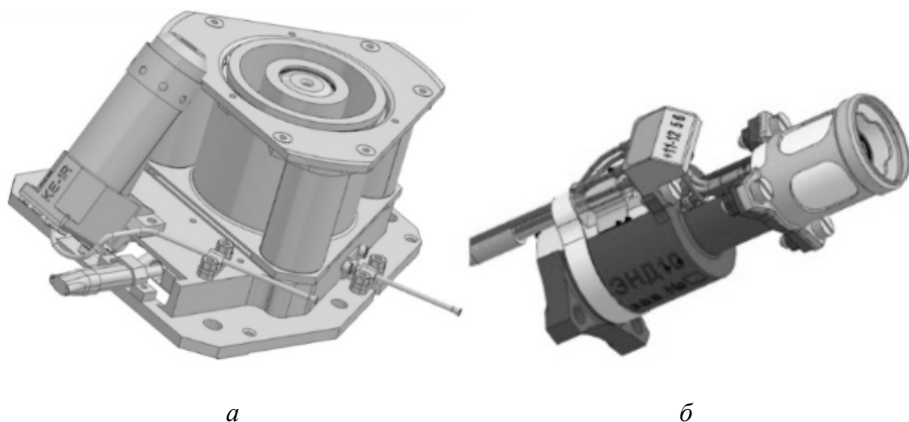


Рис. 18. Элементы ОДУ малого аппарата:
а — двигатель СПД-50М; *б* — двигатель ЭНД-10

На рисунке 19 показаны другие элементы ОДУ малого аппарата — слева блок подачи ксенона, справа — блок управления работой ДУ, разработки стороннего изготовителя. Блок подачи преобразовывает высокое давление ксенона в баке до давлений, необходимых для подачи в анодный блок и катод. Он содержит набор клапанов, редуктор и ресивер.

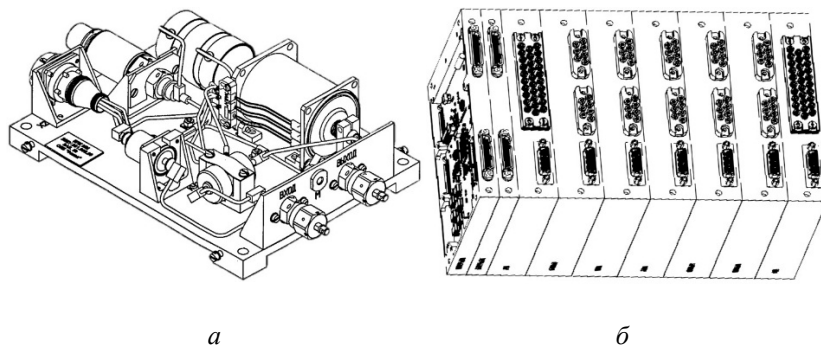


Рис. 19. Элементы ОДУ малого аппарата:
а — блок подачи ксенона; *б* — система преобразования и управления

Кроме того, в состав двигательной установки входят модуль газораспределения (рис. 20) и клапан однократного действия, заменяющий пиропатрон.

Модуль газораспределения разделяет общий поток подаваемого в двигатель ксенона на анодный и катодный подвод. Катодный расход значительно меньше анодного, не играет роль в создании тяги двигателя, но компенсирует поляризацию, которую бы мог вызвать только анодный расход.

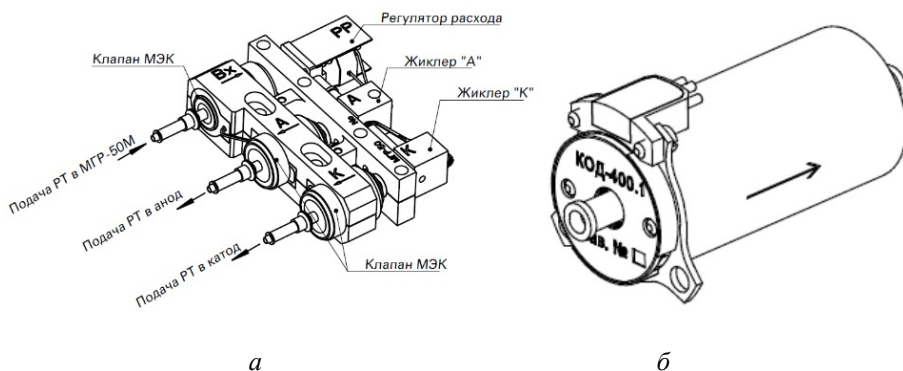


Рис. 20. Элементы ОДУ малого аппарата:

а — модуль газораспределения; *б* — клапан однократного действия

Конструктивный облик двигательной установки такого аппарата подробно был представлен в [35], баллистический расчет миссии к Луне — в [36]. Предполагается, что после вывода на околоземную орбиту ракетой-носителем, разгонный блок «Фрегат» придает аппарату необходимое начальное приращение скорости ΔV для отлета к Луне. Далее аппарат с помощью собственной ОДУ завершает маневр и выходит на окололунную орбиту. При этом оставшегося в баке ксенона хватает на дальнейшие его перемещения и маневры, в том числе поддержание орбиты.

Дальнейшие исследования в области оптимизации отправки группы подобных аппаратов к Луне привели к схеме, представленной на рисунке 21. Три спутника упаковываются в один блок, который устанавливается на специальном так называемом доразгонном блоке, имеющем двигательную установку на жидкостных ракетных двигателях, в данном случае — на термокаталитических К50-10.5, производства АО «ОКБ «Факел»».

Предполагается, что на «Фрегат» устанавливается сборка из трех таких блоков, каждый из которых несет три аппарата. Получив отлетный импульс в сторону Солнца [37], группировка летит до точки, указанной на рисунке 21 крестом. Далее доразгонные блоки делают маневр, направляя свой груз на окололунную орбиту. В итоге каждые три аппарата, летевшие на одном дополнительном разгонном блоке, оказываются на орбите с нужной долготой восходящего узла. Здесь они отстыковываются от дополнительного разгонного блока и с помощью своих ОДУ разводятся по орбите на равные расстояния — происходит так называемое фазирование. Таким образом, за один пуск «Фрегата» вокруг Луны разворачивается конstellляция из девяти спутников в трех плоскостях.

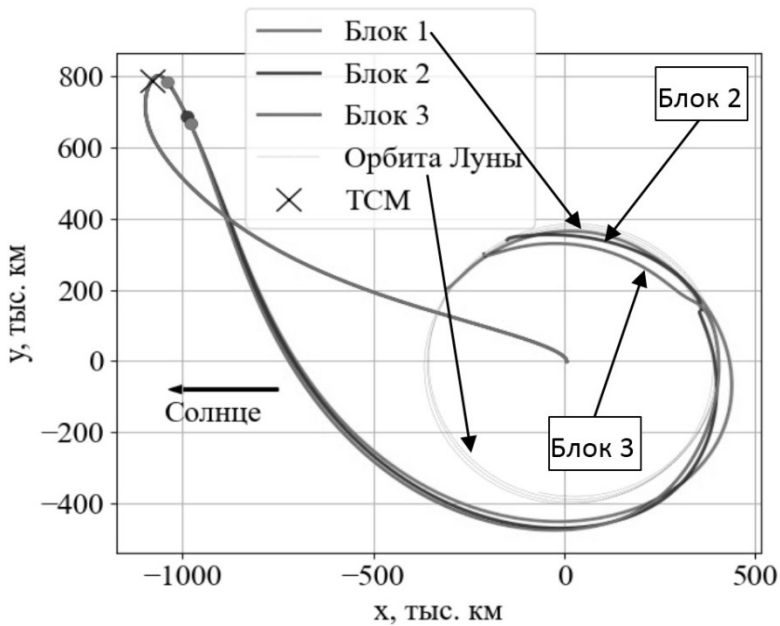


Рис. 21. Траектории вывода на окололунные орбиты группировки спутников блоками по 3 штуки

Как упоминалось выше, за последние три года в результате научной проработки сформировался проектный облик малогабаритной универсальной платформы. В подобной конфигурации она подходит для исследования планет земной группы и их спутников — в пределах орбиты Марса и тех астероидов, которые заходят внутрь этой орбиты. Первоначальный вариант такой платформы рассчитывался как раз для полета к Марсу [28; 38; 39]. Он представлен ниже на рисунках 22 и 23. Аппарат имеет 2 двигателя СПД-50М, расположенных рядом. Они должны будут работать последовательно: сначала один отработает свой полный ресурс 5000 ч, затем — второй. На каждый двигатель запас рабочего тела составляет 2 бака.

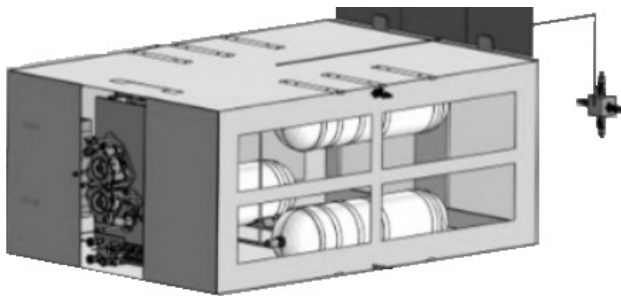


Рис. 22. Часть модели малого аппарата и его ОДУ для миссии к Марсу с двумя маршевыми двигателями и четырьмя баллонами

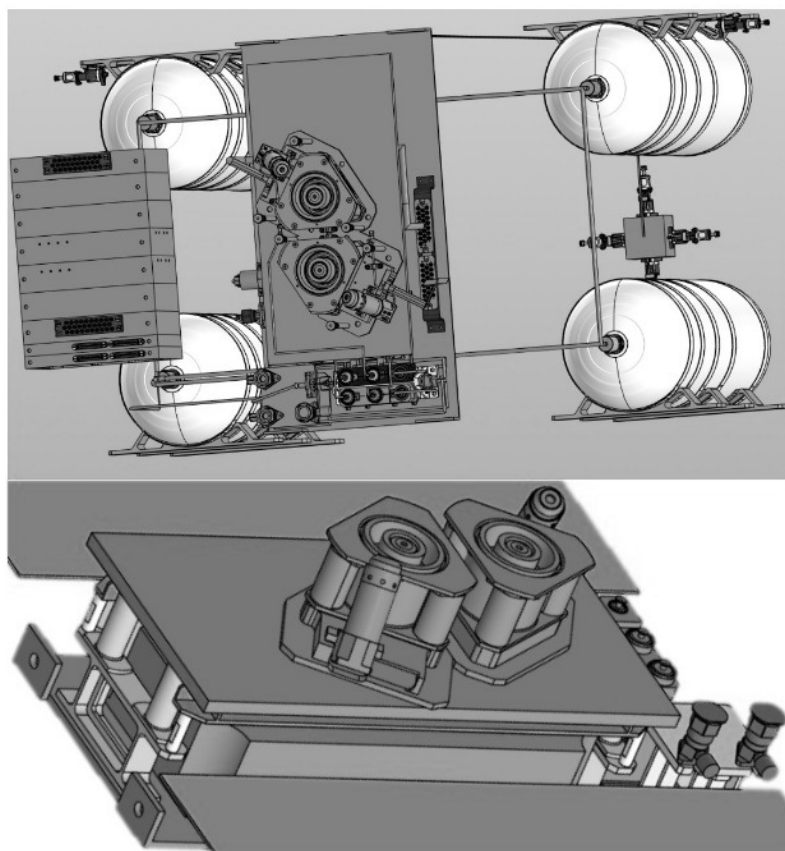


Рис. 23. ОДУ аппарата для миссии к Марсу

После выведения МКА на околоземную орбиту «Фрегатом», 64 кг ксенона смогут обеспечить перелет аппарата до орбиты Марса и выхода на заданную орбиту вокруг Марса. Траектория такого перелета, показана на рисунке 24. Здесь, в центре координат находится центр Солнечной системы, по осям — расстояние в километрах до орбиты Марса, и до орбиты Земли, откуда начинается траектория космического аппарата. При выбранной точке наблюдения плоскость орбиты Марса и траектории КА лежит в плоскости XOY рисунка, а движение их идет против часовой стрелки. В момент начала движения аппарата Земля и точка старта находятся на границе четвертого и первого квадрантов, на оси OX , на расстоянии около 150 миллионов километров от Солнца, а Марс — на границе первого и второго квадрантов, на оси OZ , на расстоянии около 230 млн км от Солнца.

Миниатюризация научной аппаратуры позволяет получить даже от таких небольших аппаратов много важной информации. Некоторые из приборов, которые планируется установить на этом аппарате показаны на рисунке 25.

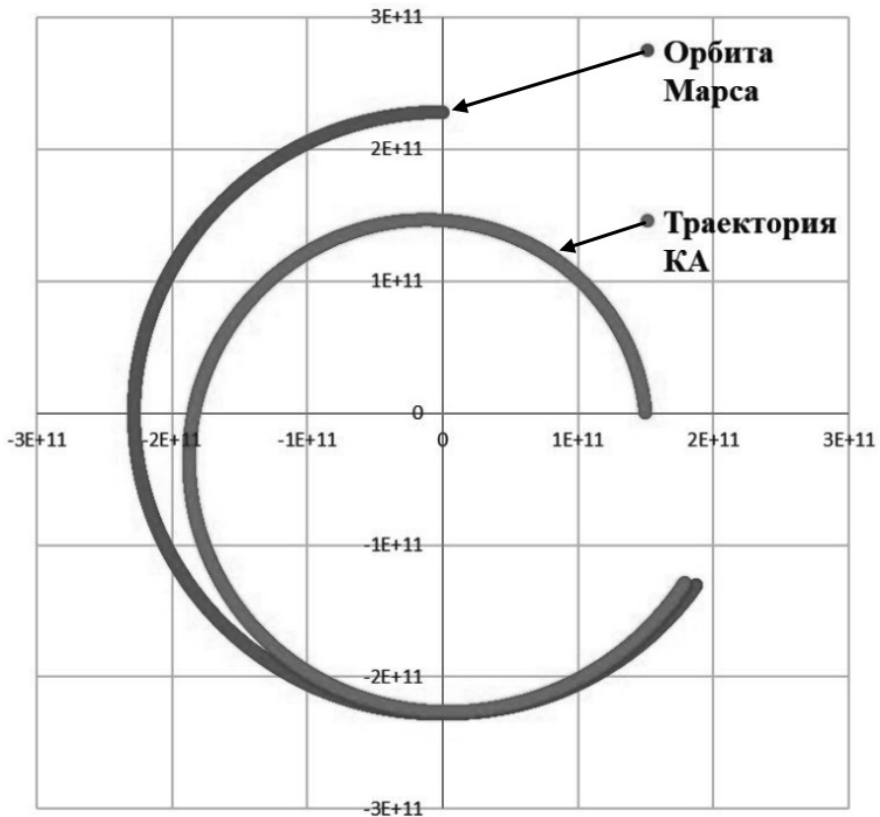


Рис. 24. Траектория перелета малого космического аппарата к Марсу (масштаб на графике задан в сантиметрах)

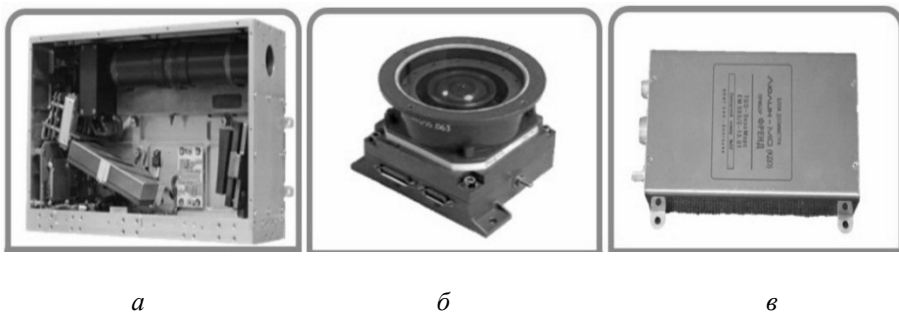


Рис. 25. Примеры устройств полезной нагрузки для миссии к Марсу:
а — УФ-спектрометр; *б* — обзорная съемочная камера;
в — дозиметр-спектрометр «Спектр-Марс»

В настоящий момент прорабатываются три варианта аппарата: максимальный («марсианский») с двумя двигателями и четырьмя баками, минимальный («лунный») с одним двигателем и одним баком и проме-

жуточный с одним двигателем и двумя баками (с запасом топлива на полный ресурс двигателя). Также сейчас прорабатывается аналогичная миссия к Венере.

При определенном сочетании параметров целевых миссий и выводящих носителей возможно выводить такие аппараты как попутную нагрузку, подобно кубсатам. Дальше они смогут на своей маршевой двигательной установке малой тяги раскручиваться вокруг орбиты Земли, набирая нужную скорость, и постепенно выходить на траекторию к целевому объекту, подобно тому, как это было выполнено на миссии «Smart-1» [40] на двигателе PPS-1350 совместной разработки АО «ОКБ “Факел”» и французской фирмы. При этом во избежание чрезмерной радиационной нагрузки на приборы необходимо тщательно подходить к выбору стартовой орбиты по высоте и наклонению.

Для исследовательских полетов к внешним планетам Солнечной системы и астероидам главного пояса следует рассматривать двухступенчатые схемы аппаратов. Первая ступень должна иметь маршевую двигательную установку на ранее рассмотренных маршевых двигателях СПД-140М, подобно миссии к астероиду Психея [41]. Запас рабочего тела должен быть рассчитан так, чтобы достичь зоны, где уменьшение солнечного потока сделает дальнейшее использование электроракетных двигателей малоэффективными. Далее отработавшая первая ступень должна отделиться и аппарат должен двигаться на двигательной установке на базе термokatалитических двигателей, подобно выше описанной ДУ для доразгонного блока. Также подразумевается гравитационный маневр в поле тяготения Марса — использование его силы притяжения для дополнительного ускорения пролетающего мимо аппарата. Полученные такими аппаратами данные об обстановке возле дальних планет позволят более точно проектировать орбитальные станции возле них. Транспортировка блоков орбитальных станций к удаленным объектам солнечной системы предполагается с помощью описанного выше ядерного буксира. Следующим объектом, привлекающим внимание ученых, являются спутники Юпитера, обладающие твердой поверхностью и, возможно, океанами воды.

Следует понимать, что отдаленность этих объектов Солнечной системы при современном уровне технологий ракетостроения требует годы времени для их достижения. Например, вышеупомянутая миссия к Психее займет 6 лет, но когда-то и первое кругосветное путешествие длилось почти 3 года. Со временем возможно достижение новых технологий, которые ускорят перемещение по Солнечной системе. Однако нужно понимать, что на ближайшую перспективу дальние, «трансмарианские» миссии будут выполняться автоматическими космическими аппаратами без экипажа. На орбитальных станциях, а также на планетах и их спутниках необходимым элементом инфраструктуры станут соответственно космические и напланетные роботы.

8. Космические и напланетные роботы

Разработка космических манипуляторов для использования на станции «Мир» велась в России еще в конце прошлого века. Первой работой по использованию антропоморфных роботов для решения задач на космической станции является проект «Андронавт» ЦНИИмаш с торсовым роботом SAR-401 производства «Андроидной техники». В 2015—2016 годах существовал проект по разработке торсового робота для внекорабельной деятельности [42]. В ходе его выполнения были переделаны манипуляторы торсового робота под безколлекторные двигатели, и это решение остается актуальным и сейчас. Такие двигатели теперь производит сама «Андроидная техника». В ходе этого проекта в конце 2016 года впервые в России, были проведены тепловакуумные испытания образца торсового робота в камере высокого вакуума ВК-600 АО «Решетнёв» в азотных экранах при имитации солнечного внешнего теплового потока инфракрасными нагревателями. Робот выполнял движения своим манипулятором по циклограмме, имитирующей интенсивную деятельность в течение более одного часа. При этом значения температур по конструкции робота оставались в допустимых пределах [43]. Следующим значимым этапом стало создание и запуск в 2019 году космического робота «Фёдор».

Использование зарубежных космических манипуляторов имеет более раннюю историю. Впервые канадский манипулятор Canadarm использовался на борту шаттла Колумбия в ходе миссии STS-2 в 1981 году.

Сейчас планы российских исследователей связаны в первую очередь с экспериментами с роботизированным манипулятором «ERA», находящимся в их распоряжении [44]. 3D-модель сценария его использования представлена на рисунке 26.

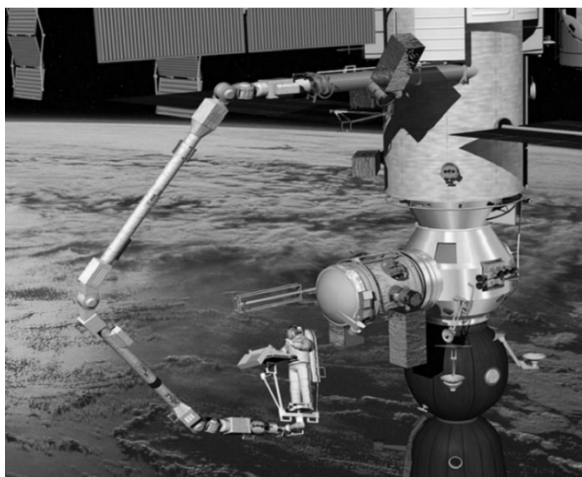


Рис. 26. 3D-модель роботизированного манипулятора «ERA»

Важные исследования по практическому применению антропоморфных космических и напланетных роботов проводятся в Центре подготовки космонавтов им. Ю. Гагарина. Именно космонавтам предстоит управлять такими роботами в перспективных миссиях, поэтому им в программу профессиональной подготовки включают и этот компонент. Соответственно, в ходе такой практической деятельности выявляются и узкие места со скрытыми проблемами, и открываются перспективные взгляды на дальнейшее развитие. Так, в результате совместных работ с НПО «Андроидная техника» по проекту «Теледройд» были сформулированы принципы и технические детали совместного использования уже упоминавшегося манипулятора «ERA» и перспективного торсового антропоморфного робота «Теледройд» [45]. Три варианта его взаимного расположения представлены на рисунке 27.

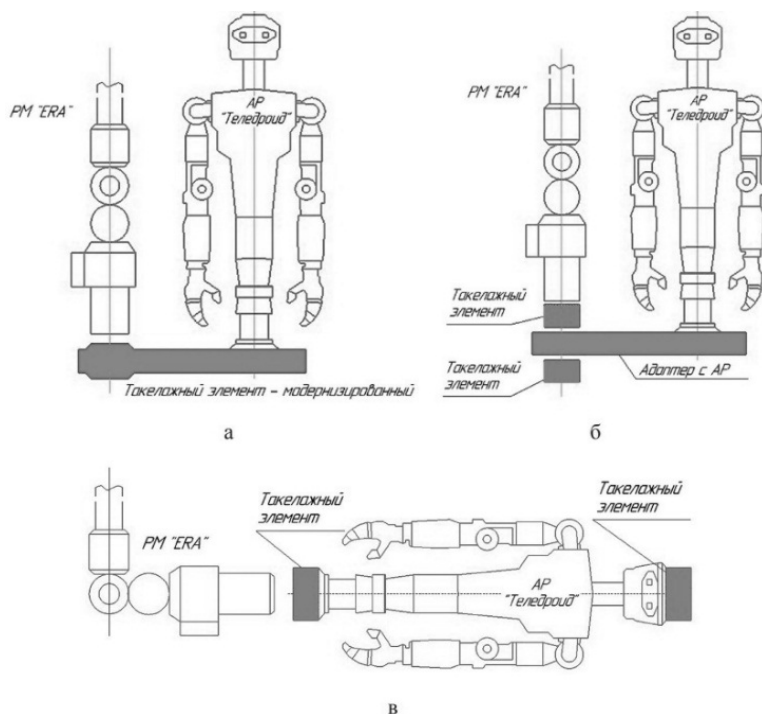


Рис. 27. Три варианта расположения космических манипуляторов

Управление антропоморфными манипуляторами на текущем этапе развития робототехнических средств осуществляется в копирующем режиме. Для этого используются «костюмы управления» и «копирующие перчатки». Оператор надевает эти устройства на себя и выполняет движения. Эти движения фиксируются специальными датчиками (в том числе гирокомпасами и акселерометрами) и передаются по радиоканалу роботу, который повторяет движения оператора. Внешний вид таких устройств представлен на рисунке 28.

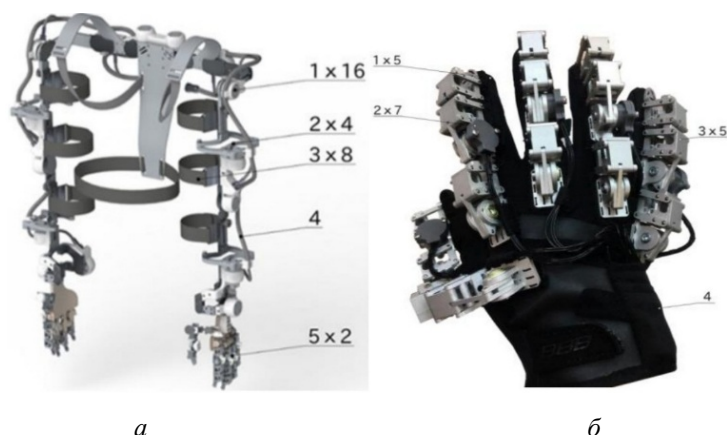


Рис. 28. Антропоморфные манипуляторы космических роботов:
а — костюм оператора; *б* — перчатка управления

На рисунке 29 слева показан сеанс управления с помощью таких средств: космонавт А. Кикина проводит тренировку управления роботом. На рисунке справа изображен текущий вариант макета торсового робота, аналогичный тому, что испытывался в ходе проекта Solaris и тому, который должен быть испытан в 2026 году на МКС в ходе проекта «Андронавт». Во время экспериментальной отработки были выявлены проблемы, возникающие при управлении через костюм операторами с разными индивидуальными размерами частей тела [46]. Благодаря большой наработанной статистике данных испытаний удалось найти пути решения проблем математическими методами. По результатам исследований подготовлена к защите диссертация А. Кикиной [47].

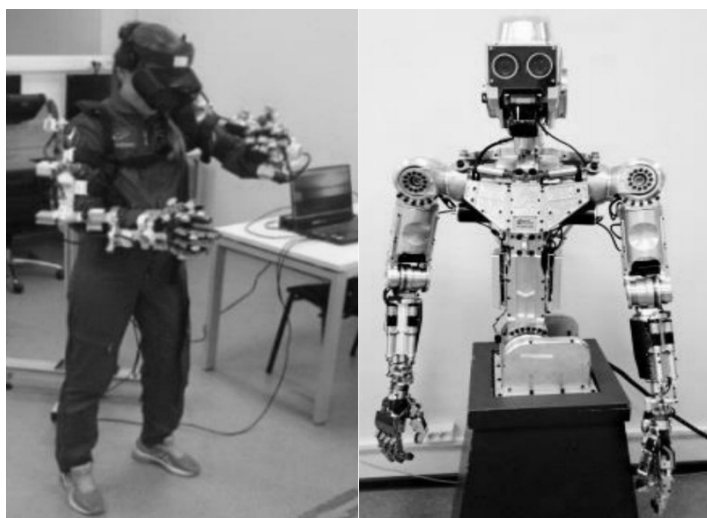


Рис. 29. Тренировка космонавта в управлении роботом (слева) и торсовый вариант робота для космической станции (справа)

Для работы на поверхности Луны НПО «Андроидная техника» изготовила специального робота конфигурации «кентавр», внешний облик которого представлен на рисунке 30.



Рис. 30. Внешний вид лунного робота

Этот робот также сейчас проходит отработку в ЦПК — им учатся управлять космонавты. Сочетание управления перемещением и манипуляциями создает дополнительные сложности. Анализ некоторых предварительных полученных результатов и пути их решения изложены в работе [48]. Такой робот уже относится к категории напланетных, поскольку будет эксплуатироваться в условиях на поверхности Луны. Первым напланетным роботом следует считать советский «Луноход-1». Соответственно, он в полной мере будет подвергаться разрушающему воздействию лунной пыли, действующей как наждачный порошок на элементы конструкции.

При этом отсутствие на Луне атмосферы и магнитосферы делают условия на ее поверхности практически космическими. Расчеты пока-

зывают, что в условиях лунного дня температура конструкции такого робота может повыситься даже сильнее, чем в космосе в районе космической станции. Возле космической станции робот нагревается внешним тепловым потоком от Солнца с плотностью 1440 Вт/м^2 . При этом большая часть окружающего его пространства — открытый космос со степенью черноты $E=1$ и температурой $T=4 \text{ К}$, куда сможет сбрасывать тепло система терморегулирования робота [43]. Элементы конструкции станции занимают в телесном угле вокруг робота небольшое значение и не нагреваются до высокой температуры, так как станция имеет свою систему терморегулирования, которая также сбрасывает избыточное тепло в окружающее пространство и поддерживает у конструкции значение температуры, комфортное для находящихся внутри станции людей и приборов.

В случае нахождения на поверхности Луны в условиях лунного дня робот также может получать до 1440 Вт на м^2 на свою поверхность. При этом окружающий космос он «видит только вполнеба» — в телесном угле 2π , а не в полном телесном угле 4π . Со второй половины окружающего пространства на него лучит разогретая Солнцем до $+127^\circ\text{C}$ поверхность Луны. Также на поверхности Луны присутствует полный спектр электронов высоких энергий, α -частиц, солнечных космических лучей, галактических космических лучей, которые необходимо учитывать при разработке космической техники. На Земле от этого фактора нас защищает магнитное поле Земли, поэтому приведенный на рисунке 30 внешний вид робота является лишь одним из макетов, предназначенным для отработки системы его управления. Другие макеты, на которых будет отрабатываться весь спектр устойчивости робота ко всем факторам окружающего пространства, будут отрабатываться на различных специальных стендах. Таким образом, любой робот, предназначенный для работы на поверхности небесных тел за пределами Земли, может считаться не только напланетным, но и частично космическим (на Марсе и Венере тоже нет магнитного поля).

Большой объем работы по подготовке космонавтов ко взаимодействию с различными роботами привел к появлению в ЦПК специализированной лаборатории управления роботами, включающей специальные стенды и пульта управления. На рисунке 31 представлен вид помещения этой лаборатории. Спереди справа виден колесный антропоморфный лунный робот, которому именно в ЦПК дали имя «Марфа». Прямо по центру находится максимально функциональный костюм управления торсовой частью, оснащенный обратной силомоментной связью. Работая в таком костюме, космонавт чувствует обратную реакцию на усилия по перемещению манипулятором робота предметов, их захвату и удержанию. Далее видны стенды управления с рабочими местами и экранами мониторов. В работе [49] приведены подробности оснащения лаборатории и функционал оборудования с техническими сведениями о режимах его эксплуатации.



Рис. 31. Внешний вид лаборатории управления с торсовым и лунным роботом

Результатами многолетней деятельности ЦПК в описанном направлении стали не только созданное уникальное оборудование лаборатории, но и накопленные методики работы, выявленные проблемы, проведенные исследования и найденные пути их решения. Например, такой материал изложен в работе [50]. Все это вместе, а также обратная связь с производителем — НПО «Андроидная техника» позволяет продвигаться вперед в этом сложном направлении прикладной части космической деятельности.

Заключение

С самого начала космических полетов для исследований Луны и других планет используются автоматические космические аппараты разового исполнения с заранее сформулированной научной программой. Это приводит к отрывочности, противоречивости получаемой информации. Для обладания более достоверной научной информацией требуется ее получение из максимального количества районов планеты (спутника, астероида), разнесенных на сотни и тысячи километров друг от друга. Следовательно, нужны другие аппараты и иные схемы реализации миссий.

Для реализации комплексного подхода исследований Луны предлагается лунная орбитальная станция — ЛОС, размещаемая на низкой орбите высотой 100—200 км над поверхностью. Минимально необходимые способности ЛОС обеспечивают:

- энергодвигательный модуль;
- танкер-заправщик;
- узловой модуль для беспилотных миссий;
- узловой модуль для пилотируемых миссий.

Эти объекты обеспечивают смысл создания ЛОС на любом этапе ее эксплуатации в течение предстоящих 50—100 лет. Основной режим функционирования ЛОС — беспилотный. Коррекция орбиты — с использованием электрореактивных двигателей — ЭРДУ.

Комплексность научных исследований обеспечивают многоразовые взлетно-посадочные комплексы — МВПК. Здесь важны их возможность совершать «прыжки» по поверхности планеты, возвращаться на борт ЛОС (автоматически сближаться и стыковаться), обеспечивать дозаправку расходующимися компонентами с борта станции и способность к автоматическому обслуживанию научного оборудования на борту ЛОС.

Роль околоземной орбитальной станции в контексте комплексного изучения Луны пока выглядит в целом неубедительно — особенно при обосновании ее использования на трассах «Луна — Земля». Вероятно использование станции на НОО для сборки лунных экспедиционных комплексов до их отправки к Луне, однако этот вид работ для станций на НОО (их целесообразность) еще мало исследован.

Предлагаемая схема инопланетных комплексных научных исследований — это масштабируемый вариант использования ИОС аналогично варианту использования ЛОС. По сути, предлагаемая номенклатура модулей ЛОС, за исключением пилотируемых модулей и пилотируемых кораблей, полностью применима в инфраструктуре ИОС.

Особые перспективы ИОС открываются в случае освоения технологий извлечения рабочего тела и топлива для электрореактивных и жидкостных двигательных установок инопланетных станций из природного вещества планеты назначения. Например, при извлечении из атмосферы планет водорода, азота, метана, гелия, кислорода, которые, как уже известно, там имеются в неисчерпаемых объемах. Это приведет к качественно новому уровню исследований — с использованием многоразовых взлетно-посадочных комплексов, многоразовых орбитальных танкеров-заправщиков, многоразовой научной аппаратуры.

При создании ключевого элемента инфраструктуры — энергодвигательного модуля — в качестве двигательной установки станции предлагается использовать стационарный двигатель СПД-140. АО «ОКБ «Факел»» располагает значительным техническим заделом для реализации ДУ на базе СПД-140М применительно к автоматической ОЛС. Оборудование имеет летную историю, его экспериментальная отработка завершена.

При построении буксира для транспортировки грузов между орбитами Земли и Луны, Земли и Венеры могут быть использованы двигательные установки на солнечной энергетике на базе СПД-140М.

В настоящее время завершается подготовка проекта космического антропоморфного робота для работы в открытом космосе на поверхности МКС. Результаты его реализации дадут материал для развития и корректировки планов по дальнейшему использованию роботов на космических и лунных объектах.

Список литературы

1. *NASA Radar Finds Ice Deposits at Moon's North Pole* URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/Mini-RF/multimedia/feature_ice_like_deposits.html (дата обращения: 29.10.2025).
2. *Colaprete A., Schultz P., Heldmann J. et al.* Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume // *Science*. 2010. Vol 330, iss. 6003. P. 463—468. doi: 10.1126/science.1186986.
3. *Основные положения Федеральной космической программы 2016—2025.* URL: <https://www.roskosmos.ru/22347> (дата обращения: 29.10.2025).
4. *Лунная база «Барминград».* Проект, опередивший время. URL: <https://www.vesvks.ru/vks/article/lunnaya-baza-barmingrad-proekt-operedivshii-vremya-16337> (дата обращения: 29.10.2025).
5. *Когда появятся первые базы на Луне?* URL: <https://asgard-service.com/news/kogda-poyavutsya-pervyye-bazy-na-lune> (дата обращения: 29.10.2025).
6. *International Space Exploration Coordination Group.* The Global Exploration Roadmap (GER 2020), August 2020. URL: https://www.globalspaceexploration.org/wp-content/uploads/2020/08/GER_2020_supplement.pdf (дата обращения: 31.10.2025).
7. *Near-rectilinear halo orbit.* URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Near-rectilinear_halo_orbit (дата обращения: 29.10.2025).
8. *Nesterenko A., Kosmodemyanskiy E., Pridannikov S. et al.* Propulsion system for automated lunar orbital station // AIP Conference, Proceedings XLV Academic Space Conference, Dedicated To the memory of Academician S.P. Korolev And Other Outstanding National Scientists — Pioneers of Space Exploration. 2023. Vol. 2549, iss. 1. P. 050005-1—050005-10. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2318/1/010001/891896/Preface-XLIV-ACADEMIC-SPACE-CONFERENCE-dedicated?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 31.10.2025).
9. *Богданов А. А., Кутлубаев И. М., Пермьяков А. Ф. и др.* Антропоморфные роботы — составляющая научной аппаратуры орбитальных станций // Робототехника и искусственный интеллект : материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / под науч. ред. В. А. Углева. 2016. С. 71—81. URL: <https://bik.sfu-kras.ru/ft/LIB2/ELIB/u004/free/i-225225002.pdf> (дата обращения: 29.10.2025).
10. *Довгань В. Г.* Дистанционное управление луноходами и планетоходами // *Земля и Вселенная*. 2005. №2. С. 76—81. URL: https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/zemlya_i_vselennaya/2005/2/76-81.html (дата обращения: 29.10.2025).
11. *Базилевский А. Т.* «Луноходы-1 и -2» в истории лунных исследований. К 50-летию первого запуска планетохода // *Природа*. 2021. №2. С. 3. URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/436130/Lunokhody_1_i_2_v_istorii_lunnykh_issledovaniy (дата обращения: 29.10.2025).
12. *Корчагин А. Н.* Анализ начальных условий движения КА в атмосфере при возвращении от Луны // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*. 2019. №92. doi:10.20948/prepr-2019-92. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-92> (дата обращения: 29.10.2025).
13. *Сапрыкин О. А., Соболевский В. Г.* Баллистический анализ вариантов посадки космического аппарата в заданном районе территории Российской Федерации на этапе завершения полета «Луна — Земля» // *Космонавтика и ракетостроение*. 2013. №3 (72). С. 78—86.

14. *Следующая станция* — РОС. Главный конструктор Владимир Кожевников раскрывает уникальность новой Российской орбитальной станции. URL: <https://rg.ru/2023/04/12/sleduiushchaia-stancii-ros.html> (дата обращения: 31.10.2025).

15. Сапрыкин О. А. Новые подходы проектирования лунной станции для обслуживания автоматических и пилотируемых космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. М., 2021. doi: 10.18698/0536-1044.

16. Сапрыкин О. А. Исследования планет с использованием многоцветных взлетно-посадочных комплексов // Вестник Московского авиационного института. М., 2020. Т. 27, №4. С. 48—58. doi: 10.34759/vst-2020-4-48-58.

17. *Юпитер* — грозный гигант. URL: <https://galspace.spb.ru/index515.html> (дата обращения: 31.10.2025).

18. Карраско Н., Тигрин С., Гавилан Л. и др. Эволюция высокогорных аэрозолей Титана при ультрафиолетовом облучении // Nat Astron. 2018. Vol. 2. P. 489—494. URL: <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0439-7> (дата обращения: 31.10.2025).

19. *Атмосфера* Плутона: все что нужно знать — состав, особенности научные данные. URL: <https://o-kosmose.com/solnechnaya-sistema/planety/atmosfera-plutona-vse-chto-nuzhno-znat-sostav-osobennosti-nauchnye-dannye> (дата обращения: 31.10.2025).

20. *Луна* — шаг к технологиям освоения Солнечной системы / под науч. ред. В. П. Легостаева, В. А. Лопоты. М., 2011.

21. Абраменков Г. В., Дронов П. А., Приданников С. Ю. и др. Некоторые примеры использования электроракетных двигательных установок с тягой от 390 до 1000 мН // Фундаментальные и прикладные исследования в области высоких технологий : сб. науч. тр. Калининград, 2024. №3. С. 88—104.

22. Пичужкин И. А., Приданников С. Ю., Берникова М. Ю. и др. Интегральные и ресурсные характеристики стационарного плазменного двигателя высокой мощности на ксеноне и криптоне // XLIX Академические чтения по космонавтике : сб. тез. докл. М., 2025. С. 189—190.

23. Casaregola C. Electric Propulsion for Station Keeping and Electric Orbit Raising on Eutelsat Platform // Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC, 6th NSAT, Kobe-Huogo, Japan, July 4—10, 2015, IEPC-2015-97.

24. Ермошкин Ю. М., Внуков А. А., Волков Д. В. и др. Особенности доведения космических аппаратов «Экспресс-АМУ3», «Экспресс-АМУ7» на геостационарную орбиту // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, №4. С. 696—707. doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-696-707.

25. Scremin G., Pont C., Kirch P. et al. 20 years of electric propulsion in-flight experience on Airbus satellites // IEPC-2024-369, 38th International Electric Propulsion Conference. Toulouse, 2024. P. 1—18.

26. Комаров А. А., Попова Ю. В., Ширококов М. Г. Двигательные установки на основе СПД-140М для орбитальных станций и лунного буксира на солнечной энергетике // XXIII Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов : сб. тез. докл. Королёв, 2024. С. 428—430.

27. Дронов П. А., Нестеренко А. Н., Приданников С. Ю. и др. Двигательная установка для поддержания лунной орбитальной станции на низкой круговой полярной орбите // XLIX Академические чтения по космонавтике : сб. тез. докл. М., 2025. С. 173—175.

28. Васильев Д. С., Комаров А. А., Корнеев К. Р. и др. Перспективные проекты применения двигателей АО «ОКБ “Факел”» // Космическая техника и технологии. 2025. №3 (50). С. 72—88.

29. Муртазин Р. Ф. Эффективное выведение КА на высокую круговую окололунную орбиту // Космонавтика и ракетостроение. 2019. №3 (108). С. 5—12.

30. Беляева Е. К., Муртазин Р. Ф. Использование грависферного эффекта при обслуживании лунной орбитальной станции // XLIX Академические чтения по космонавтике : сб. тез. докл. М., 2025. С. 209—210.

31. Роскосмос будет работать с Курчатовским институтом по ядерной космической программе. URL: <https://prokosmos.ru/2025/04/10/roskosmos-budet-robotat-s-kurchatovskim-institutom-po-yadernoi-kosmicheskoi-programme> (дата обращения: 31.10.2025).

32. Ширококов М. Г., Суслов К. С., Овчинников М. Ю. и др. Анализ траектории легкого лунного буксира с электрореактивной двигательной установкой. М., 2024. №28.

33. Дронов П. А., Комаров А. А., Приданников С. Ю. и др. Облик двигательной установки доядерного буксира для доставки грузов от Земли к Луне // XLIX Академические чтения по космонавтике : сб. тез. докл. М., 2025. С. 176—177.

34. Российские разработчики успешно испытали газовый двигатель для малых спутников (специалисты ГК «Геоскан» и ОКБ «Факел» испытали первый отечественный газовый двигатель для малых космических аппаратов). URL: <https://tass.ru/nauka/18518631> (дата обращения: 28.10.2025).

35. Абраменков Г. В., Дронов П. А., Приданников С. Ю. и др. Электроракетные двигательные установки с тягой от 4 до 18 мН для малых космических аппаратов // Фундаментальные и прикладные исследования в области высоких технологий : сб. науч. тр. Калининград, 2024. №3. С. 51—64.

36. Овчинников М. Ю., Ширококов М. Г., Глазунова И. А. и др. Миссия к Луне на базе унифицированной малогабаритной платформы с ЭРДУ. М., 2025. №31.

37. Овчинников М. Ю., Глазунова И. А., Перепухов Д. Г. и др. Возможные сценарии отечественных миссий малых космических аппаратов к Луне. К. Э. Циолковский: ключевые идеи и современные достижения космонавтики // 59-е Научные чтения, посвященные разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского : сб. материалов (17—20 сентября 2024 г., г. Калуга), Калуга, 2024. Ч. 1. С. 54—57.

38. Овчинников М. Ю., Дронов П. А., Приданников С. Ю. и др. Миссия к Марсу на базе универсальной малогабаритной платформы с ЭРДУ. М., 2024. №44.

39. Корнеев К. Р., Степанова Е. С. Объединенная двигательная установка на основе ЭРД для миссии малого аппарата к Марсу, Луне, астероидам // XIII Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов ПАО «РКК “Энергия”» : сб. тез. докл. М., 2024. С. 434—436.

40. Смарт-1. URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Смарт-1> (дата обращения: 28.10.2025).

41. Зонд «Психея» сфотографировал Землю и Луну с расстояния 290 млн км. URL: <https://science.mail.ru/news/7119-zond-psiheya-sfotografiroval-zemlyu-i-lunu-s-rasstoynaniya-290-mln-km/> (дата обращения: 28.10.2025).

42. Saprykin O., Baksheeva E., Safronov V., Tolstel O. About the concept of using anthropomorphic robots during human exploration of the moon // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11 (16). P. 9674—9679.

43. *Krochak L. Z., Chubov P. N., Tolstel O. V., Saprykin O. A.* Thermal control system of the robot of anthropomorphous type for work in space near ISS and on the moon surface // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8 (3). P. 18193—18199.

44. *Европейский манипулятор ERA*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Европейский_манипулятор_ERA (дата обращения: 28.10.2025).

45. *Дикарев В. А., Кикина А. Ю., Чеботарев Ю. С. и др.* О возможности отработки коллаборативного использования антропоморфной и манипуляционной робототехнической системы для операционной поддержки внекорабельной деятельности космонавтов // *Пилотируемые полеты в космос*. 2022. №3 (44).

46. *Дикарев В. А., Симбаев А. Н., Кикина А. Ю. и др.* Проблема обеспечения соответствия кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ // *Пилотируемые полеты в космос*. 2022. №4 (45).

47. *Кикина А. Ю.* Разработка расчетно-экспериментального метода повышения точности позиционирования исполнительных органов антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2025.

48. *Дикарев В. А., Симбаев А. Н., Кикина А. Ю. и др.* Экспериментальные исследования операторской деятельности космонавтов по управлению движением транспортного средства (имитатора планетохода) посредством антропоморфного робота в копирующем режиме телеуправления: постановка, проведение, результаты // *Пилотируемые полеты в космос*. 2023. №4 (49).

49. *Дикарев В. А., Симбаев А. Н., Кикина А. Ю. и др.* О создании комплексного стенда-тренажера робототехнических систем для решения научно-прикладных задач на российской орбитальной станции // *Пилотируемые полеты в космос*. 2024. №2 (51).

50. *Дикарев В. А., Симбаев А. Н., Кикина А. Ю. и др.* Об обеспечении коллаборации космонавтов с робототехническими системами для перспективных пилотируемых космических полетов // *Пилотируемые полеты в космос*. 2024. №4 (53).

Об авторах

Олег Алексеевич Сапрыкин — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Москва, Россия.

E-mail: oleg.sapr@gmail.com

Павел Александрович Дронов — кандидат технических наук, директор АО «Опытное Конструкторское Бюро “Факел”», Калининград, Россия.

E-mail: info@fakel-russia.com

Александр Никитович Нестеренко — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Опытное Конструкторское Бюро “Факел”», Калининград, Россия.

E-mail: nesterenko@fakel-russia.com

Сергей Юрьевич Приданников — кандидат технических наук, и. о. главного конструктора АО «Опытное Конструкторское Бюро “Факел”», Калининград, Россия.

E-mail: pridannikov@fakel-russia.com

Олег Владимирович Толстель — кандидат технических наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: tolstel.oleg@mail.ru

Владимир Анатольевич Дикарев — доктор технических наук, начальник управления Научно-производственного института ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю. А. Гагарина», Москва, Россия.

E-mail: V.Dikarev@gctc.ru

Александр Николаевич Симбаев — кандидат технических наук, начальник Научно-исследовательской лаборатории РИСПКП — ГНС ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю. А. Гагарина», Москва, Россия.

E-mail: a.simbaev@gctc.ru

Евгений Александрович Дудоров — кандидат технических наук, исполнительный директор АО «Корпорация роботов», Москва, Россия.

E-mail: dudorov@npo-at.ru

Владислав Владимирович Чеха — директор по перспективным проектам АО «НПО “Андроидная техника”», Москва, Россия.

E-mail: vladislav.chekha@npo-at.com

В. С. Скворцов, К. М. Пиотровский, М. З. Плетенский

**АРХИТЕКТУРА И РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЕБ-СИСТЕМЫ
УЧЕТА ПОСЕЩАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ NFC-МЕТОК,
QR-КОДОВ И GPS**

Представлены разработка и исследование гибридной автоматизированной веб-системы учета посещаемости студентов, основанной на сочетании QR-кодов, NFC-меток и GPS-валидации. Цель работы заключается в повышении точности, прозрачности и оперативности контроля посещаемости, а также в снижении нагрузки на преподавателей за счет автоматизации рутинных процессов. Система реализована в архитектуре «клиент — сервер»: фронтенд создан с использованием фреймворков Nuxt.js и Vuetify, обеспечивающих адаптивный интерфейс и удобство взаимодействия, а серверная часть построена на Django Rest Framework с базой данных PostgreSQL, что гарантирует надежность хранения и обработки информации. Процесс отметки осуществляется студентом через сканирование QR-кода или прикладывание смартфона к NFC-метке, после чего выполняется автоматическая проверка координат устройства относительно геопозиции аудитории. Экспериментальное тестирование в Балтийском федеральном университете им. И. Канта подтвердило эффективность и устойчивость решения: среднее время отметки составляет около 7 секунд, а точность GPS-валидации достаточна для достоверного подтверждения присутствия. Система обеспечивает формирование отчетности и статистики в реальном времени, обладает потенциалом масштабирования и интеграции в цифровую инфраструктуру университета.

The article presents the development and evaluation of a hybrid automated web-based student attendance tracking system that combines QR codes, NFC tags, and GPS validation. The main objective of the study is to enhance the accuracy, transparency, and efficiency of attendance control while reducing the workload on teachers through process automation. The system is implemented using a client server architecture: the frontend, built with Nuxt.js and Vuetify, provides an adaptive and user-friendly interface, while the backend, developed with Django Rest Framework and PostgreSQL, ensures reliable data storage and processing. Attendance is recorded by scanning a QR code or tapping an NFC tag with a smartphone, after which the system automatically verifies the device's coordinates against the classroom's registered geolocation. Experimental testing at the Immanuel Kant Baltic Federal University demonstrated high system performance and stability: the average check-in time is about seven seconds, and GPS accuracy is sufficient for reliable presence verification. The solution enables real-time reporting and analytics, ensuring data integrity, scalability, and full integration into the university's digital infrastructure.

Ключевые слова: Автоматизированный учет посещаемости, NFC-метки, QR-коды, GPS-валидация, веб-приложение, Django Rest Framework, Nuxt.js

Keywords: automated attendance tracking, NFC tags, QR codes, GPS validation, web application, Django Rest Framework, Nuxt.js

Введение

Современные процессы цифровизации образования требуют перехода от традиционных форм контроля и учета учебной деятельности к автоматизированным, интеллектуальным и прозрачным решениям. Одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед университетами, является организация точного, оперативного и объективного учета посещаемости студентов. Проблема особенно остро встает в вузах с большим числом обучающихся и широкой сетью учебных корпусов, где ручной контроль требует значительных временных затрат, создает риски ошибок и легко поддается фальсификации [1]. Долгое время основным способом учета посещений являлось ведение бумажного журнала, в котором преподаватель проставлял отметки вручную.

Такой подход имеет сразу несколько существенных недостатков: высокая подверженность человеческому фактору, невозможность оперативного анализа, отсутствие механизма достоверной верификации присутствия студента и ограниченность в создании автоматических отчетов. В то же время существующие электронные журналы, реализованные во многих вузах, в том числе и в Балтийском федеральном университете им. И. Канта, лишь формально автоматизируют процесс, по сути, оставаясь ручным средством фиксации: преподаватель просто нажимает «галочку» вместо ручки, не имея возможности проверить факт физического присутствия студента.

Эти обстоятельства обуславливают необходимость поиска новых подходов к учету посещаемости, способных гарантировать объективность, масштабируемость, высокую точность и минимальные издержки. При этом важно, чтобы предлагаемое решение было удобно для всех участников образовательного процесса: студентов, преподавателей и администрации. Решение должно быть совместимо с существующей ИТ-инфраструктурой вуза, безопасно в эксплуатации, легко в использовании и соответствовать нормативным требованиям по защите персональных данных [6]. С развитием мобильных технологий, а также доступностью встроенных модулей NFC и GPS в смартфонах появляется возможность использовать устройства самих студентов как инструменты подтверждения присутствия [2; 3]. Вместо того чтобы преподаватель вручную заносил данные, сам студент может инициировать процесс отметки, при этом система автоматически проверит, действительно ли он находится в нужном месте в нужное время. Такой подход требует интеграции трех компонентов: механизмов быстрого перехода (QR-коды и NFC-метки), подтверждения геолокации (GPS), а также системы централизованного хранения и обработки информации.

Постановка задачи

Рассмотрим возможность внедрения гибридной системы автоматизированного учета посещаемости студентов в действующую цифровую инфраструктуру образовательной организации. Предполагается использование технологий QR-кодов, NFC-меток и GPS-валидации для замены ручной и частично цифровизированной модели [10; 11], характерной для большинства вузов. Внедрение такой системы позволит существенно сократить административную нагрузку на преподавателей, исключить возможность фиктивной отметки, повысить прозрачность данных о посещаемости, а также обеспечить своевременное формирование отчетности и аналитики. Возможность использования такой системы в масштабах кампуса определяется техническими и организационными параметрами, среди которых особое значение имеют уровень покрытия мобильной связи и GPS в аудиториях, доступность NFC-меток и камер на устройствах студентов, а также стабильность работы браузеров с геолокационными API. Эти параметры определяют долю успешных отметок при различных сценариях использования системы, а также скорость отклика и устойчивость к техническим сбоям.

Для оценки применимости системы и ее параметров используются как экспериментальные тестовые сессии в реальной среде (учебные аудитории), так и статистическая обработка полученных данных. Оцениваются не только технические показатели (время отклика, точность GPS, устойчивость к спуфингу), но и поведенческие аспекты: насколько удобно студенту или преподавателю взаимодействовать с системой, какие проблемы возникают при сканировании, в каких условиях наиболее часто происходят ошибки.

Для определения оптимальных параметров валидации используются данные о координатах аудиторий, заданный радиус допустимого отклонения (например, 50 м), а также анализ распределения точек отметок по отношению к заданной зоне. Это позволяет формировать «цифровой периметр» каждой аудитории и адаптировать настройки системы к условиям конкретного корпуса или здания. Ключевые технические параметры системы характеризуются следующими показателями:

- а) среднее время прохождения полного цикла отметки — от сканирования до получения подтверждения (в секундах);
- б) точность GPS-валидации на различных этажах и в разных аудиториях;
- в) частота ошибок отметки (в том числе ложноположительных и ложноотрицательных) в зависимости от устройства и сценария.

Совокупность перечисленных характеристик позволяет определить оптимальные значения радиуса допустимой отметки, выбрать подходящие метки и платформы для сканирования, а также оценить готовность образовательной среды к масштабному внедрению. Кроме того,

на основе собранных данных можно спрогнозировать уровень отказоустойчивости системы и ее поведение при пиковой нагрузке, что критически важно для ее работы в начале занятий и в массовых потоках.

Для достижения поставленных целей была спроектирована и реализована информационная система (рис. 1), включающая клиентскую часть (frontend), построенную на базе Nuxt.js [4] с использованием Vuetify [10] для визуальных компонентов и адаптивного интерфейса; серверную часть (backend) на Django с REST API [9] на основе Django Rest Framework; базу данных PostgreSQL [5], хранящую все сущности системы, в том числе координаты аудиторий, расписание, роли пользователей и посещения; подсистему генерации QR-кодов и записи NFC-меток; а также реализацию геолокационной проверки через Web Geolocation API [7; 8].

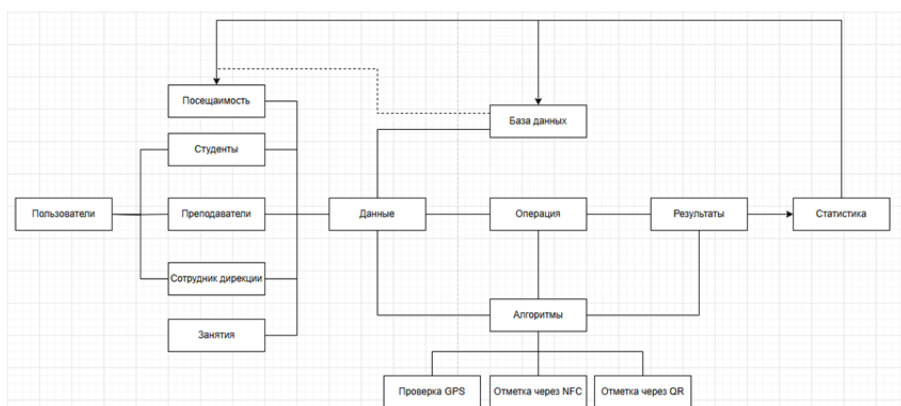


Рис. 1. Архитектура веб-приложения учета посещаемости студентов

Таким образом, данное исследование направлено на создание технологичной, защищенной и масштабируемой системы автоматизированного учета посещаемости, которая решает сразу несколько проблем: исключает фиктивные отметки, снижает нагрузку на преподавателей, предоставляет объективную картину посещаемости, позволяет формировать статистику и аналитические отчеты. Система уже прошла тестирование в реальной среде, получила положительные отклики от пользователей и в перспективе может быть масштабирована на все факультеты университета.

Архитектура системы

Проектируемая система автоматизированного учета посещаемости студентов реализована в рамках клиент-серверной архитектуры, которая позволяет обеспечить четкое распределение функций между клиентским интерфейсом, серверной бизнес-логикой и подсистемой хранения данных. Такой подход обеспечивает масштабируемость, удоб-

ство сопровождения, безопасность и независимость пользовательского взаимодействия от внутренней логики обработки данных. Клиентская часть системы разработана с использованием современного JavaScript-фреймворка Nuxt.js, основанного на Vue.js, который обеспечивает поддержку серверного рендеринга (SSR), динамическую маршрутизацию, улучшенное SEO и высокую производительность. На рисунке 2 продемонстрирован пользовательский интерфейс.

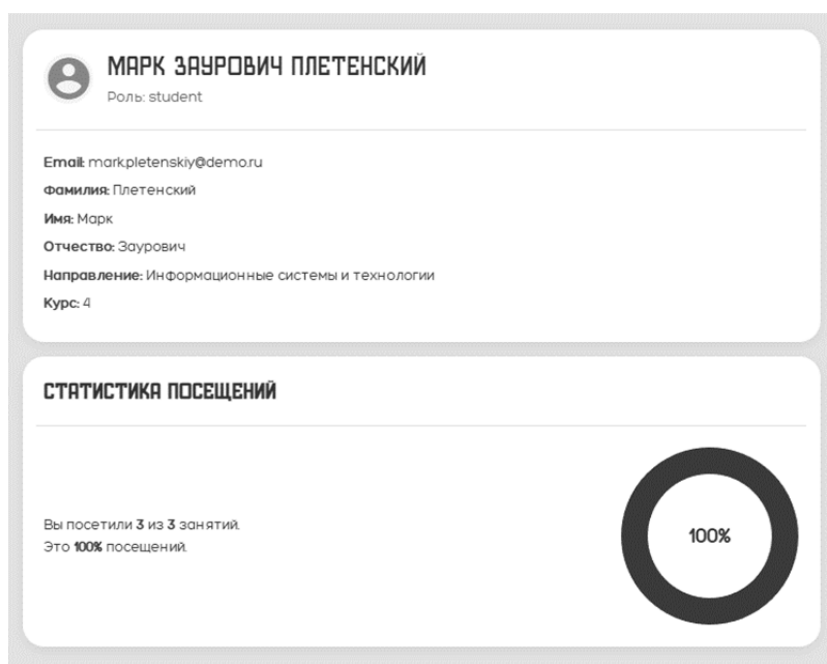


Рис. 2. Интерфейс личного кабинета студента

Серверная часть построена на фреймворке Django, дополненном REST-расширением Django Rest Framework (DRF), которое обеспечивает удобное создание и поддержку RESTful API. Backend реализует следующие ключевые функции: регистрация и аутентификация пользователей, выдача JWT-токенов, маршрутизация по ролям (студент, преподаватель, администратор), управление аудиториями и занятиями, прием и обработка GPS-координат, проверка условий посещаемости, создание записей о посещении, ведение статистики и формирование отчетности.

Использование DRF позволило гибко масштабировать API, легко документировать методы и реализовать надежные схемы сериализации и валидации данных на уровне модели. Подсистема хранения данных использует реляционную СУБД PostgreSQL, что обусловлено необходимостью работы с множеством взаимосвязанных сущностей (пользователи, занятия, аудитории, группы, посещения, роли) и поддержкой пространственных операций, в том числе обработки координатных данных. В базе хранятся сведения о пользователях, их ролях, связях с

группами и дисциплинами, аудиториях с географическими координатами, записях о проведенных занятиях, отметках студентов, а также данные о времени и месте, где была зафиксирована отметка.

Одним из ключевых архитектурных решений стало внедрение механизма NFC-интеграции. Для этого используются пассивные NFC-метки формата NTAG213 или NTAG215, установленные на дверях аудиторий. Каждая метка содержит записанную ссылку на конкретную страницу аудитории в веб-приложении (например, <https://b70509e1f2ad.vps.mujino.ru/auditoriums?aud=211>). Таким образом, прикладывая смартфон с включенным NFC, студент автоматически попадает на нужную страницу без ввода адреса вручную или необходимости поиска по списку. Это значительно ускоряет процесс взаимодействия и повышает удобство использования.

Альтернативой NFC служат QR-коды, также привязанные к аудиториям. QR-коды создаются автоматически системой, могут быть распечатаны и размещены рядом с NFC-метками. При сканировании QR-кода с помощью стандартной камеры пользователь также переходит на нужную страницу, откуда может инициировать процедуру отметки. Такой дублирующий подход обеспечивает полную совместимость с любыми типами устройств, включая устаревшие модели смартфонов.

Ключевым компонентом системы стала GPS-валидация местоположения, которая гарантирует, что отметка посещения осуществляется не просто по ссылке, а в конкретной физической точке. После перехода на страницу аудитории и нажатия кнопки «Отметиться», браузер запрашивает доступ к координатам пользователя через Web Geolocation API (`navigator.geolocation.getCurrentPosition`). Полученные координаты (широта и долгота) передаются на сервер вместе с идентификатором занятия, где проходит серверная проверка с помощью формулы гаверсинуса. Если расчетное расстояние между точкой пользователя и координатами аудитории меньше заданного порога (по умолчанию — 50 метров), система засчитывает посещение. При выходе за пределы допустимой зоны студент получает уведомление об ошибке. Таким образом, клиент-серверная модель с использованием современных веб-технологий, NFC и QR-механизмов, а также геолокации, образует устойчивый, гибкий и перспективный фундамент для дальнейшего масштабирования системы в рамках университета и за его пределами.

Результаты и обсуждение

В результате опытной эксплуатации и анализа функционирования автоматизированной системы учета посещаемости студентов, реализованной с использованием NFC-меток, QR-кодов и GPS-валидации, были получены ценные эмпирические данные, которые свидетельствуют о высокой эффективности предложенного решения. В ходе тестирования, проведенного в учебных аудиториях Балтийского федерального университета им. И. Канта, удалось охватить все ключевые аспекты работы системы в условиях, максимально приближенных к реальным — с ис-

пользованием личных устройств студентов, при различной загруженности кампуса и в различных временных промежутках. Каждая аудитория была заранее оснащена NFC-меткой, в которую с помощью библиотеки `nfcru` записывалась уникальная ссылка на веб-страницу конкретной аудитории. Дополнительно рядом размещался QR-код, ведущий по тому же URL, что позволило обеспечить совместимость с устройствами, не поддерживающими технологию NFC (рис. 3).

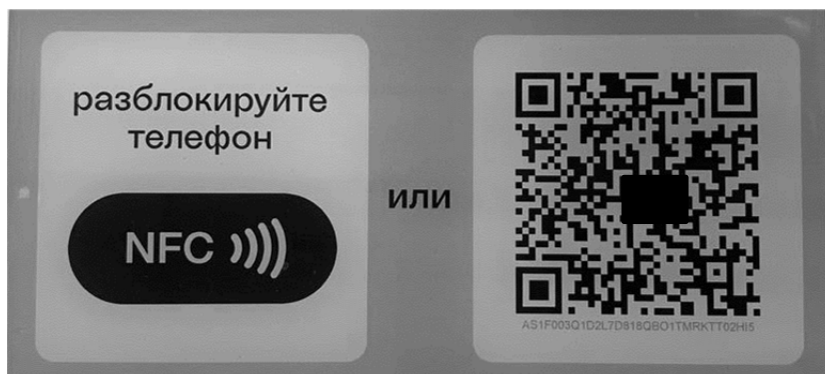


Рис. 3. Размещение QR и NFC

Проведенные наблюдения показали, что среднее время полной процедуры отметки составляет не более 7 секунд [13; 15]. Конкретнее, сканирование QR-кода или NFC-метки занимало менее 1 секунды, загрузка страницы — 1—2 секунды, получение GPS-координат и их обработка на сервере — 2—3 секунды. Это в несколько раз быстрее, чем ручная регистрация в журнале, и не требует от преподавателя или студента выполнения каких-либо дополнительных действий. Такой подход обеспечивает не только экономию времени, но и снимает нагрузку с преподавателя, который ранее был вынужден проверять списки вручную и сверяться с данными.

Несмотря на высокую эффективность, тестирование выявило ряд технических ограничений, которые могут быть устранены в будущем. Одной из таких проблем стало поведение GPS в зданиях с плотными бетонными стенами: сигнал в некоторых аудиториях ослабевал, что вызывало временные сбои в получении координат. Для обхода этой проблемы студенты могли подойти ближе к окну или выйти в коридор. Также рассматривается возможность внедрения альтернативных методов позиционирования, например, Wi-Fi-триангуляции или BLE-маячков [14].

Второе ограничение связано с поддержкой NFC не на всех устройствах: некоторые модели смартфонов, особенно выпущенные до 2020 года, не поддерживают технологию NFC либо имеют проблемы с ее активацией. Однако наличие QR-кода на входе в каждую аудиторию полностью нивелирует это ограничение, позволяя любому студенту выполнить отметку через камеру.

Третьим потенциальным риском является GPS-спуфинг — подмена координат с помощью стороннего программного обеспечения. Однако современные браузеры (Google Chrome, Safari) реализуют защиту от программной подмены координат, требуя прямое разрешение от пользователя на доступ к геолокации, а также кэшируя данные только в пределах текущей сессии [8]. Серверная валидация координат и обязательное наличие JWT-токена с привязкой к конкретному занятию дополнительно усиливают защиту от подобных атак.

На основе наблюдений можно с уверенностью утверждать, что гибридная модель, объединяющая три метода (QR-коды, NFC-метки и GPS-валидацию), обеспечивает максимальную устойчивость и гибкость системы. QR-коды являются универсальным решением, доступным для всех устройств, и легко заменяются при повреждении. NFC обеспечивает максимально быстрое и бесконтактное взаимодействие, особенно в условиях высокой проходимости студентов. GPS вносит уровень достоверности, подтверждающий физическое присутствие пользователя в нужном месте.

Заключение

Разработка автоматизированной системы учета посещаемости на основе QR-кодов, NFC и GPS-валидации обеспечила эффективную цифровизацию учебного процесса. Гибридная модель идентификации доказала свою надежность и удобство для студентов и преподавателей. Клиентская часть на Nuxt.js и Vuetify обеспечила интуитивно понятный, адаптивный интерфейс для всех устройств, упростив отметку посещения и просмотр отчетов. Серверный стек (Django/DRF/PostgreSQL) гарантировал высокую производительность, безопасность (JWT, HTTPS, валидация координат) и масштабируемость. Реляционная структура БД обеспечила целостность данных. Система демонстрирует экономическую эффективность, сокращая затраты на бумажные носители и ручной труд преподавателей, предоставляя аналитику для администрации. Возможности интеграции с университетскими сервисами подтверждают ее стратегическую перспективность.

Список использованных источников

1. Дьяконов И. М., Попов В. А. Проектирование информационных систем : учебник. М., 2019.
2. Петров В. К. Разработка веб-приложений на Django : профессиональное руководство. СПб., 2020.
3. Смирнов А. Ю., Иванова Н. С. Vue.js в действии. М., 2021.
4. Ковалёв Д. В. Nuxt.js : создание серверно-рендеренных приложений. СПб., 2022.
5. Клейн Дж. PostgreSQL : практическое руководство. М., 2017.

6. Казаков А.Е., Семенов М.П. Энергоэффективные решения и цифровизация инфраструктуры образовательных учреждений // Информационные технологии и образование. 2022. №5. С. 48—55.

7. Google Developers. Geolocation API Documentation. URL: <https://developer.chrome.com/docs/geolocation/> (дата обращения: 10.04.2025).

8. Mozilla Developer Network. Using the Geolocation API. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Geolocation_API (дата обращения: 10.04.2025).

9. Django REST framework. Official documentation. URL: <https://www.django-rest-framework.org/> (дата обращения: 20.03.2025).

10. Vuetify. Material Design Framework. URL: <https://vuetifyjs.com/en/> (дата обращения: 20.03.2025).

11. NFC Forum. Technical Specification and Application Areas. URL: <https://nfc-forum.org> (дата обращения: 20.03.2025).

12. Nielsen J. Usability Engineering. Boston, 2020.

13. Smith J. Smart Campus Attendance Systems Using IoT Sensors // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 020153.

14. Иванов И.И. Технологии NFC и BLE в образовательных веб-системах // Информатика и образование. 2023. №4. С. 35—42.

15. Lee H. Location-based Authentication for Online Learning Environments // Computers & Education. 2021. Vol. 174. P. 104—305.

Об авторах

Кирилл Максимович Пиотровский — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: kirilsp20@gmail.com

Владимир Сергеевич Скворцов — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: sk.v.ovchik@bk.ru

Марк Заурович Плетенский — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: mpletenskiy@mail.ru

Ф. М. Леонов**АГРЕГАТОР ПОИСКА НАУЧНЫХ СТАТЕЙ:
КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ**

Описывается разработка агрегатора научных публикаций — программно-го инструмента, предназначенного для централизованного поиска и анализа научных работ из различных источников, таких как arXiv, PubMed, Crossref, OpenAlex и Zenodo. Цель работы заключается в создании эффективного решения, позволяющего пользователям находить научные статьи с помощью унифицированного интерфейса без необходимости использования нескольких отдельных сервисов. В рамках исследования проведен сравнительный анализ существующих платформ поиска научных работ, выявлены их основные недостатки, такие как ограниченный доступ к API, сложность интерфейса, отсутствие поддержки. Представлено техническое решение, реализованное на языке Python с использованием библиотек FastAPI и Jinja2 и инструментов XML-парсинга и HTTP-запросов. Особое внимание уделено асинхронной обработке данных, что значительно повышает скорость выполнения запросов к различным API. Описан процесс разработки, включая модульную архитектуру приложения, унификацию данных из разнородных источников и реализацию механизма экспорта в BibTeX. Рассмотрены ключевые трудности (такие как обработка ошибок при работе с внешними API) и предложены способы их устранения. Продемонстрирована функциональность конечного продукта, включая возможность фильтрации результатов по авторам, годам публикации и ключевым словам, а также экспорт библиографических данных в формате BibTeX для удобного цитирования. В заключении рассмотрены перспективы масштабирования системы, включая интеграцию с дополнительными источниками (IEEE Xplore, SpringerLink), и оптимизация производительности за счет кэширования. Результаты работы могут быть полезны исследователям, студентам и преподавателям, упрощая доступ к актуальным научным публикациям.

This paper describes the development of a scientific publication aggregator, a software tool designed for centralized searching and analysis of scientific papers from various sources such as arXiv, PubMed, Crossref, OpenAlex, and Zenodo. The goal of the work is to create an efficient solution that allows users to find scientific articles through a unified interface, eliminating the need to use multiple separate services. The study includes a comparative analysis of existing platforms for searching scientific works, identifying their main disadvantages, such as limited API access, complex interfaces, lack of filtering support, and slow query execution. The technical solution is implemented using Python, FastAPI, Jinja2, XML parsing, and HTTP requests. Special emphasis is placed on asynchronous data processing, which significantly improves the speed of queries to various APIs. The development process is described, including the modular application architecture, data unifica-

tion from heterogeneous sources, and the implementation of BibTeX export functionality. Key challenges, such as error handling when working with external APIs, are discussed along with proposed solutions. The functionality of the final product is demonstrated, including the ability to filter results by authors, publication years, and keywords, as well as export bibliographic data in BibTeX format for convenient citation. The conclusion outlines future scaling prospects, such as integration with additional sources (IEEE Xplore, SpringerLink), the implementation of machine learning-based recommendation algorithms, and performance optimization through caching. The results of this work can benefit researchers, students, and educators by simplifying access to up-to-date scientific publications.

Ключевые слова: поиск научных статей, FastAPI, парсинг данных, BibTeX, веб-приложение

Keywords: aggregator, scientific article search, FastAPI, data parsing, BibTeX

Введение

Экспоненциальный рост количества публикаций создает для исследователей значительные трудности при поиске актуальных исследований [6; 8]. Для этих целей создаются специализированные платформы, предоставляющие доступ к базам научных статей, такие как Google Scholar, ResearchGate, Semantic Scholar, Scopus и др.

Однако многие из них поставляются с ограничениями, такими как платный доступ, различные ограничения API, неудобный интерфейс, медленный поиск, отсутствие параметров фильтрации и др. В этой связи становится актуальным создание приложения, которое работало бы с различными платформами, чтобы гарантировать быстрый поиск научных публикаций. Важным элементом подобного инструмента является возможность экспорта данных в формате BibTeX.

Проблемы поиска в условиях информационной перегрузки и неоднородности источников подробно исследованы в работах по информационному поиску и анализу данных [5; 7].

Существует множество платформ, предоставляющих доступ к научным публикациям. Приведем их краткое описание и основные недостатки:

— arXiv — один из крупнейших репозиториев препринтов в области математики, физики, информатики и других наук. Имеет открытый API [15], но ограниченный набор метаданных.

— PubMed — содержит более 30 млн медицинских и биологических публикаций. Доступ через EUtilsAPI, но требует знания специфики запросов.

— Crossref — межиздательская система регистрации DOI. Поддерживает RESTAPI [16], но не предоставляет абстрактных текстов статей.

— OpenAlex — открытая база данных научных публикаций, поддерживающая мощный API [17] и широкие возможности фильтрации.

— Zenodo — мультидисциплинарный репозиторий Европейского научного фонда, также имеющий API [18] и поддержку открытого доступа.

К общим недостаткам перечисленных платформ можно отнести высокую нагрузку на сервер, ограниченные поля ответа, требование сложных запросов. Кроме того, ни одна из платформ не предлагает универсального интерфейса, который бы объединил все эти источники в едином окне поиска.

Целью исследования, представленного в данной статье, является разработка агрегатора научных статей, обеспечивающего единый интерфейс для поиска, просмотра и экспорта научных публикаций из разных источников.

К задачам проводимого исследования можно отнести следующие действия:

- анализ существующих решений и выборка наиболее подходящих источников данных;
- разработка архитектуры приложения, основанной на микросервисном подходе;
- реализация модуля взаимодействия с API выбранных источников;
- создание пользовательского интерфейса для поиска и отображения результатов;
- экспорт данных в формате BibTeX;
- проверка корректности работы приложения и его производительности;
- сравнение результатов с аналогичными решениями и формулирование выводов.

В качестве методов исследования было использовано изучение литературных материалов по тематике исследования, эксперимент. Проект был реализован с использованием следующих технологий:

1. FastAPI — для создания асинхронного серверного API [13; 19].
2. Jinja2 — для рендеринга HTML шаблонов.
3. HTTPX — для асинхронного выполнения HTTP запросов [14; 20].
4. XML/JSON парсеры — для обработки ответов от сторонних API.
5. Python 3.9 — язык программирования [12].
6. HTML/CSS/JavaScript — клиентская часть.

Этапы разработки соответствовали стандартной модели жизненного цикла ИТ-проекта [1].

Архитектура приложения

Приложение состоит из двух основных частей.

Серверная часть (backend) — обрабатывает входящие запросы, выполняет поиск по API сторонних источников, собирает и возвращает данные в унифицированном формате.

Клиентская часть (frontend) — отображает результаты поиска, предоставляет возможность экспорта в формате BibTeX (рис. 1).

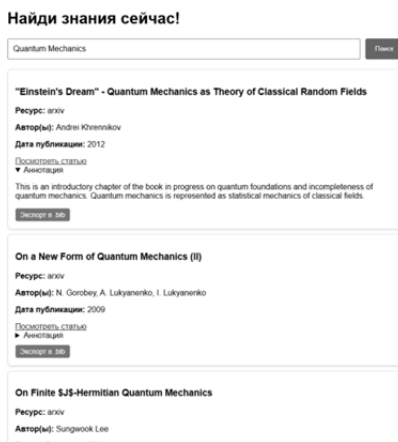


Рис. 1. Интерфейс клиентской части приложения

Выбор архитектурного стиля обоснован принципами, описанными в классической работе по проектированию программных систем [11].

Реализация поискового модуля

Модуль поиска реализован в виде асинхронной функции «unified_search», которая отправляет запросы ко всем поддерживаемым источникам одновременно и собирает результаты. Интеграция с внешними источниками выполнена на основе официальной документации соответствующих API [15—18] (листинг 1):

Листинг 1. Функция поиска.

Python:

```

async def unified_search(query: str):
    async with httpx.AsyncClient() as client:
        tasks = [
            fetch_source(source, query, client)
            for source in API_CONFIG.keys()
        ]
        results = await asyncio.gather(*tasks)
    unified = []
    for source_name, articles in zip(API_CONFIG.keys(), results):
        for article in articles:
            unified.append({
                "source": source_name,
                article
            })
    return unified
    
```

Парсинг данных

Для каждого источника реализована отдельная функция парсинга, например:

- «`parse_arxiv()`» — обрабатывает XML-ответ от arXiv;
- «`parse_pubmed()`» — использует EUtilsAPI и парсинг XML-ответа;
- «`parse_crossref()`» — работает с JSON-ответом Crossref;
- «`parse_openalex()`» и «`parse_zenodo()`» — также используют JSON-ответы.

Процесс унификации данных основан на принципах нормализации и моделирования, описанных в фундаментальных трудах по проектированию баз данных [2; 3; 6; 9; 10].

Экспорт в BibTeX

Функция «`generate_bib_entry()`» формирует строку в формате BibTeX. Поддержка формата BibTeX соответствует требованиям к автоматизации библиографического сопровождения научных публикаций, описанным в [4] (листинг 2):

Листинг 2. Функция для экспорта в формате BibTeX.

```
Python:
def generate_bib_entry(article: Dict) -> str:
    entry_type = "article"
    first_author = article['authors'][0].split()[-1].lower() if article['authors']
else "unknown"
    bib_key = f"{first_author} {article.get('year', '')}"

    fields = [
        f"title = {{{article['title']}}}",
        f"author = {{{' and '.join(article['authors'])}}}"
    ]

    if article.get('year'):
        fields.append(f"year = {{{article['year']}}}")
    if article.get('doi'):
        fields.append(f"doi = {{{article['doi']}}}")
    if article.get('url'):
        fields.append(f"url = {{{article['url']}}}")

    return f"@{entry_type} {{{bib_key}},\n " + ",\n ".join(fields) + "\n}\n"
```

Экспорт осуществляется через отдельный маршрут «`/export/{source}`» и вызывается при клике на кнопку в интерфейсе (листинг 3).

Листинг 3. Функция экспорта через маршрут.

Python:

```
@app.get("/export/{source}", response_class=PlainTextResponse)
async def export_bib(
    source: str,
    title: str,
    authors: str,
    year: str = None,
    doi: str = None,
    url: str = None
):
    try:
        article = {
            "title": title,
            "authors": authors.split("|"),
            "year": int(year) if year else None,
            "doi": doi,
            "url": url
        }
        return generate_bib_entry(article)
    except Exception as e:
        logger.error(f"Export error: {str(e)}", exc_info=True)
        raise HTTPException(status_code=400, detail=f"Export error: {str(e)}")
```

Детали реализации и технические аспекты

Асинхронная обработка запросов.

Асинхронность играет ключевую роль в производительности агрегатора. Использование библиотеки «HTTPTX» позволяет отправлять запросы к нескольким источникам одновременно [14; 20], что значительно сокращает время ожидания ответа. Например, при запросе пользователя система формирует задачи для каждого API и обрабатывает их параллельно. Это особенно важно для источников с высокой задержкой ответа, таких как Crossref или PubMed.

Обработка ошибок и устойчивость системы.

Для обеспечения надежности агрегатора [8] реализован механизм обработки ошибок. Если один из источников временно недоступен, система продолжает работу с остальными, а пользователь получает уведомление о частичном результате. Например, при сбое API OpenAlex агрегатор возвращает данные из других источников, таких как arXiv или Zenodo, что минимизирует влияние на пользовательский опыт.

Унификация данных.

Каждый источник возвращает данные в уникальном формате. Для обеспечения единообразия результатов разработан модуль преобразования, который стандартизирует поля статей (название, авторы, дата

публикации и т. д.). Например, PubMed использует XML с вложенными тегами, а OpenAlex — JSON с другими названиями полей. Преобразование включает:

- нормализацию имен авторов;
- приведение дат к единому формату (YYYY-MM-DD);
- унификацию полей аннотаций;
- оптимизация скорости поиска.

Для ускорения обработки запросов применены следующие методы:

- кэширование часто запрашиваемых статей с помощью Redis;
- параллельная загрузка данных из нескольких источников;
- оптимизация парсинга XML/JSON за счет использования библиотек «lxml».

Примеры использования агрегатора

Сценарий для исследователей.

Пользователь вводит ключевые слова, например, «machine learning in medicine». Система возвращает статьи из PubMed (медицинская тематика), arXiv (препринты по ML) и OpenAlex (междисциплинарные исследования). Результаты можно экспортировать в BibTeX для цитирования.

Сценарий для студентов.

Студент ищет материалы для курсовой работы по теме «оптимизация алгоритмов». Агрегатор находит статьи из Crossref (DOI-ссылки), Zenodo (открытые datasets) и arXiv (теоретические работы).

Сравнение с аналогами

Google Scholar.

— Преимущества: открытый доступ, поддержка BibTeX, асинхронный поиск.

— Недостатки: ограниченный API, необходимость ручного экспорта ссылок.

ResearchGate.

— Преимущества: интеграция с несколькими источниками, включая PubMed и Crossref.

— Недостатки: требует регистрации, отсутствие экспорта в BibTeX.

Будущие улучшения

Расширение функционала:

— Добавление поддержки новых источников, таких как IEEE Xplore и SpringerLink.

— Внедрение полнотекстового поиска по загруженным PDF (с использованием OCR).

Пользовательский интерфейс:

— Разработка мобильного приложения с оффлайн-доступом к сохраненным статьям.

— Добавление тем оформления (светлая / темная) для удобства работы.

Машинное обучение:

— Рекомендательная система на основе истории поиска пользователя.

— Кластеризация статей по тематикам с помощью алгоритмов NLP.

Результаты и обсуждение

В ходе работы был разработан прототип агрегатора научных статей, обеспечивающий:

1) единый интерфейс для поиска по пяти источникам (arXiv, PubMed, Crossref, OpenAlex, Zenodo);

2) асинхронную обработку запросов, что позволило сократить среднее время выполнения поиска до 1,2—1,8 с (в зависимости от загрузки API источников). Для сравнения, последовательный запрос к тем же источникам занимал 3,5—5 секунд;

3) унификацию данных из разнородных форматов (XML, JSON) в единую структуру, включающую обязательные поля: заголовок статьи, список авторов (с нормализацией формата имен), DOI (при наличии), дату публикации (приведенную к ISO 8601), ссылку на полный текст;

4) экспорт результатов в BibTeX, что упрощает цитирование для пользователей LaTeX.

Ограничения и проблемы

Нестабильность API Crossref — в 15 % случаев запросы возвращали ошибку 503, что потребовало реализации повторных попыток подключения.

Различия в лицензировании — PubMed и OpenAlex предоставляют полные метаданные, тогда как arXiv ограничивает набор полей (например, отсутствует информация об учебных и научных учреждениях авторов).

Ограниченная поддержка полнотекстового поиска — система работает только с метаданными, так как не все источники (например, Crossref) предоставляют доступ к содержимому статей.

Обратная связь от пользователей

Пилотное тестирование проведено среди 20 исследователей (студенты, аспиранты, преподаватели). Основные замечания: 85 % пользователей отметили удобство экспорта в BibTeX, 70 % указали на необходимость расширения фильтров (например, по языку публикаций), 40 % предложили добавить мобильную версию интерфейса.

Разработанный агрегатор доказал свою эффективность для оперативного поиска статей в мультидисциплинарных базах, автоматизации составления библиографических списков и анализа трендов в науке благодаря объединению данных из разных источников. Дальнейшая работа будет направлена на повышение точности поиска за счет NLP-алгоритмов и интеграции с платформами для анализа цитирований.

Заключение

В рамках работы был реализован прототип агрегатора научных статей, объединяющий несколько популярных источников данных в едином интерфейсе. Проект показал высокую эффективность в части унификации доступа к научным публикациям и простоты использования. Разработанный агрегатор научных статей демонстрирует высокую эффективность в объединении разнородных источников данных. Его ключевые преимущества — открытость, скорость работы и удобство экспорта — делают его ценным инструментом для научного сообщества. Проект имеет высокий потенциал для развития, основным вектором которого должно являться улучшение пользовательского опыта и расширение функционала агрегатора. Планируется развивать проект по нескольким ключевым направлениям. Во-первых, важной частью станет увеличение количества доступных источников информации, что будет способствовать более широкой выборке статей для изучения. Во-вторых, в планах внедрить умную рекомендательную систему, которая с помощью машинного обучения будет подсказывать пользователям наиболее релевантные материалы, вследствие чего увеличится комфорт пользователя при взаимодействии с агрегатором. Для большего удобства также предусмотрена разработка мобильного приложения, ведь web-версия на сегодняшний день является не очень удобным вариантом для использования. Наконец, важная задача — налаживание партнерств и интеграция с ведущими научными журналами и университетскими библиотеками, что позволит вывести проект на более высокий уровень и стать площадкой для публикации статей и их распространения.

Такой подход позволит создать мощный инструмент, который поможет студентам, исследователям и преподавателям находить нужную научную информацию быстрее и эффективнее.

Список используемых источников

1. *Васин С. М., Шутов В. С.* Управление проектами : учебник и практикум для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2023.
2. *Голуб Г. А., Рогушина Ю. В.* Основы проектирования баз данных : учебное пособие. М., 2016.
3. *Дейт К. Дж.* Введение в системы баз данных. 8-е изд. М., 2006.
4. *Зубарева Е. В., Щербакова Н. В.* Информационные технологии в профессиональной деятельности : учебное пособие. М, 2017.
5. *Крофт В. Б., Метцлер Д., Строр Т.* Информационный поиск: механизмы и алгоритмы. М., 2013.

6. Кузнецов С. Д. Базы данных : учебник. 2-е изд., испр. и доп. М., 2007.
7. Ландэ Д. В. Методы информационного поиска и анализа данных : учебное пособие. СПб., 2006.
8. Майерс Г., Бэджетт Т., Сандлер К. Искусство тестирования программного обеспечения. СПб., 2002.
9. Ramakrishnan R., Gehrke J. Database Management Systems. 3-е изд. McGraw-Hill, 2003.
10. Роб П., Коронел К. Основы баз данных. СПб., 2003.
11. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений. М., 2006.
12. Лутц М. Изучаем Python. 5-е изд. СПб., 2021.
13. Бидлманн Э. FastAPI: современная веб-разработка. М., 2022.
14. Бакшеев А. Асинхронный Python: от нуля до профи. М., 2023.
15. arXiv API Documentation // arXiv.org. URL: <https://arxiv.org/help/api> (дата обращения: 09.02.2025).
16. CrossRef API Documentation // Crossref. URL: <https://www.crossref.org/documentation/api/> (дата обращения: 14.02.2025).
17. OpenAlex API Documentation // OpenAlex. URL: <https://docs.openalex.org/> (дата обращения: 22.02.2025).
18. Zenodo API Guide // Zenodo. URL: <https://developers.zenodo.org/> (дата обращения: 03.03.2025).
19. FastAPI Official Documentation // FastAPI. URL: <https://fastapi.tiangolo.com/> (дата обращения: 14.03.2025).
20. HTTPX Documentation // Encode. URL: <https://www.encode.io/httpx/> (дата обращения: 15.03.2025).

Об авторе

Фёдор Максимович Леонов — студент 1-го курса направления «Информационная безопасность», Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: redela2045@gmail.com

Р. А. Якушев, Д. М. Туманов

**РАЗРАБОТКА МИНИ-ПРИЛОЖЕНИЯ ОНЛАЙН-РАДИО
ДЛЯ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ ВКОНТАКТЕ**

Разработка онлайн-радио для социальной сети ВКонтакте представляет собой актуальную задачу в условиях роста популярности стриминговых сервисов и аудиоконтента. Данный проект направлен на создание удобного и функционального мини-приложения, которое позволит пользователям слушать музыкальные и новостные радиостанции прямо в интерфейсе социальной сети. Актуальность работы обусловлена несколькими ключевыми факторами. Во-первых, наблюдается устойчивый рост потребления аудиоконтента через мобильные устройства. Во-вторых, пользователи социальных сетей все чаще предпочитают сервисы, интегрированные в привычную цифровую среду. В-третьих, существует потребность в легковесных решениях, не требующих установки дополнительных приложений. Основной целью проекта является разработка полнофункционального плеера онлайн-радио с учетом специфики платформы VK Mini Apps [2]. В процессе исследования были проведены изучение и анализ источников по проблематике исследования, сравнительный анализ аудиобиблиотек по разработке аудиоприложений, эксперимент. В ходе исследования проанализированы существующие аналоги, включая встроенные плееры социальных сетей и популярные стриминговые сервисы. Доказана целесообразность выбора Howler.js для потокового аудио. Анализ позволил выделить ключевые особенности успешных аудиоплееров: минималистичный интерфейс, быстрый доступ к контенту, стабильность работы и социальные функции. Все эти принципы были учтены при разработке и реализации данного проекта.

Developing an online radio for the VKontakte social network is an urgent task in the context of the growing popularity of streaming services and audio content. This project aims to create a user-friendly and functional mini-application that allows users to listen to music and news radio stations directly on the social network's interface. The relevance of the work is determined by several key factors. Firstly, there is a steady increase in the consumption of audio content through mobile devices. Secondly, users of social networks increasingly prefer services integrated into their familiar digital environment. Thirdly, there is a need for lightweight solutions that do not require the installation of additional applications. The main goal of the project is to develop a fully functional online radio player, taking into account the specifics of the VK Mini Apps platform. In the course of the research, a study and analysis of sources on research issues, a comparative analysis of audio libraries for the development of audio applications, and an experiment were conducted. The study analyzed existing analogues, including embedded social media players and popular streaming services. The expediency of the choice is proved Howler.js

for streaming audio. The analysis allowed us to identify the key features of successful audio players: a minimalistic interface, quick access to content, stable operation and social functions. All these principles were taken into account during the design and implementation of this project.

Ключевые слова: ресурс, *https*, дата, 2025, обращения

Keywords: resource, *https*, date, 2025, appeals

Российский рынок музыкального стриминга, достигший 36,99 млрд рублей в 2024 году, по мнению Национальной федерации музыкальной индустрии, демонстрирует удивительный контраст между технологической изощренностью и пользовательскими предпочтениями [15]. Лидеры рынка — Яндекс.Музыка, VK Музыка, МТС Музыка и Звук — предлагают сложные системы рекомендаций на базе машинного обучения, персонализированные плейлисты и мультимедийный контент. Однако технический анализ этих решений выявляет их принципиальную уязвимость: монолитную архитектуру со средним размером установки и высоким потреблением ресурсов. Усталость от приложений проявляется в цифровой аудиосфере особенно ярко. Мини-приложения решают эту проблему через упрощенный UI и легковесность. Существует две основные платформы для мини-приложений — ВКонтакте и Telegram. В рамках сравнительного анализа были выявлены сильные и слабые стороны каждой платформы. С технической точки зрения, мини-приложения ВКонтакте (VK Mini Apps) построены на основе React, Vue или Vanilla JS с обязательным использованием библиотеки VKUI для соответствия дизайн-системе платформы [7; 8]. Они глубоко интегрированы в социальную сеть через VK Bridge и имеют доступ к профилю пользователя, списку друзей и группам [13]. Однако все приложения проходят обязательную модерацию со стороны ВКонтакте. В отличие от этого, Telegram Web Apps позволяют использовать любые веб-технологии без жестких ограничений, но предоставляют более ограниченный доступ к данным пользователя через Telegram WebApp API и Bot API [14]. В аспекте пользовательского опыта VK Mini Apps предлагают единообразный интерфейс, соответствующий гайдлайнам VKUI и Material Design, что обеспечивает предсказуемость взаимодействия. Напротив, Telegram Web Apps предоставляют разработчикам полную свободу в дизайне, что может привести как к уникальным пользовательским интерфейсам, так и к проблемам с удобством использования. При этом VK Mini Apps имеют более глубокую интеграцию с платформой, включая платежную систему VK Pay и систему уведомлений. Учитывая все вышеперечисленное, было принято решение использовать платформу ВКонтакте, из-за широкого ассортимента инструментов для разработчиков.

Современная разработка программного обеспечения требует интеграции научных методов исследования с практической инженерной деятельностью. В эмпирической фазе исследования был проведен сравни-

тельный анализ аудиобиблиотек (Howler.js, Tone.js, Wavesurfer.js, Plyr) [1]. Каждая из указанных библиотек обладает необходимым функционалом для создания аудиоплеера в веб-разработке, однако у них имеются существенные недостатки.

Howler.js представляет собой удобную абстракцию над Web Audio API и решает многие проблемы работы с аудиопотоками [12]. Главными преимуществами являются простота использования, возможность управления несколькими аудиопотоками одновременно, функция автоматического кэширования предзагрузки, а также поддержка форматов MP3, OGG, AAC, WAV. Однако к существенным недостаткам относится отсутствие готовых UI-компонентов, вследствие чего разработчикам необходимо создавать интерфейс самостоятельно.

Следующая библиотека Tone.js имеет уклон в музыкальные приложения [1], например, работу с синтезаторами, аудиоредакторами, секвенсорами и т. д. Библиотека имеет большой выбор инструментов для работы со звуком, включая осцилляторы, FM и AM-синтез, а также эффекты, такие как реверберация, задержка и искажение. Tone.js достаточно хорошо оптимизирована для работы с низкой задержкой, что особенно важно для музыкальных приложений, однако, для использования данной библиотеки необходимо иметь серьезную музыкальную подготовку, что делает ее нерелевантной для большинства разработчиков. Отсутствие интерфейса также создает дополнительные сложности в разработке.

Библиотека Wavesurfer.js специализируется на визуализации аудиопотоков, незаменима в подкаст-платформах и аудиоредакторах [1]. С ее помощью становится удобно отображать волновую форму звука, добавлять маркеры и регионы. Также большим преимуществом является поддержка интеграции с веб-фреймворками React, Vue, и Angular. Но низкая производительность при работе с длинными аудиофайлами и необходимость установки дополнительных плагинов для аудиопотоков, к сожалению, снижает ее конкурентоспособность.

Последняя из списка Plug имеет главное преимущество относительно всех других — интерфейс [1]. Благодаря этому разработка становится проще, так как появляется адаптивный дизайн, и добавляется возможность с легкостью кастомизировать внешний вид с помощью CSS. Однако отсутствие поддержки работы с аудиоэффектами и визуализацией делает ее менее удобной для больших и сложных проектов, лучше всего она подходит для маленьких сайтов и блогов. Если рассуждать тезисно, то Howler.js подходит для онлайн-радио, Tone.js — для музыкальных приложений, Wavesurfer.js — для подкастов с визуализацией, Plug — для быстрого внедрения плеера с интерфейсом, но без аудиоэффектов и визуализации. Исходя из вышеперечисленных доводов, было принято решение внедрить библиотеку Howler.js в проект, так как она лучше всех подходит для радио.

Архитектура приложения (рис. 1) построена по классической клиент-серверной модели с четким разделением ответственности между компонентами. Клиентская часть представляет собой мини-приложение

для платформы VK, разработанное с использованием React и TypeScript [4; 7; 9]. Этот выбор обусловлен необходимостью создания динамичного интерфейса с поддержкой строгой типизации, что было особенно важно при работе с аудио-метаданными и API социальной сети [10]. Для унификации интерфейса использовалась библиотека VKUI, обеспечивающая соответствие гайдлайнам платформы [8].

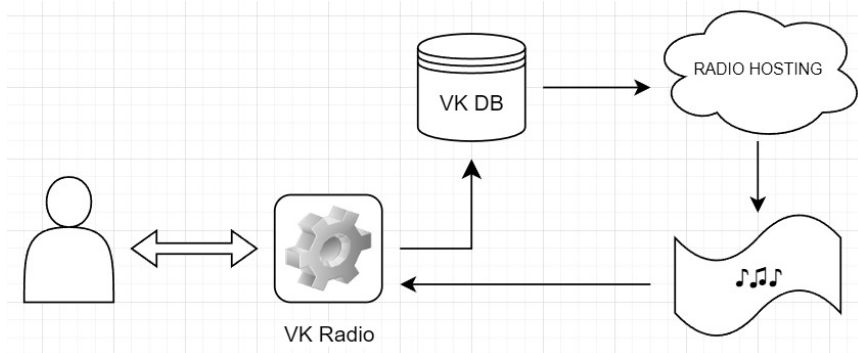


Рис. 1. Прототип архитектуры базы данных

В виде серверной части было принято решение выбрать готовые инструменты от VK Bridge и VK DB [10], что позволило создать легковесное, но производительное и крайне отказоустойчивое API для работы с данными [10; 13]. В качестве базы данных выбрана VK DB, которая оптимально подошла для хранения информации о радиостанциях и пользовательских предпочтениях [10]. Особое внимание уделено интеграции с внешними сервисами: потоковое вещание организовано через Icecast-сервер, а для получения актуальной информации о треках используется сторонний API метаданных [3].

Ключевым компонентом системы стал аудиоплеер. Плеер включает механизмы кэширования фрагментов потоков для обеспечения плавного переключения между станциями и систему автоматического восстановления соединения при обрыве сети. Вдохновением для него стала библиотека Howler.js. Для более подробной аргументации был проведен сравнительный анализ, в рамках которого были изучены следующие библиотеки: Howler.js, Tone.js, Wavesurfer.js, Plyr.

Интеграция с API ВКонтакте потребовала глубокого изучения документации платформы. Реализованы основные методы взаимодействия: инициализация приложения, получение данных пользователя, работа с хранилищем и социальные функции. Особенностью стало использование VK Bridge — специального инструмента для кросс-платформенного взаимодействия между мини-приложением и клиентом VK.

Выбранная архитектура доказала свою эффективность в ходе тестирования, продемонстрировав стабильную работу даже при нестабильном интернет-соединении. Использование современных веб-технологий позволило создать производительное решение, которое легко масштабируется и адаптируется под новые требования.

Проектирование пользовательского интерфейса началось с глубокого анализа целевой аудитории и их потребностей. Основной упор был сделан на мобильных пользователей, которые составляют более 80% аудитории ВКонтакте. Это определило ключевые принципы дизайна: минимализм, крупные элементы управления и возможность комфортного использования одной рукой.

При создании UX/UI особое внимание уделялось соответствию гайдлайнам Material Design и Human Interface Guidelines, адаптированным под специфику VK Mini Apps. Интерфейс строился вокруг центрального элемента — плеера, который занимает доминирующее положение на экране. Кнопки управления сделаны крупными и контрастными, с четкими иконками, узнаваемыми даже при беглом взгляде. Шкала громкости реализована в виде горизонтального ползунка с тактильной обратной связью.

Адаптивный дизайн разрабатывался с учетом трех основных типов устройств: смартфоны с маленькими экранами (до 4.7"), стандартные размеры (5—6.2") и крупные дисплеи (6.5" и более). Для каждого типа предусмотрены оптимальные размеры элементов и расстояния между ними. Верстка выполнена с использованием относительных единиц (rem, vw/vh) и медиа-запросов, что обеспечивает корректное отображение на любых устройствах.

Система темной и светлой темы реализована на уровне дизайн-системы (рис. 2). Темная тема использует приглушенные сине-фиолетовые оттенки с высокой контрастностью текста (1:4.5), что соответствует рекомендациям WCAG.



Рис. 2. Начальный экран. Сравнение светлой и темной тем

Главный экран приложения представляет собой список радиостанций с обложками и названиями. При нажатии на категорию происходит плавное скольжение вниз, раскрывающее список станций. При нажатии на станцию происходит плавное отображение плеера, что визуально связывает выбор пользователя с началом воспроизведения.

Экран плеера (рис. 3) содержит следующие ключевые элементы:

- крупная обложка текущего трека с анимацией плавного перемещения;
- название станции и текущего трека с бегущей строкой для длинных названий;
- основные кнопки управления (play / pause, следующая станция);
- ползунок громкости с иконкой динамика.

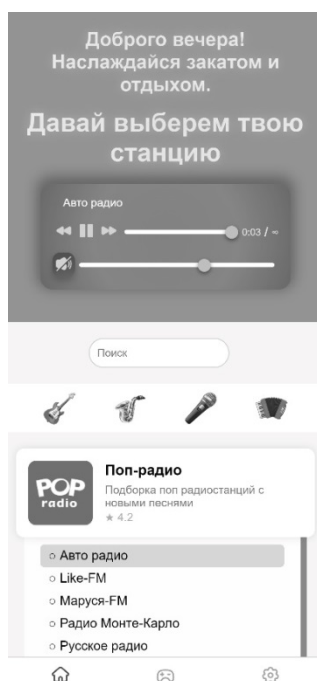


Рис. 3. Демонстрация проигрывателя

Навигация между разделами организована через нижнее меню с тремя пунктами: главная, мини-игры, и настройки. Активный пункт меню подсвечивается фирменным синим цветом VK с плавным переходом при смене раздела.

Особенностью интерфейса стала система состояний (state-driven UI), которая включает:

- загрузочные скелетоны при получении данных;
- анимированные placeholder'ы для пустых списков;
- визуализацию ошибок с предложениями по их устранению (к примеру, не нашлась станция).

Все анимации реализованы на CSS и JavaScript с расчетом на производительность. Время отклика интерфейса не превышает 100 мс, что создает ощущение мгновенного реагирования на действия пользователя.

Функциональность приложения.

Основу приложения составляет аудиоплеер, обеспечивающий непрерывное воспроизведение радиостанций. Плеер поддерживает стандартные операции управления: воспроизведение, паузу, переключение станций и регулировку громкости. Особенностью реализации стала система буферизации потокового аудио, которая позволяет перемотать воспроизведенные треки назад. Для обработки метаданных (название трека, исполнитель, обложка) используется парсинг аудиопотока и интеграция с внешними музыкальными базами данных.

Каталог радиостанций организован по категориям (жанры, настроение, популярные) с возможностью поиска по названию (рис. 4). Эти данные сохраняются как в локальном хранилище устройства, так и в облачном профиле VK при наличии подключения.

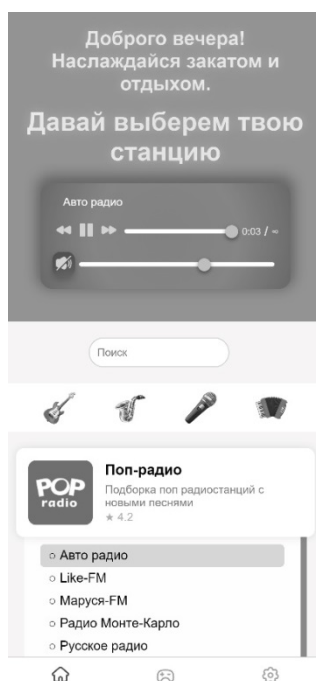


Рис. 4. Демонстрация разделения станций по категориям

Все функции протестированы на различных сценариях использования, включая режим слабого интернет-соединения (2G) и работу на старых моделях смартфонов.

Разработка и внедрение онлайн-радио для VK Mini Apps потребовала комплексного подхода к решению технических и пользовательских задач [6]. На этапе реализации основное внимание уделялось преодолению ключевых ограничений платформы, включая запрет на фоновое

воспроизведение и требования к производительности. Гибридная система, сочетающая Web Audio API и Service Workers, позволила добиться плавного переключения станций (0,8—1,2 с) при полном соответствии правилам платформы [1; 5].

Оптимизационные мероприятия охватили все компоненты системы.
 — Оптимизация скорости запросов к API (рис. 5).

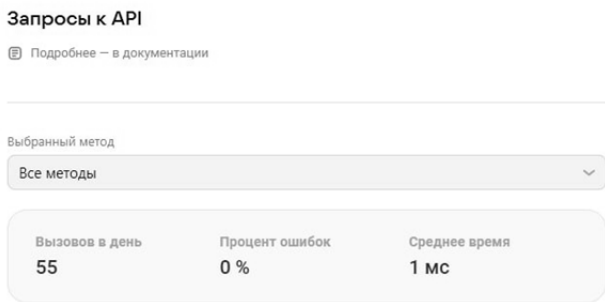


Рис. 5. Демонстрация количества запросов их вызова

— Ручное тестирование на пяти устройствах (рис. 6).

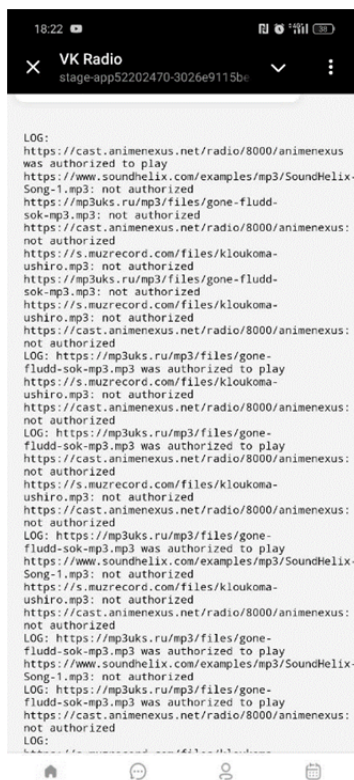


Рис. 6. Демонстрация ручного тестирования на устройстве

— Бета-тестирование с 45 пользователями (рис. 7, 8).

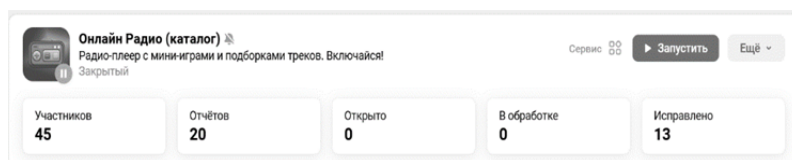


Рис. 7. Демонстрация статистики бета-тестирования

Шаги воспроизведения

ПК

1. Открыть сервис
2. Запустить радиостанцию Fresh FM

Android

1. Открыть сервис
2. Запустить радиостанцию Fresh FM, Модное радио, Говорит Москва

Фактический результат
Радиостанции не запускаются, отображается ошибка "Ошибка загрузки станции"

Ожидаемый результат
Станции запускаются

Screenshot_8.png
139 КБ

Screenshot_9.png
139 КБ

Файлы скрыты в настройках отчёта

0 раз воспроизвелось Нравится 0 модераторам

Комментарии Похожие История изменений

Модератор #3064 (Дмитрий Туманов)
Новый статус → Не воспроизводится
Станции могут не запускаться из-за региональных ограничений пользователя по доступам к ресурсам.
5 ноя 2024 в 18:23

Модератор #3064 (Дмитрий Туманов)

5 ноя 2024 в 18:23

Денис Авраменко
Новый статус → Неактуален
проблема ушла, спасибо

Рис. 8. Демонстрация бета-тестирования на примере пользователя приложения

— Мониторинг через Яндекс.Метрику (рис. 9) [11].

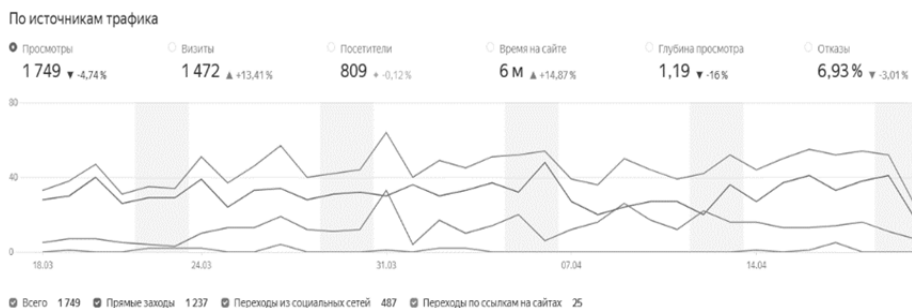


Рис. 9. Демонстрация общих показателей

Результаты внедрения подтвердили эффективность выбранных решений:

— 700 уникальных пользователей за первый месяц (рис. 10).

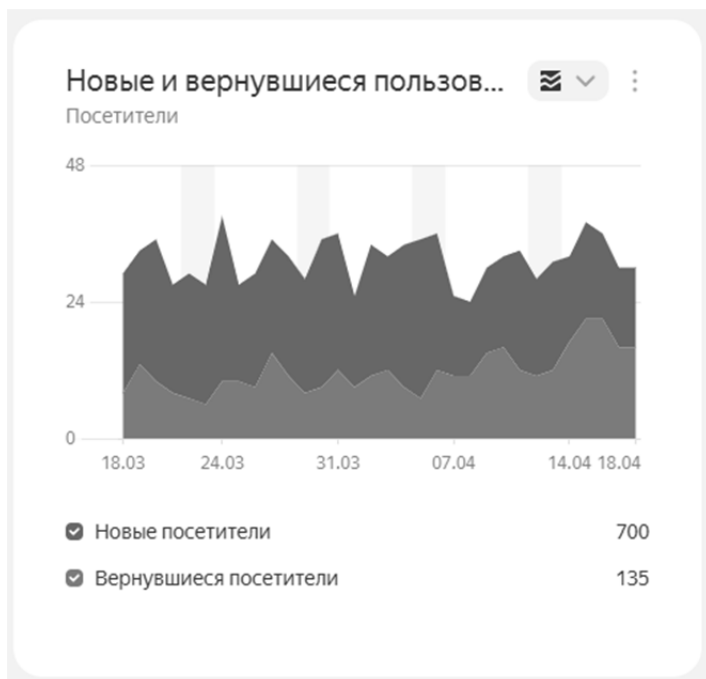


Рис. 10. Демонстрация новых и вернувшихся пользователей на период с 18 марта по 18 апреля

— Средняя сессия — 6 минут (рис. 11).

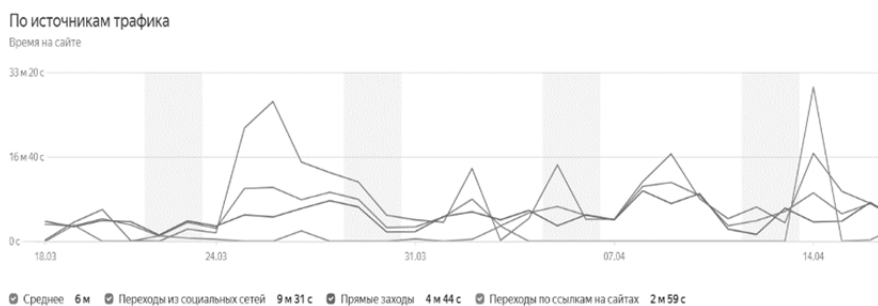


Рис. 11. Демонстрация общих показателей по источникам трафика

График на рисунке 12 показывает статистику охвата и активности пользователей за период с 17 марта по 18 апреля. Ключевыми метриками являются количество уникальных пользователей (693) и общее количество запусков (1495). Благодаря этому графику мы можем увидеть колебания в количестве запусков, что говорит о нестабильном охвате, зависящем от внешних воздействий, а именно от продвижения в алгоритмах рекомендаций.

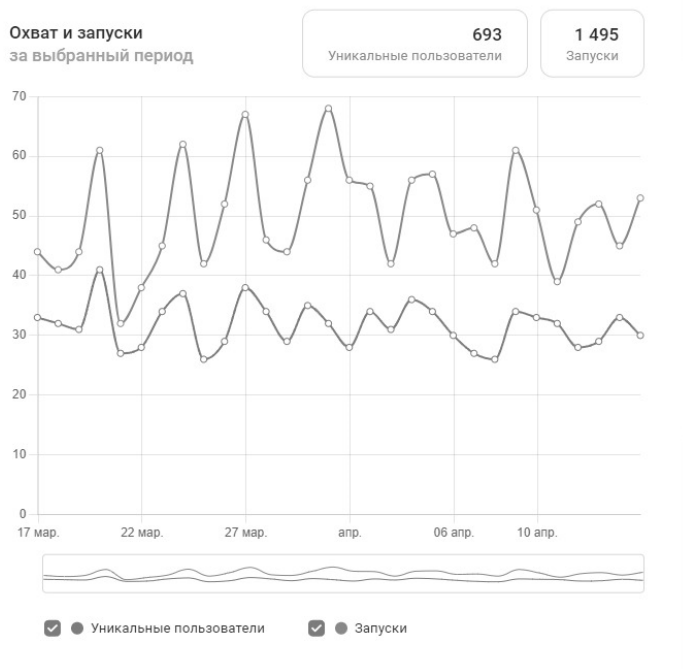


Рис. 12. Охваты за первый месяц

Перспективы развития включают расширение социальных функций, портирование в Telegram и добавление подкастов [14]. Проект доказал

возможность создания полноценного медиа-сервиса в условиях платформенных ограничений, сохраняя высокие стандарты пользовательского опыта. Полученные результаты и методики могут быть применены для аналогичных проектов в экосистеме социальных сетей.

Все функции протестированы на различных сценариях использования, включая режим слабого интернет-соединения (2G) и работу на старых моделях смартфонов. Приложение прошло модерацию (рис. 13).

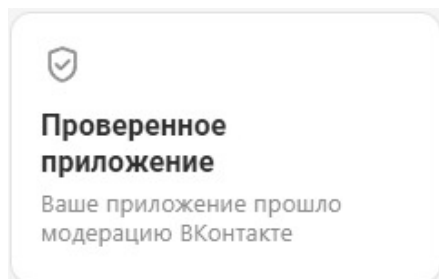


Рис. 13. Подтверждение прохождения модерации в ВК

Разработанное мини-приложение «Онлайн-радио» для платформы VK успешно демонстрирует возможность создания полнофункционального медиасервиса в условиях строгих ограничений социальной сети. Проект подтвердил эффективность выбранного технологического стека (React + JavaScript + VK DB) для решения задач потокового аудио, показав стабильную работу при различных условиях подключения и на устройствах разного уровня производительности [7; 9; 10].

Ключевыми достижениями проекта стали:

- создание производительного аудиоплеера со временем переключения станций менее 1 секунды;
- реализация адаптивного интерфейса, оптимизированного для мобильных устройств;
- разработка механизмов кэширования и предзагрузки, обеспечивающих бесперебойное воспроизведение;
- успешная интеграция с социальными функциями ВКонтакте.

Список литературы

1. *Онлайн-радио: технологии и реализация*. URL: <https://webaudio.github.io/web-audio-api/> (дата обращения: 24.06.2025).
2. *Как создать веб-приложение: пошаговое руководство*. URL: <https://sky.pro/wiki/javascript/kak-sozdat-veb-prilozhenie-poshagovoe-rukovodstvo/> (дата обращения: 13.05.2025).
3. *Iccast Streaming Server: официальная документация*. URL: <https://icccast.org/docs/> (дата обращения: 24.06.2025).
4. *Современный учебник JavaScript*. URL: <https://learn.javascript.ru/> (дата обращения: 24.06.2025).
5. *Разработка PWA-приложений*. URL: <https://web.dev/progressive-web-apps/> (дата обращения: 24.06.2025).

6. *Mini Apps*: архитектура и интеграция с социальными платформами. URL: <https://dev.vk.com/mini-apps/overview> (дата обращения: 24.06.2025).
7. *React* для разработки современных веб-приложений. URL: <https://reactjs.org/docs/getting-started.html> (дата обращения: 24.06.2025).
8. *VKUI*: библиотека компонентов для VK Mini Apps. URL: <https://vkcom.github.io/VKUI/> (дата обращения: 24.06.2025).
9. *TypeScript* в веб-разработке. URL: <https://www.typescriptlang.org/docs/> (дата обращения: 24.06.2025).
10. *Документация* по API ВКонтакте для мини-приложений. URL: <https://dev.vk.com/api> (дата обращения: 24.06.2025).
11. *Оптимизация* производительности веб-приложений. URL: <https://web.dev/learn/#performance> (дата обращения: 24.06.2025).
12. *Howler.js*: работа с аудио в JavaScript. URL: <https://howlerjs.com/> (дата обращения: 24.06.2025).
13. *Руководство* по VK Bridge для Mini Apps. URL: <https://dev.vk.com/bridge> (дата обращения: 24.06.2025).
14. *Оптимизация* загрузки мини-приложений: лучшие практики. URL: <https://web.dev/fast/> (дата обращения: 24.06.2025).
15. *Итоги* развития рынка музыкального стриминга за 2024 год. URL: <https://nfmi.ru/news/nfmi-podvela-itogi-razvitiya-rynka-muzykalmznogo-striminga-za-2024-god.html> (дата обращения: 24.06.2025).

Об авторах

Роман Алексеевич Якушев — студент 2-го курса направления «Прикладная математика и информатика», Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: romanyakushev4@gmail.com

Дмитрий Михайлович Туманов — студент 2-го курса направления «Прикладная математика и информатика», Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: tumaskow@yandex.ru

М. П. Савченко, Ф. Д. Печуконис

**ЦЕПЬ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ НЕИЗОХРОННОСТИ АВТОГЕНЕРАТОРА С ВАРИКАПАМИ**

Генераторы, управляемые по частоте напряжением (ГУН) с помощью варикапов, являются неотъемлемой частью многих телекоммуникационных устройств. Варикапы обладают нелинейной вольт-фарадной характеристикой. Поэтому при воздействии на них гармонического переменного напряжения емкость варикапов за отрицательный и положительный полупериоды колебания изменяется на разную величину. В результате средняя за период колебания емкость варикапов приобретает некоторую добавку, зависящую от амплитуды колебаний, и автогенератор становится неизохронным. Существует способ снижения неизохронности ГУН, заключающийся в том, чтобы в соответствии с изменением амплитуды колебаний увеличивать напряжение смещения на такое значение, которое компенсировало бы изменение емкости варикапов. В этом случае частота колебаний будет оставаться неизменной. В работе предложена цифровая цепь автоматической компенсации изменения средней за период колебания емкости варикапов. Цепь содержит амплитудный детектор, микроконтроллер, цифро-аналоговый преобразователь и инвертор напряжения. Путем численных расчетов показано, что цепь позволяет практически полностью избавиться от неизохронности ГУН.

Frequency-controlled oscillators (FCO) using varicaps are an integral part of many telecommunication devices. Varicaps have a nonlinear volt-farad characteristic. Therefore, when they are exposed to a harmonic alternating voltage, the capacitance of the varicaps changes by a different amount during the negative and positive half-cycles of the oscillation. As a result, the average capacitance of the varicaps during the oscillation period acquires some addition, depending on the amplitude of the oscillations, and the autogenerator becomes non-isochronous. There is a way to reduce the non-isochrony of the FCO, which consists in increasing the bias voltage by a value that would compensate for the change in the capacitance of the varicaps, in accordance with the change in the amplitude of the oscillations. In this case, the oscillation frequency will remain unchanged. The paper proposes a digital circuit for automatic compensation of changes in the average capacity of varicaps over a period of fluctuation. The circuit contains an amplitude detector, a microcontroller, a digital-to-analog converter, and a voltage inverter. Numerical calculations have shown that the circuit makes it possible to almost completely eliminate the non-isochrony of the FCO.

Ключевые слова: генератор, управляемый напряжением, варикап, стабильность частоты автогенератора, неизохронность автогенератора

Keywords: voltage-controlled generator; varicap, frequency stability of the generator; nonisochronous generator

Введение

Генераторы, управляемые напряжением (далее — ГУН) с помощью варикапов, находят широкое применение в телекоммуникационном оборудовании и измерительной технике.

Включение варикапов в колебательный контур автогенератора (далее — АГ), вследствие их нелинейности, приводит к появлению зависимости частоты генератора от амплитуды колебаний [1], то есть неизохронности ГУН. Высокие требования к стабильности частоты современных ГУН заставляют искать пути ослабления этого отрицательного явления.

В работах [2; 3] предложены способ и устройство снижения неизохронности АГ с варикапами путем включения в состав генератора цепи автоматической коррекции средней за период колебания емкости варикапов. В [4] показано, что данный способ позволяет практически полностью исключить влияние амплитуды колебаний на частоту ГУН.

Целью настоящей работы является разработка цепи отрицательной обратной связи для компенсации неизохронности ГУН с варикапами.

1. Коррекция средней за период колебания емкости варикапов

На рисунке 1 приведена структурная схема автогенератора [4] на биполярном транзисторе VT с параллельным контуром между коллектором и базой, содержащим катушку индуктивности L и два встречно-последовательно соединенных (далее — ВПС) варикапа VD1, VD2. Особенностью схемы является то, что для управления варикапами используются две цепи — $Z1(\omega)$ и $Z2(\omega)$. Первая цепь служит для управления частотой ГУН, вторая — для подключения цепи отрицательной обратной связи (далее — ЦОС) для компенсации неизохронности автогенератора с варикапами. ЦОС состоит из амплитудного детектора АД и цепи автоматической коррекции средней за период колебания емкости варикапов ЦАК. $Z1(\omega)$ имеет малое сопротивление на частотах модуляции и большое на частоте колебаний генератора ω , $Z2(\omega)$ наоборот, — короткое замыкание на частоте колебаний ω и конечное по постоянному току. Элементы Z_{Σ} и Z_K — малые сопротивления для постоянного тока и большие для тока с частотой колебаний ГУН.

Положим, что добротность контура ГУН достаточно высока, и колебания на контуре являются гармоническими. В этом случае напряжение на варикапе $u_{\text{в}}$ можно представить в следующем виде (1):

$$u_{\text{в}} = E - U_{\text{м}} \cos \omega t, \quad (1)$$

где E — постоянное напряжения смещения; $U_{\text{м}}$ — амплитуда колебаний на варикапе.

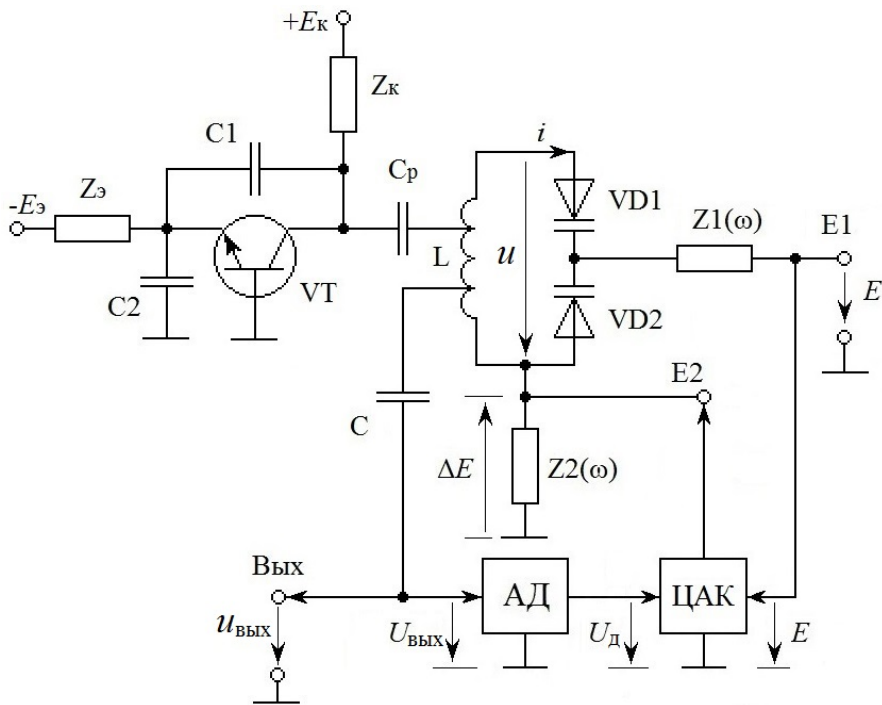


Рис. 1. Структурная схема ГУН с цепью отрицательной обратной связи для компенсации неизохронности автогенератора с варикапами, состоящей из амплитудного детектора АД и цепи автоматической коррекции ЦАК

Для идентичных варикапов $U_m = 0,5U$, где U — амплитуда напряжения на контуре. Согласно [5], эквивалентная емкость ВПС идентичных варикапов по первой гармонике может быть представлена выражением (2):

$$C_{\text{э}}(E, U_m) = C_{0\text{э}}(E)[1 + \delta_c(x_m)], \quad (2)$$

где $x_m = U_m / (E + \varphi_k)$ — относительная амплитуда колебаний (по модулю), приходящаяся на один варикап, причем φ_k — контактная разность потенциалов p - n перехода; $C_{0\text{э}}(E)$ — эквивалентная емкость ВПС варикапов в отсутствие колебаний ($U_m = 0$). Функция $\delta_c(x_m) < 1$ определяется вольт-фарадной характеристикой варикапов. При $x_m = 0$ функция $\delta_c(x_m) = 0$.

На рисунке 2 представлена типовая вольт-фарадная характеристика варикапов $C_v(E)$. Из рисунка видно, что при одновременном воздействии постоянного напряжения E_0 и гармонического переменного напряжения емкость варикапов за отрицательный и положительный полупериоды колебания изменяется на разную величину. Среднее за период колебания значение емкости (2) оказывается больше на величину ΔC :

$$\Delta C(x_m) = C_{0\text{э}}(E) \cdot \delta_c(x_m). \quad (3)$$

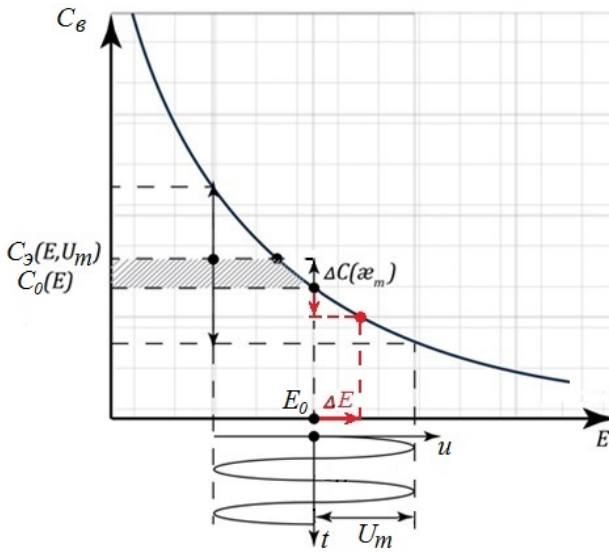


Рис. 2. Суть способа снижения неизохронности автогенератора с варикапами

Следовательно, чем больше x_m , тем ниже резонансная частота контура $\omega_p = (LC_3)^{-0,5}$ и частота колебаний ГУН.

На рисунке 2 проиллюстрирована суть выбранного способа снижения неизохронности автогенератора с варикапами [2; 3]. Она заключается в том, чтобы в соответствии с изменением амплитуды колебаний ГУН увеличивать напряжение смещения на такое значение ΔE , которое компенсировало бы изменение емкости ΔC . В этом случае частота колебаний ω будет оставаться неизменной.

Связь между ΔE и амплитудой U_m определяется вольт-фарадной характеристикой варикапов. Для случая широко распространенных варикапов с резким $p-n$ переходом в [6] получено выражение (4):

$$\frac{\Delta E}{E + \varphi_\kappa} = -\frac{1}{8} \chi_m^2. \quad (4)$$

Принимая во внимание, что $x_m = U_m / (E + \varphi_\kappa)$ и $U_m = 0,5U$, из (4) для амплитуды колебаний на контуре U получим

$$\Delta E = -U^2 / 32(E + \varphi_\kappa). \quad (5)$$

Справедливость выражения (5) подтверждена экспериментально [4]. Возможные пределы изменения ΔE оценим по выражению (4). Максимальное значение x_m равно 1, сумма напряжений U_m и E не должна превышать предельно допустимое напряжение на варикапе $E_{\text{пред}}$, то есть $E \leq 0,5E_{\text{пред}}$, следовательно, по модулю

$$\Delta E_{\text{макс}} \leq E_{\text{пред}} / 16. \quad (6)$$

Например, у варикапов 2В110 предельное напряжение составляет 45 В [7], соответственно модуль $\Delta E_{\text{макс}} \approx 3\text{В}$.

2. Цифровая цепь коррекции емкости варикапов

Разработаем цифровую цепь автоматической коррекции (далее — ЦЦАК) средней за период колебания емкости варикапов на основе микроконтроллера, который будет вычислять поправку ΔE по выражению (5). Для этого контроллер должен располагать информацией об амплитуде колебания на контуре U , напряжении смещения E и величине φ_k , используемых варикапов.

Амплитуда U измеряется амплитудным детектором АД. Во избежание шунтирования контура детектором коэффициент его включения в контур выбран малым $k \ll 1$.

$$U_{\text{вых}} = kU. \quad (7)$$

После детектирования получается постоянное напряжение:

$$U_d = k_d U_{\text{вых}}, \quad (8)$$

где $k_d < 1$ — коэффициент детектирования. Из (7) и (8) следует

$$U = U_d / (k \cdot k_d). \quad (9)$$

Функцию для вычисления в микроконтроллере получим, подставив (9) в (5):

$$\Delta E = -\frac{U_d^2 / 32}{(k k_d)^2 (E + \varphi_k)}. \quad (10)$$

Напряжение смещения на варикапах E может достигать нескольких десятков вольт [7], в то время как микроконтроллер рассчитан на работу с напряжениями до +5В. Подадим напряжение E на вход микроконтроллера через резистивный делитель с коэффициентом передачи $q < 1$, то есть $E_{\text{мк}} = qE$.

Микроконтроллер выдает результат вычислений в цифровом коде, поэтому на выходе контроллера необходим цифро-аналоговый преобразователь ЦАП и инвертор напряжения ИНВ, так как полярность напряжения ΔE противоположна полярности смещения E [4].

Функциональная схема ЦЦАК, реализующей выражение (10), приведена на рисунке 3. Выделенные пунктирной линией операции выполняются микроконтроллером. Контактная разность потенциалов φ_k для выбранного типа варикапов — величина постоянная. Ее значение, как и значения коэффициентов k , k_d , q , должны быть внесены в память микроконтроллера.

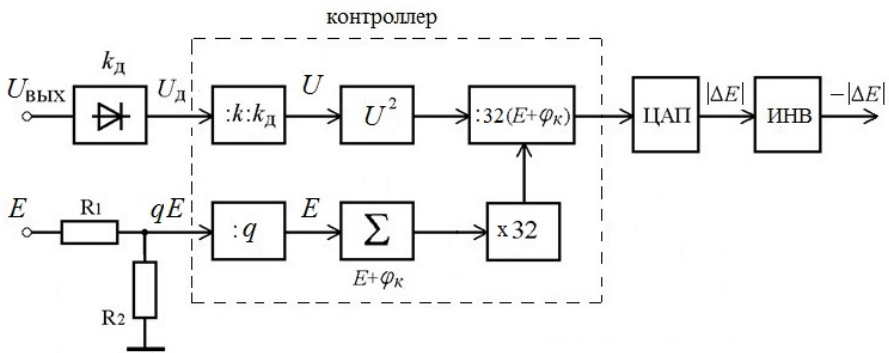


Рис. 3. Функциональная схема ЦЦАК

3. Схема цифровой цепи отрицательной обратной связи ГУН

Микроконтроллер. Задача микроконтроллера в данном устройстве сводится к считыванию значения напряжений $U_д$, qE , преобразованию их в цифровой код и выполнению несложных математических операций. Из соображений доступности и цены, для построения ЦЦАК выбран микроконтроллер ATmega8 [8]. Микросхема питается стандартным напряжением 4,5 ÷ 5,5 В, обладает достаточно высоким быстродействием — тактовая частота до 16 МГц и имеет шесть независимых десятиразрядных каналов АЦП. Результат вычисления передается в ЦАП по последовательному интерфейсу SPI в 12-разрядном коде.

Цифро-аналоговый преобразователь. В качестве внешнего ЦАП использована резистивная матрица MCP4921 [9]. Микросхема также питается напряжением +5В, обеспечивает точность преобразования на уровне 1 мВ, обладает высокой устойчивостью к температурным изменениям и малым уровнем шума. Выходное напряжение формируется из стабильного опорного напряжения V_{REF} 0 ÷ 5 В на основе 12-разрядного последовательного цифрового кода.

Инвертор напряжения можно выполнить по схеме инвертирующего повторителя на операционном усилителе (далее — ОУ) [10]. В качестве него выбран отечественный усилитель К574УД3 — быстродействующий малошумящий с полевыми транзисторами на входе и двупольярным питанием в диапазоне 3 ÷ 16,5 В. Основные характеристики ОУ и схемы включения приведены в [11; 12]. С выхода ОУ напряжение ΔE поступает на цепь $Z2(\omega)$ (рис. 1).

Амплитудный детектор. Для построения АД за основу выбрана схема двухполупериодного детектора выносного пробника цифрового вольтметра В3-52/1 [13] на диодах 2Д927АГ. Схема проста и позволяет достаточно точно измерять амплитуду напряжения сигнала в широком диапазоне частот.

Принципиальная схема цифровой цепи автоматической коррекции средней за период колебания емкости варикапов приведена на рисунке 4.

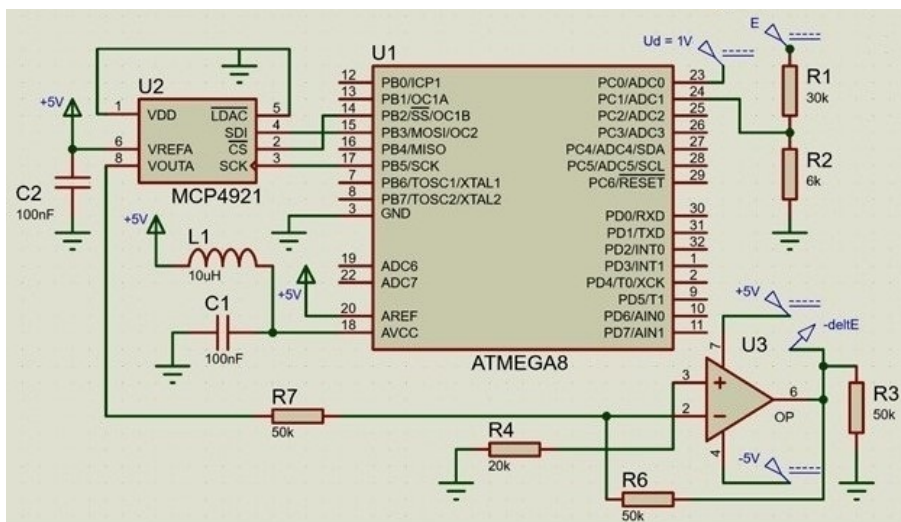


Рис. 4. Принципиальная схема ЦЦАК

Питание на микроконтроллер и ЦАП для большей стабильности подаются через шунтирующие конденсаторы емкостью 0,1 мкФ [8; 9].

4. Численный эксперимент

Программа для микроконтроллера составлена на языке C. С учетом рекомендаций производителя по выбору режима работы микроконтроллера [8] процессор запрограммирован на частоту 8 МГц. опорное напряжение V_{REF} выбрано равным 5,00 В. Для достижения максимальной точности АЦП, которая возможна на частотах не выше 200 кГц [9], тактовая частота шины SPI выбрана 125 кГц. Для этого делитель тактовой частоты в ATmega8 выставлен на 64. Программа содержит цикл, в котором сначала напряжения U_d и qE по очереди оцифровываются, затем значения АЦП записываются в соответствующие им переменные. Далее вычисляется значение ΔE , потом значение из числа переводится в соответствующий ему уровень от 0 до 4095 и в 12-разрядном коде отправляется на ЦАП. Цикл продолжается пока на микроконтроллер подается питание.

Составленная на языке C с помощью приложения MicrochipStudio программа переведена на язык низкого уровня и получен Hex-файл для прошивки микроконтроллера.

С целью проверки правильности написанной программы выполнена симуляция работы ЦЦАК с помощью программного продукта Proteus 8. Данный продукт содержит обширную библиотеку моделей различных элементов, в том числе микроконтроллера ATmega8 и цифроаналогового преобразователя MCP4291. Модели отечественного ОУ К574УД3 в библиотеке нет, поэтому он был заменен аналогом, что никак не повлияло на результаты исследования ЦЦАК.

В процессе симуляции работы ЦЦАК с помощью программы Proteus 8 на входе РС0 микроконтроллера (рис. 4) задавалось напряжение, равное U_d , на входе РС1 — постоянное напряжение смещения E , деленное в 6 раз на резисторах R1, R2. Питание операционного усилителя выбрано +5В и –5В. Напряжение ΔE на выходе ОУ измерялось программным тестером. Далее оно обозначено как $\Delta E_{\text{ЦАК}}$.

В таблицах 1—3 представлены результаты численного эксперимента по нахождению ΔE для автогенератора с ВПС варикапами с резким типом p - n перехода. В таблицах приняты обозначения: U — амплитуда колебаний на контуре (рис. 1); U_d — напряжение на выходе АД (8); $\Delta E_{\text{расч}}$ — напряжение компенсации, рассчитанное по выражению (5); $\Delta E_{\text{ЦАК}}$ — напряжение, полученное в ходе симуляции работы ЦЦАК, вычисленное микропроцессором по выражению (10) при $k=0,1$, $k_d=0,9$, $\varphi_k=0,6$ В и $q=1/6$.

Из таблиц 1—3 видно, что значения $\Delta E_{\text{расч}}$ и $\Delta E_{\text{ЦАК}}$ различаются не более чем на 5 мВ, что свидетельствует о корректной работе программы контроллера. Погрешность $\Delta E_{\text{ЦАК}}$ зависит от значения опорного напряжения V_{REF} и разрядности АЦП и ЦАП. Следует отметить, что в программе Proteus 8 в модели MCP4291 при подаче на внешний контакт VREFА опорного напряжения 5,00 В, вследствие падения напряжения на промежуточных элементах, на матрицу поступает 4,96 В [9]. Без учета этого обстоятельства, ошибка вырастает до 20 мВ.

На рисунке 5 линией 1 построена измеренная зависимость относительного изменения частоты колебаний реального автогенератора с парой ВПС варикапов 2 В, 110 В [14] с резким типом p - n перехода при $E=10$ В от амплитуды колебаний на контуре U , линией 2 — расчет для этого же АГ по выражению (11):

$$\Delta f/f_0 = -0,5 \cdot \sigma_{y_0} \cdot \Delta C(U)/C_{0Э}(E_0), \quad (11)$$

где $\Delta f = f - f_0$, $\sigma_{y_0} = C_{0Э}(E_0)/C_{\text{полн}}$ — доля емкости ВПС варикапов $C_{0Э}(E_0)$ при напряжении E_0 (в отсутствие переменного напряжения) в полной емкости контура $C_{\text{полн}}$, определяющей частоту АГ $\omega = (LC_{\text{полн}})^{-0,5}$. Частота f_0 измерялась при минимально возможной амплитуде колебаний. Расчет линии 2 выполнен до значения амплитуды, при которой $x_m = 1$. Линия 3 получена из экспериментальной зависимости 1 путем сложения с положительным сдвигом частоты, вычисленным для напряжения $\Delta E_{\text{ЦАК}}$ из таблицы 2.

Таблица 1

Напряжения компенсации ΔE при $E = 5 \text{ В}$

$U, \text{ В}$	0	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{ис}}, \text{ В}$	0	0,045	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,90
$\Delta E_{\text{расч}}, \text{ В}$	0	-0,001	-0,006	-0,022	-0,050	-0,089	-0,140	-0,201	-0,273	-0,357	-0,452	-0,558
$\Delta E_{\text{ЦАК}}, \text{ В}$	0	-0,001	-0,005	-0,022	-0,050	-0,090	-0,139	-0,201	-0,274	-0,355	-0,452	-0,556

Таблица 2

Напряжения компенсации ΔE при $E = 10 \text{ В}$

$U, \text{ В}$	0,5	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$U_{\text{ис}}, \text{ В}$	0,045	0,09	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44	1,62	1,80
$\Delta E_{\text{расч}}, \text{ В}$	-0,001	-0,003	-0,012	-0,047	-0,106	-0,189	-0,295	-0,425	-0,578	-0,755	-0,955	-1,179
$\Delta E_{\text{ЦАК}}, \text{ В}$	-0,001	-0,003	-0,012	-0,047	-0,107	-0,188	-0,294	-0,425	-0,579	-0,757	-0,958	-1,183

Таблица 3

Напряжения компенсации ΔE при $E = 20 \text{ В}$

$U, \text{ В}$	1	3	6	9	12	15	18	21	25	29	34	40
$U_{\text{ис}}, \text{ В}$	0,09	0,27	0,54	0,81	1,08	1,35	1,62	1,89	2,25	2,61	3,06	3,60
$\Delta E_{\text{расч}}, \text{ В}$	-0,002	-0,014	-0,055	-0,123	-0,218	-0,341	-0,492	-0,669	-0,948	-1,276	-1,754	-2,427
$\Delta E_{\text{ЦАК}}, \text{ В}$	-0,001	-0,013	-0,055	-0,124	-0,218	-0,340	-0,493	-0,669	-0,950	-1,279	-1,756	-2,426

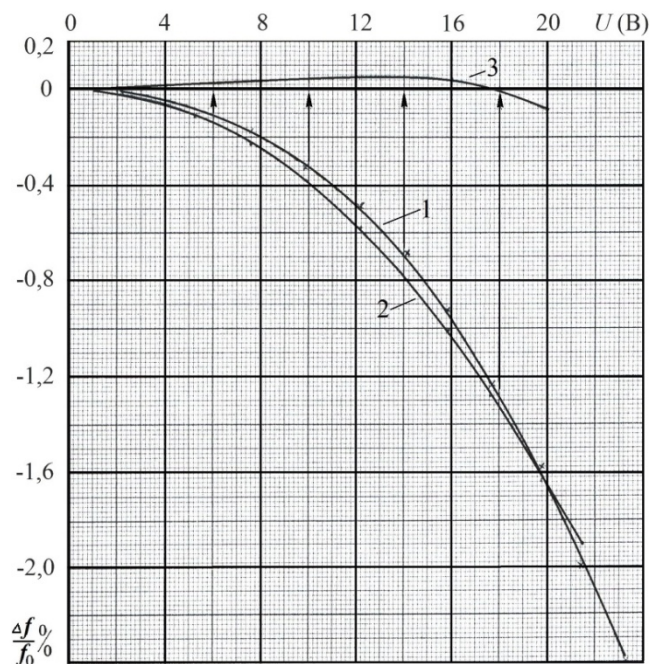


Рис. 5. Графики неизохронности реального АГ с парой ВПС варикапов 2 В, 110 В при напряжении смещения $E=10$ В, $C_{0Э}=7,6$ пФ, $f_0=109,147$ МГц, $\sigma_{y0}=0,55$: линия 1 — эксперимент, линия 2 — расчет по выражению (11), линия 3 — сумма экспериментальных значений с положительным сдвигом частоты, вычисленным для напряжения $\Delta E_{ЦАК}$ из таблицы 2

Из рисунка 5 следует, что цепь отрицательной обратной связи для компенсации неизохронности автогенератора с варикапами позволяет существенно снизить зависимость частоты автогенератора с варикапами от амплитуды колебаний.

Заключение

Предложенная цепь отрицательной обратной связи для компенсации неизохронности автогенератора с варикапами позволяет значительно уменьшить зависимость частоты автогенератора с варикапами от амплитуды колебаний. Поскольку в схеме ЦЦАК используется микроконтроллер, данную цепь можно применить без изменений для работы практически с любыми типами варикапов. Для этого надо, в соответствии с уравнениями, описывающими зависимость емкости выбранных варикапов от напряжения, изменить прошивку микроконтроллера.

Полученные результаты позволяют заключить, что с помощью цифровой цепи автоматической коррекции средней за период колебания емкости варикапов можно практически полностью ликвидировать вклад варикапов в неизохронность ГУН.

Список использованных источников

1. *Лабутин В. К.* Частотно-избирательные цепи с электронной настройкой. М. ; Л., 1966.
2. Способ и устройство повышения стабильности фазы колебаний в резонансном контуре с варикапами : пат. RU 2546566 С1, МПК Н03J 7/08. №2014114299/08 ; заявл. 10.04.2014 ; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
3. *Управляемый* напряжением автогенератор с малой неизохронностью : пат. RU 2580078 С1, МПК Н03В 5/02, Н03С 3/22. №2014147284/08 ; заявл. 24.11.2014 ; опубл. 10.04. 2016. Бюл. № 10.
4. *Савченко М. П., Старовойтова О. В.* Способ и устройство снижения неизохронности автогенератора с варикапами // Электросвязь. 2016. №4. С. 57—60.
5. *Кулешов В. Н., Савченко М. П.* Эквивалентная емкость ВПС варикапов // Радиоэлектроника. 1988. №2. С. 71—74.
6. *Савченко М. П., Старовойтова О. В.* Линеаризация резонансного контура с варикапами // Электросвязь. 2015. №5. С. 39—41.
7. *Полупроводниковые приборы.* Диоды высокочастотные, диоды импульсные, оптоэлектронные приборы : справочник / А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев, В. В. Мокряков [и др.] ; под ред. А. В. Голомедова. М., 1989.
8. *ATmega8/L* datasheet. Atmel Corporation / Rev.: 2486AA-AVR-02/2013.
9. *MCP4921/4922* 12-Bit DAC with SPI Interface. Microchip Technology / Rev.: DS21897B-08/06.
10. *Операционные усилители и компараторы.* М., 2001.
11. *Козак В. Р.* Справочник по операционным усилителям и компараторам. Список микросхем. Новосибирск. 2003.
12. *KP574УД3* — технические характеристики, параметры, описание, даташит / ООО компания «Электроника и связь». URL: www.eandc.ru (дата обращения: 24.06.2025).
13. *Милливольтметр* цифровой ВЗ-52/1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1991 г.
14. *Савченко М. П., Карпинская Т. А.* Эквивалентная схема и параметры УКВ варикапов // Радиотехника. 1985. № 11. С. 24—27.

Об авторах

Михаил Петрович Савченко — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: savchenkomp@mail.ru

Фёдор Дмитриевич Печуконис — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: fiodor01@mail.ru

А. В. Ребриев, П. С. Щербань

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИЗ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТНПА
ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ РАЙЗЕРОВ И МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЛАТФОРМ**

Развитие нефтегазового комплекса, в частности, морской нефтегазодобычи и транспортировки требует создания разнообразного диагностического оборудования, позволяющего проводить обследование райзеров, трубопроводов и оснований платформ в сложных условиях. Объекты данной инфраструктуры могут находиться в зоне действия сильных течений, повышенной мутности воды, располагаться на больших глубинах, быть заглубленными в грунт, подвергаться биообрастанию. В результате использование унифицированных вариантов телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов часто неоправданно. Как следствие возникает проблема, затрагивающая как вопросы проектирования морских аппаратов, так и решения физических, технологических, программных задач, оптимизации размещения и компоновки элементов оборудования. В ходе проектирования ТНПА (телеуправляемый необитаемый подводный аппарат) требуется решать проблемы определения энергообеспеченности, плавучести, прочности корпуса, связи, установки приборов контроля и управления, установки диагностического оборудования, определения принципов хранения и обработки информации. Как правило, все представленные параметры взаимосвязаны, что ведет к поливариантной проработке и задачам комплексной оптимизации. В рамках настоящего исследования разработан и представлен принцип оптимизации параметров телеуправляемого необитаемого подводного аппарата для обследования райзеров и оснований морских нефтегазовых платформ на основе методов ТРИЗ (теории решения изобретательских задач). При этом задействована существующая нормативная база по ТНПА, установлены виды решаемых оптимизационных задач, рассмотрены необходимые пакеты исходных данных. Наглядно представлено как, комбинируя принципы ТРИЗ и способы многофакторной оптимизации, можно получить оптимальное проектно-конструкторское решение по компоновке ТНПА. В результате исследования проведена адаптация методов ТРИЗ к проблеме проектирования ТНПА для обследования райзеров и нефтегазовых платформ.

The development of the oil and gas industry, particularly offshore oil and gas production and transportation, requires changes of a variety of diagnostic equipment capable of inspecting risers, pipelines, and platform foundations in challenging conditions. These infrastructure facilities may be exposed to strong currents, high water turbidity, located at great depths, buried in the ground, or subject to bio-fouling. As a result, the use of standardized versions of remotely operated underwater vehicles is often unjustified. This creates a challenge that affects both the design of offshore vehicles and the solution of physical, technological, and software

problems, as well as the optimization of the placement and layout of equipment components. Designing a remotely operated underwater vehicle (ROV) requires addressing issues such as power supply, buoyancy, hull strength, communications, installation of control and monitoring devices, installation of diagnostic equipment, and determination of information storage and processing principles. As a rule, all these parameters are interconnected, leading to multivariate analysis and complex optimization tasks. This study develops and presents a principle for optimizing the parameters of a remotely operated underwater vehicle (ROV) for inspecting risers and foundations of offshore oil and gas platforms, based on TRIZ (theory of inventive problem solving). The existing regulatory framework for ROVs is utilized, the types of optimization problems to be solved are identified, and the necessary source data packages are considered. It clearly demonstrates how combining TRIZ principles and multifactor optimization methods can yield an optimal design solution for the ROV layout. The study also resulted in the adaptation of TRIZ methods to the problem of designing ROVs for inspecting risers and oil and gas platforms.

Ключевые слова: ТНПА, техническая оптимизация, морское нефтегазовое оборудование, ТРИЗ, конструирование, проектирование

Keywords: ROV, technical optimization, offshore oil and gas equipment, TRIZ, design, engineering

Введение

Освоение минеральных ресурсов мирового океана в XXI веке ускоряется, в строй вводятся добывающие платформы, прокладываются подводные коммуникации — нефтегазопроводы, райзеры. Технологическая революция, наблюдаемая в данной области связана с появлением инновационных материалов, конструкционных решений, программного обеспечения, позволяющего осуществлять сложные расчеты нагрузок. Вместе с тем происходит постепенное накопление количества инженерных сооружений, располагающихся в море, при этом некоторые из них (в особенности введенные в эксплуатацию в 1970—1990-е годы) требуют оценки технического состояния, диагностики и постепенного демонтажа [1]. В свою очередь, новые системы нуждаются в постоянном мониторинге технического состояния. Обеспечение этих процедур для подводной части морских нефтегазовых сооружений не представляется возможным без применения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (далее — ТНПА) [2].

На протяжении десятилетий сформирован значительный корпус научно-технических работ (подтвержденный практическими решениями и испытаниями) по проектированию и конструированию подводных аппаратов. Вместе с тем решаемые инженерами проблемы в ходе создания данной техники полиаспектны и часто представляют собой цепочки из задач оптимизации по выбору рациональной конструкции аппарата, схемы размещения оборудования, организации энергоснабжения, связи и управления и др. [3]. Выбор конкретных технических ре-

шений во многом определяется предназначением и условиями применения телеуправляемого подводного аппарата, что несколько сужает вариативность проработки, но все равно оставляет широкую зону для инженерно-конструкторского поиска [4]. При этом следует подчеркнуть, что для обследования нефтегазового оборудования часто требуется использование нестандартных ТНПА, снабженных дополнительным диагностическим оборудованием (в том числе, размещенном на подвесах, либо в специализированных отсеках), имеющим расширенные энергетические возможности и обладающих достаточной конструкционной прочностью. Таким образом, в настоящем исследовании встала задача по созданию инструментов выработки оптимальных инженерно-конструкторских решений при проектировании подводного телеуправляемого необитаемого аппарата, предназначенного для оценки технического состояния морской нефтегазовой инфраструктуры.

Создание подобного инструментария должно существенно упростить деятельность проектировщиков в ходе разработки, создания и испытаний оборудования, повысить качество конструирования, придать направление научным поискам [5]. Для его разработки и формализации задач комбинаторной оптимизации в первую очередь обратимся к ряду источников информации, в частности, к действующим нормативным документам в области проектирования и эксплуатации подводных телеуправляемых необитаемых аппаратов, а также к исходным данным, обычно передаваемым от лица заказчика подобного оборудования (нефтегазовых компаний). Анализируя материалы, возможно очертить границы проектирования. Образно говоря, на основе подобных вводных формируется зона поиска оптимального инженерного решения [6].

Далее внутри очерченной зоны осуществляется инженерно-конструкторский поиск и решение задач оптимизации. Существуют различные подходы организации подобного поиска. Так, например, одним из классических считается применение теории решения изобретательских задач (далее — ТРИЗ). Она предполагает формализацию проблемы (что было сделано на предшествующем шаге до обращения к ТРИЗ), далее определение функционального характера недостатков (потенциальных нежелательных эффектов результатов проектирования), алгоритмизации научного поиска, применению приемов снятия физических противоречий. Опираясь на подобный подход, возможно существенно упростить процедуры проектного поиска и решения инженерно-конструкторских задач. Приемы же снятия физических противоречий могут быть прямо взаимоувязаны с оптимизацией.

Воспользуемся данной методической базой в формировании алгоритма решения оптимизационных задач в ходе проектирования ТНПА для обследования морских нефтегазовых сооружений. Сформировав алгоритм и очертив круг вопросов, решаемых на каждом из этапов, укрупненно представим возможные пути оптимизационного поиска в каждой из задач. При этом будем соотноситься с ранее установленными границами проектирования.

Исходные данные и стандарты. Процедура проектирования ТНПА для обследования райзеров и морских нефтегазовых платформ

Проведение работ на морском дне сопряжено с воздействием перепада давлений, наличием столба жидкости, отсекающего от поверхности, низкими температурами, течениями, повышенной мутностью среды и отсутствием естественного освещения [7; 8]. Эти группы факторов необходимо учитывать при проектировании любого ТНПА. В целом они должны налагать довольно жесткие ограничения на возможные проектные решения, что по своей сути, как правило, способствует развитию стандартов и процедур проектирования (ограничивая потенциально возможные варианты компоновок и конструкций). Однако до настоящего времени на международном уровне не выработаны единые нормы и требования к проектированию, конструированию и процедурам применения ТНПА [9; 10]. Исключением, пожалуй, представляется только проектирование компоновки ТНПА, предназначенных для обслуживания подводных нефтедобывающих комплексов ISO 13628-8 Petroleum and natural gas industries — Design and operation of subsea production systems. Part 8: Remotely Operated Vehicle (ROV) interfaces on subsea production systems и ISO 13628-9:2000 Petroleum and natural gas industries — Design and operation of subsea production systems. Part 9: Remotely Operated Tool (ROT) intervention systems [11]. Также в стадии рассмотрения находится проект интересного и важного международного стандарта: ISO/NP 20682 Autonomous Underwater Vehicles — Risk and Reliability.

Вместе с тем существует ограниченное количество нормативных документов государственного уровня, позволяющих осуществлять процесс проектирования с опорой на актуальные требования. Так, в Российской Федерации действуют НД №2-020201-023 «Правила классификации и постройки необитаемых подводных аппаратов» (Российский морской регистр судоходства) и ГОСТ Р 60.7.0.2-2022 «Роботы и робототехнические устройства. Комплекс телеуправляемого необитаемого подводного аппарата рабочего класса. Основные требования». В Норвегии применяется NORSOK U-102 Remotely operated vehicle (ROV) services, в Германии — DNVGL-CG-0264 Autonomous and remotely operated ships и DNV 2.7-2 Offshore Service Modules [12; 13]. В целом отсутствие жестких, установленных на международном уровне правил позволяет в полной мере использовать наилучшие имеющиеся национальные практики. В результате разработаем процедуру определения основных характеристик ТНПА в ходе проектных работ с учетом действующего ISO 9001:2015. В данном документе используем положения п. 8.3.2—8.3.5 международного стандарта (рис. 1).



Рис. 1. Организация процесса проектирования ТНПА (на основе положений ISO 9001:2015)

Проектирование и разработка любого продукта (в данном случае — ТНПА) — это набор процессов для преобразования требований (например, спецификаций, установленных законом требований и конкретных или подразумеваемых требований клиентов) в определенные характеристики продукта. Необходима выработка механизмов контроля процесса проектирования продукта, его валидации и верификации, обеспечение петли качества и обратной связи между проектировщиком, производителем и пользователем [14]. Так, при разработке ТНПА должна последовательно осуществляться следующая цепочка мероприятий. Потребитель формирует требования к функционалу ТНПА. Разработчик, получив данные требования, определяет входные параметры проектирования и разработки. Задаются конкретные условия деятельности ТНПА: определение рабочих глубин, длительности рабочего применения, типа связи с поверхностью, перечня рабочих задач, габаритов. Желательно, чтобы была проведена приоритезация заявленных требований. Далее, когда заданы граничные значения, конструктор переходит ко второму этапу — решению оптимизационных задач. На этом этапе необходимо добиться максимально возможных, качественных характеристик ТНПА в рамках заявленных граничных значений (либо с минимальными отклонениями от них, исходя из матрицы приоритетов). При этом может использоваться весь арсенал математических и программно-аналитических методов поиска решения в задачах оптимизации.

По результатам выработки проектных решений проводится оформление технической документации и последующая верификация полу-

ченных рабочих характеристик с заявленными требованиями (закрывается петля качества). При возникновении ошибок в ходе проектирования либо новых запросов со стороны заказчика процесс повторяется [10]. Таким образом, в проводимом исследовании особый интерес представляют именно стадии определения требований к функционалу, организации процесса проектирования, определения входных параметров и решения оптимизационных задач. Собственно, именно на этих стадиях и формируется конструкция ТНПА, они же позволяют путем поиска оптимальных решений сформировать подводный аппарат таким образом, чтобы он наиболее полно удовлетворял требования заказчика [10]. На процедуру проектирования ТНПА можно также посмотреть не только со стороны классической петли качества, но и с позиции производства. Так, в данном случае (рис. 2) этапы будут несколько отличаться (хотя принципы разработки и наличие обратной связи сохранятся).

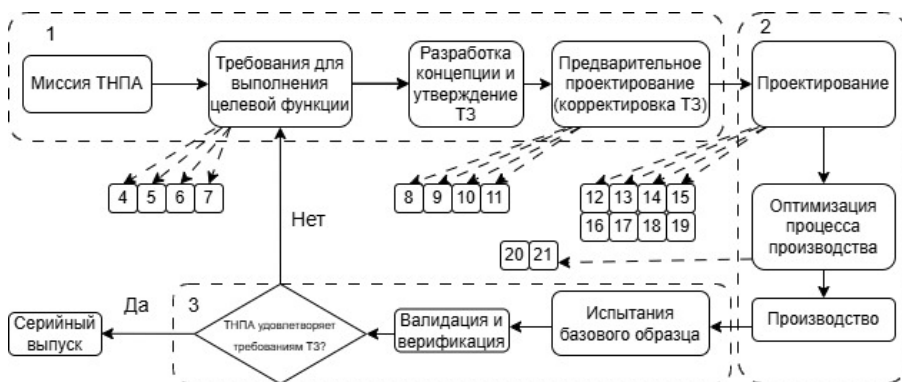


Рис. 2. Процедура проектирования ТНПА и решаемые на каждом из основных этапов задачи

Примечания к рисунку 2: 1 — разработка технического задания и предпроектные работы; 2 — проектирование и производство; 3 — испытания и вывод в серию; 4 — определение системных требований на основе миссии ТНПА (по обследованию / ремонту райзеров и нефтегазовых платформ); 5 — определение основных рабочих характеристик для выполнения системных требований; 6 — определение предварительной стоимости производства; 7 — создание точек последующей модернизации и развития проекта ТНПА; 8 — установка критериев эффективности системы ТНПА; 9 — определение минимальной стоимости системы ТНПА; 10 — определение минимальных / максимальных габаритов и веса ТНПА; 11 — выработка требований к транспортировке, хранению и запуску проектируемого ТНПА; 12 — задача проектирования корпуса (расчет прочности); 13 — задача проектирования системы энергоснабжения; 14 — задача проектирования двигательной установки ТНПА; 15 — задача позиционирования ТНПА и навигации; 16 — задача разработки программного обеспечения и систем удаленно-

го управления; 17 — задача компоновки и подключения рабочих органов ТНПА; 18 — задача размещения систем освещения ТНПА; 19 — задача разработки систем спуска и подъема ТНПА; 20 — задача унификации используемой аппаратной базы ТНПА; 21 — задача контроля качества процесса производства.

В процессе проектирования ТНПА рассмотрим наиболее интересные этапы, в рамках которых возможно осуществлять процедуры поиска оптимальных проектных решений с помощью ТРИЗ (5, 7, 10, 12, 13, 17). Представим подборку математических и аналитических методов, позволяющих решать подобные задачи проектирования, конструирования и оптимизации.

Разработка общих проектных решений ТНПА на основе комбинации ТРИЗ и способов многофакторной оптимизации

Процесс начинается с анализа системных требований — глубина погружения, длительность миссии, маневренность, грузоподъемность, уровень автономности, пропускная способность канала связи, устойчивость к давлению, температуре и солености, а также энергопотребление. С точки зрения ТРИЗ, в первую очередь следует определить технические противоречия, возникающие между характеристиками [15], например, если увеличить батарею для большей автономности, то возрастет вес, ухудшится маневренность и увеличится объем корпуса. Здесь применим метод устранения противоречий без компромисса.

Для этого сформулируем противоречие в виде: «Мы хотим увеличить продолжительность автономной работы (улучшение), но при этом не хотим увеличивать массу аппарата (ухудшение)». Согласно ТРИЗ, подбираются соответствующие изобретательские принципы, например, дробление, вынос, инверсии или динамичность [16]. На этой стадии полезно использовать идеальный конечный результат (далее — ИКР), например, «аппарат работает бесконечно долго без необходимости пополнения энергии и не весит ничего». Отсюда рождаются идеи: использовать внешние источники энергии, зарядку по кабелю, рекуперацию энергии от потока воды и др.

С точки зрения математики — в каждом решении ТРИЗ определяется целевая функция. В общем виде можно говорить о поиске значений ряда целевых функций, противоречия между которыми и должен снять ТРИЗ [17].

Формально множество проектных решений можно обозначить как $x \in X$, где X — множество допустимых конфигураций системы, определяемой выбором конструктивных и функциональных параметров. При этом с каждым вектором параметров x сопоставляется вектор целевых функций $\vec{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))$, каждая из которых соответствует одному из ключевых критериев эффективности аппарата.

Пусть, например, $f_1(x)$ — масса системы (она подлежит минимизации), $f_2(x)$ — автономность (максимизация), $f_3(x)$ — стоимость изготовления или обслуживания (минимизация), $f_4(x)$ — разнообразие средств наблюдения и диагностики на ТНПА (максимизация). Тогда задача сводится к поиску минимума векторной функции:

$$\min_{x \in X} \vec{f}(x) = (f_1(x) - f_2(x), f_3(x) - f_4(x)). \quad (1)$$

В отличие от скалярной оптимизации, здесь не существует одного абсолютного минимума. Вместо этого можно использовать понятие Парето-оптимальности [18]. Вектор параметров $x \in X$ называется Парето-оптимальным, если не существует $x' \in X$, для которого выполняются условия $f_i(x) \leq f_i(x')$ для всех $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, и существует хотя бы один индекс j , для которого строгое неравенство $f_j(x) < f_j(x')$ также выполняется. Это означает, что никакое другое решение не превосходит текущее по всем параметрам и любое улучшение одного из критериев требует ухудшения как минимум одного другого.

Множество подобных решений образует так называемый «фронт Парето» — гиперповерхность в пространстве целевых функций, которая отделяет зону допустимых, но субоптимальных решений от области решений, находящихся на грани эффективности (рис. 3). Визуально в двумерном случае этот фронт может быть представлен как вогнутая кривая, каждый участок которой соответствует одному компромиссному соотношению между двумя конкурирующими критериями [18].

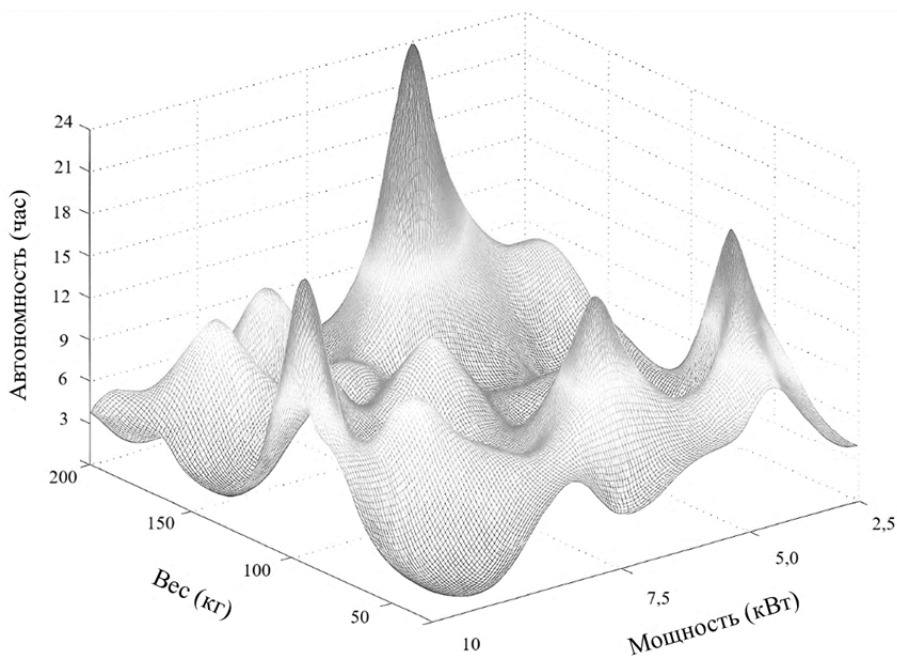


Рис. 3. Пример гиперповерхности Парето в пространстве целевых функций при предпроектной проработке ТНПА

Этот подход хорошо согласуется с понятийным аппаратом ТРИЗ. Методология ТРИЗ ориентирована на выявление и преодоление технических и физических противоречий в системе. В то время как Парето-оптимальность описывает границу допустимых компромиссов, ТРИЗ ставит задачу выйти за пределы этой границы, изменить систему так, чтобы противоречие было устранено без компромисса. Например, при конфликте между массой и автономностью ТРИЗ предлагает использовать принципы «дробления», «выноса» или «использования ресурса среды» (например, забор энергии из окружающей воды), в то время как метод Парето ограничится поиском баланса между дополнительным аккумулятором и уменьшением массы корпуса.

Однако на практике перед тем как предложить радикальное решение по ТРИЗ, необходимо знать, где именно система достигла предела компромисса [19]. Здесь метод Парето выполняет роль аналитического инструмента, который строит границу возможностей системы в ее текущей архитектуре. За пределами фронта Парето начинаются те области, куда система может быть продвинута с помощью изобретательских принципов ТРИЗ.

Если необходимо выбрать одно конкретное решение с фронта Парето, используется метод свертки, в котором вводится обобщенная скалярная целевая функция:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x), \quad (2)$$

где w_i — весовые коэффициенты, отражающие приоритетность каждого критерия.

Однако такой подход требует корректного задания весов и может сместить результат к решениям, не лежащим на самом фронте Парето. Альтернативой служит метод так называемой утопической точки, при котором задаются идеальные (но в реальности недостижимые) значения каждого критерия $\vec{f}_{id} = (f_1^i, f_2^i, \dots, f_n^i)$, а затем производится поиск такого $x \in X$, при котором расстояние для этой точки минимально:

$$d(x) = \|\vec{f}(x) - \vec{f}_{id}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i(x) - f_i^i)^2}. \quad (3)$$

Такой метод является более нейтральным, поскольку не требует указания весов и работает на принципе минимизации потерь по всем направлениям одновременно.

Связь с алгоритмом решения изобретательских задач (далее — АРИЗ) здесь также очевидна. В ходе решения задачи по АРИЗ мы формулируем техническое или физическое противоречие, создаем модель ИКР, выявляем ресурсы и затем переходим к фазе генерации решений с использованием изобретательских принципов [20]. Многокритериальная оптимизация по Парето помогает формализовать процесс анализа до того момента, как мы переходим к фазе изобретения: она определя-

ет, где находится технологический предел текущего поколения системы. Когда даже лучшее Парето-оптимальное решение не удовлетворяет требованиям, ТРИЗ предлагает методологию «вскрытия» границ и формулировки радикально нового принципа построения системы [21].

Таким образом, метод Парето-оптимальности и ТРИЗ являются не конкурирующими, а взаимодополняющими подходами. Парето дает количественную оценку пределов системы, ТРИЗ — качественный инструмент для перехода за эти пределы. В проектировании сложных инженерных систем, таких как ТНПА, именно такое сочетание позволяет проектировщику не просто достичь эффективного решения, но и выйти за рамки существующих конструктивных ограничений, создавая пространство для технической эволюции и инноваций [19].

Говоря об инструментах ТРИЗ, применение которых может обеспечить изменение конфигурации зоны субоптимальных решений и выход за пределы «фронта Парето», отметим механизм модернизации. Так в любом техническом объекте существует скрытый потенциал к модернизации, в том числе и в проектируемом ТНПА.

Формально эта задача выражается через оптимизацию структуры с учетом будущих изменений. Вводится функция устойчивости к модернизации:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{\delta F}{\delta x_i} \Delta x_i, \quad (4)$$

где x_i — параметр системы; F — функция производительности; Δx_i — потенциальные изменения параметров. Чем меньше чувствительность к изменениям, тем выше адаптивность конструкции.

В логике ТРИЗ модернизируемость тесно связана с понятием модульности, универсальности и дробления. Принцип дробления в ТРИЗ гласит: если объект слишком жесткий или неделимый, он плохо поддается модификации [20]. Принцип модульности рекомендует делать систему из автономных блоков, каждый из которых может быть заменен или усовершенствован без разрушения общей структуры. Это инженерно выражается через структуру, в которой параметры имеют локальное, а не глобальное воздействие на целевую функцию.

Если при небольших изменениях Δx_i система остается вблизи значения эффективности F , то она обладает высокой устойчивостью к модернизации. Это критично, если планируется долгий жизненный цикл ТНПА с возможностью последующих апгрейдов, интеграцией новых технологий и оборудования. Таким образом, система становится более гибкой для потенциальной модернизации [21]. В результате к максимизации функции эффективности $\max F(x)$ добавляется ограничение на чувствительность $R \leq R_{\text{доп}}$, что позволяет создать «Парето-фронт» между эффективностью и модернизируемостью. Такое многокритериальное рассмотрение позволяет конструировать не только максимально эффективные, но и долгоживущие, «эволюционно устойчивые» систе-

мы, способные быть частью технологической платформы, а не одноразового изделия. При этом в раскрытии модернизационного потенциала на стадии проектирования возможно применение и генетических алгоритмов, которые могут имитировать процесс эволюции ТНПА как системы.

Прикладное использования ТРИЗ в проектировании ТНПА для обследования райзеров и морских нефтегазовых платформ

Проектирование ТНПА, предназначенных для инспекций райзеров и элементов морских нефтегазовых платформ, представляет собой многокритериальную инженерную задачу, в которой системные противоречия сочетаются с высокой степенью неопределенности внешней среды. В условиях ограниченного пространства, переменных течений, сильного гидростатического давления и повышенных требований к точности позиционирования аппарат должен сочетать малые габариты, маневренность, энергетическую автономность, устойчивость к возмущениям и низкую стоимость эксплуатации [22]. В этой конфигурации легко выявляется противоречие: стремление уменьшить размеры и массу аппарата ради повышения маневренности и проходимости в тесных объемах платформенной обвязки приводит к уменьшению энергоемкости, грузоподъемности и устойчивости — именно это и подлежит анализу в терминах ТРИЗ.

На уровне ТРИЗ анализ формируется через выявление и разрешение технического противоречия вида: если $A \downarrow \Rightarrow X \uparrow$, то одновременно $A \downarrow \Rightarrow B \downarrow, C \downarrow$, где A — масса ТНПА, X — маневренность, B — энергоемкость, C — стабильность при работе в потоке. В логике ТРИЗ такая модель подлежит трансформации через применение принципов разрешения: вынесение функции (например, размещение энергоисточников вне корпуса), дробление (модульность), универсальность (совмещение рулевых и двигательных элементов), а также использование физических эффектов (например, вариативная жесткость материалов оболочки, изменяемая в зависимости от глубины).

Теоретическое множество решений, генерируемое с помощью инструментов ТРИЗ, обозначим как $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, каждое из которых представляет собой частную конфигурацию, направленную на снятие одного или нескольких противоречий. Однако не каждое из этих решений будет рационально с точки зрения компромисса между критериями массы, точности, устойчивости, стоимости, энергоэффективности [23]. Поэтому вводится система оценки, основанная на методе Парето-оптимальности. Пусть каждый проект S_i оценивается по вектору $\vec{f}(S_i) = (f_1, f_2, \dots, f_k)$, где каждый f_j соответствует частному критерию. Тогда решение S_i считается Парето-оптимальным, если не существует

иного S_j , такого что $f_j(S_j) \geq f_j(S_i)$ по всем j и строго лучше хотя бы по одному критерию. Для иллюстрации можно привести сравнительную таблицу проектных решений, полученных с использованием различных ТРИЗ-принципов (табл. 1).

Таблица 1

Решения компоновки ТНПА для обследования райзеров и платформ на основе ТРИЗ

Решение	ТРИЗ принцип	Идея	Инновационный уровень
S_1	Вынесение	Перенос энергоблока в надводный модуль	Архитектурный
S_2	Универсальность	Интеграция управления тягой и стабилизацией	Функциональный
S_3	Изменение физических свойств	Использование материалов с адаптивной жесткостью	Материаловедческий
S_4	Дробление	Модульное исполнение	Конфигурационный

На следующем уровне происходит многокритериальная нормализованная оценка по Парето. Таким образом, формируется таблица 2.

Таблица 2

Многокритериальная оценка по Парето решений по компоновке ТНПА

Решение	Энергоэффективность	Точность	Масса	Устойчивость	Стоимость
S_1	0,85	0,70	0,60	0,75	0,50
S_2	0,80	0,90	0,65	0,70	0,55
S_3	0,75	0,85	0,95	0,60	0,40
S_4	0,70	0,65	0,50	0,80	0,85

Исходя из сформированной таблицы Парето-оценки, дальнейший аналитический этап заключается в ранжировании Парето-оптимальных решений с учетом весовых коэффициентов критериев, которые могут быть заданы через метод анализа иерархий. Для целевого проектирования ТНПА, работающего в условиях инспекции райзеров и конструкций морской платформы определим типовой приоритет критериев [24]. Так, точность позиционирования для ТНПА в случае с обследованием райзеров и элементов платформ является критически важным параметром, поэтому зададим ей весовой коэффициент $w_2 = 30$. Энергоэффективность с учетом большого количества осматриваемых зон также существенна. Зададим весовой коэффициент $w_1 = 25$. Устойчивость необходима в ходе работы ТНПА в условиях турбулентных течений воз-

никающих у основания платформ. Придадим ей вес $w_2 = 20$. Масса ТНПА влияет на ограничения по плавучести, эргономичности, логистике [25]. Но вместе с тем она не так критична, как предыдущие факторы. Придадим ей вес $w_2 = 15$. Стоимость, с учетом штучного исполнения ТНПА и так будет значительной, поэтому учтем ее вес в наименьшей степени $w_2 = 10$.

Введем интегральную функцию полезности (оценки) каждого решения в форме взвешенной суммы нормализованных значений:

$$U(S_i) = \sum_{k=1}^5 w_k \cdot f_k(S_i), \quad (5)$$

где w_k — вес критерия; $f_k(S_i)$ — нормализованная оценка критерия для решения S_i .

Используя представленную формулу, обозначенные веса критериев и ранее выработанные с помощью ТРИЗ решения, рассчитаем значения эффективности каждого из решений [26]. Таким образом, интегральное ранжирование указывает на решение S_2 как на наиболее сбалансированное по критериям, с максимальной суммарной полезностью (табл. 3). Его отличительная особенность — реализация принципа ТРИЗ №6 (универсальность), за счет конструктивной интеграции двигательных и рулевых функций в одном приводном контуре. В целом это устраняет необходимость в дополнительных стабилизаторах и рулевых механизмах, снижая массу и габариты аппарата. Одновременно, благодаря использованию интегрированных приводов с векторной тягой, обеспечивается устойчивость в условиях турбулентных потоков и возможность точного позиционирования с шестью степенями свободы [27].

Таблица 3

Оптимальность решения ТРИЗ для проектирования ТНПА по обследованию морских райзеров и платформ

Решение	S_1	S_2	S_3	S_4
Вес	0,7125	0,7625	0,745	0,690

Техническая конфигурация оптимального ТНПА, соответствующего решению S_2 , включает композитный гидродинамически сбалансированный корпус с нейтральной плавучестью, способный проходить через ограниченные межтрубные зазоры. Силовая установка представлена шестью векторно-управляемыми приводами, выполняющими как тяговую, так и стабилизационную функцию, что исключает необходимость в отдельных рулевых системах (рис. 4). Энергетическое питание обеспечивается за счет литий-полимерного блока повышенной плотности, дополненного возможностью пополнения энергии через кабель в режиме «подзарядки на точке».

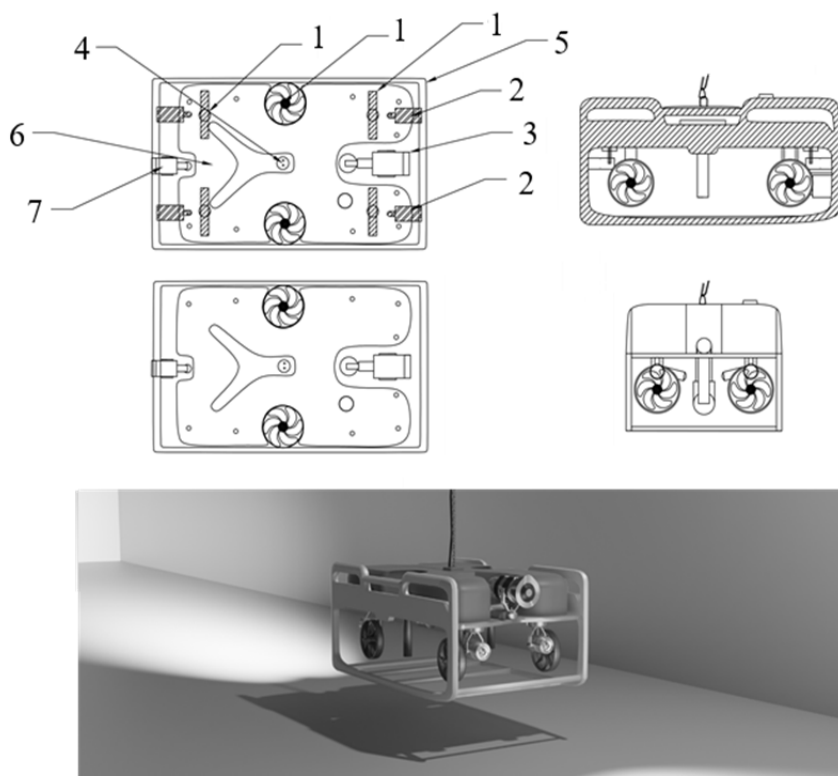


Рис. 4. Пример ТНПА для обследования райзеров и морских платформ, соответствующего выбранному компоновочному решению ТРИЗ:
 1 — движители ТНПА; 2 — световые приборы; 3 — главная камера; 4 — крепление для спускового троса; 5 — каркас; 6 — крышка; 7 — камера заднего вида

В результате, комбинируя принципы ТРИЗ с различными математическими инструментами, можно решать проектно-конструкторские задачи оптимизации, как в целом по всему ТНПА, так и по отдельным его модулям или узлам. Формируя при этом оптимальные конфигурации, можно наилучшим образом обеспечить требования заказчика. Важно отметить, что получаемое решение не должно противоречить действующей нормативно-технической документации по ТНПА. С другой стороны, в случае, если проектировщик в ходе поиска натолкнулся на крайне выгодное решение, имплементация которого ограничена действующими нормами, то должны быть запущены инструменты пересмотра и дополнения действующих стандартов. Это возможно согласно ранее приведенным процедурам (см.: рис. 1).

Таким образом, рационально с помощью ТРИЗ проводить поиск конструкторских решений для конкретных условий и направлений использования ТНПА, как например в случае с ТНПА, предназначенными для обследования райзеров и оснований морских буровых платформ [28].

Заключение

В работе была проанализирована возможность использования инструментов ТРИЗ и ряда математических методов оптимизации для поиска рациональных конструкторских решений при проектировании ТНПА. Разработанные принципы встроены в действующую нормативную базу по проектированию ТНПА. Для апробации подхода проведены расчеты и сформированы предложения по компоновке ТНПА для обследования райзеров и морских нефтедобывающих платформ. Выработанные решения являются оптимальными, встроенными в систему нормативных требований и с учетом модульности конструкции создают потенциал для модернизации спроектированного ТНПА. Результаты работы подтверждают универсальность и актуальность принципов ТРИЗ для решения современных задач по проектированию сложных технических систем.

Список использованных источников

1. *Khojasteh D., Kamali R.* Design and dynamic study of a ROV with application to oil and gas industries of Persian Gulf // *Ocean Engineering*. 2017. Vol. 136. P. 18—30.
2. *Ryu J., Nam K., Ha K.* A Basic Study of ROV System Design for Underwater Structure Inspection // *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*. 2020. Vol. 23 (3). P. 463—471.
3. *García-Valdovinos L. G., Salgado-Jiménez T., Bandala-Sánchez M. et al.* Modelling, design and robust control of a remotely operated underwater vehicle // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2014. Vol. 11 (1). P. 1.
4. *Salgado-Jimenez T., Gonzalez-Lopez J. L., Pedraza-Ortega J. C. et al.* Design of ROVs for the Mexican power and oil industries // 2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. 2010. P. 1—8. IEEE.
5. *Said M. F. M., Roslan I. S., Bakar S. A.* Conceptual design of remotely operated underwater vehicle // *Journal of Transport System Engineering*. 2015. Vol. 2 (1). P. 15—19.
6. *Shcherban P. S., Mazur E.* Survey of reliability of offshore oil and gas infrastructure in South Baltic conditions // *Pomorstvo*. 2022. Vol. 36, № 1. P. 68—73. doi: 10.31217/p.36.1.8. EDN: NIYNHL.
7. *Jing Q., Luo J., Li Y.* A new modular intensive design solution for ROVs // *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. 2021. P. 69—76.
8. *Nitonye S., Adumene S., Orji C. U., Effiong Udo A.* Operational failure assessment of Remotely Operated Vehicle (ROV) in harsh offshore environments // *Pomorstvo*. 2021. Vol. 35 (2). P. 285—296.
9. *Shah S. I. A., Khan M., Ahmad S. M.* Design, development, and fabrication of a low cost remotely operated unmanned underwater vehicle // 2021 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI). 2021. P. 1—5. IEEE.
10. *Graczyk T.* Methodology of remotely operated vehicle design // *WIT Transactions on The Built Environment*. 1999. Vol. 45.

11. *Standard B., Iso B.* Petroleum and natural gas industries // Design and operation of subsea production systems. Gas industries. 2006. Vol. 13628. P. 10.
12. *Standard N.O.R.S.O.K.* Remotely operated vehicle (rov) services. 2003. U-102. Rev, 1.
13. *DNV G.* DNVGL-CG-0264: Autonomous and remotely operated ships. 2018. Retrieved July, 15. 2019. 2018-09.
14. *Wolniak R.* Design in ISO 9001: 2015. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Śląska. 2020.
15. *Altshuller G.* 40 principles: TRIZ keys to technical innovation. 2002. Vol. 1.
16. *Конопатов С.Н.* Алгоритмы решения нестандартных задач : учебник для вузов. 3-е изд., стереотип. СПб., 2024. EDN: FTNZKD.
17. *Kang Y.J.* The study on new product designing method by using TRIZ // SAE Technical Paper. 2009. №2009-01-0988.
18. *Cavallucci D.* TRIZ, the Altshullerian approach to solving innovation problems // Engineering design synthesis: understanding, approaches and tools. 2002. P. 131—149.
19. *Дерюгин Д.С.* Морфологический анализ ТРИЗ — поиск новых решений и развитие продукта // Синергия Наук. 2020. №43. С. 460—465. EDN: YXDNRH.
20. *Попова О.Б.* Применение теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) для решения задач выбора // Научные труды КубГТУ : электронный сетевой политематический журнал. 2014. №S6. С. 74—76. EDN: TGNXZ.
21. *Bukhman I., Bukhman I.* The Ideas of TRIZ // Technology for Innovation: How to Create New Systems, Develop Existing Systems and Solve Related Problems. 2021. P. 1—9.
22. *Щербань П.С., Мазур Е.В., Костыгов И.Д.* Особенности эксплуатации и развития морской нефтегазовой инфраструктуры Калининградской области // Технико-технологические проблемы сервиса. 2021. №3 (57). С. 8—13. EDN: NCOERA.
23. *Щербань П.С.* Управление качеством контроля технического состояния объектов нефтегазового комплекса в Калининградской области // Транспорт и сервис. 2017. №5. С. 43—52. EDN: YKSZIT.
24. *Свищев Н.Д., Гладышев М.Д., Старов Д.В.* Подводный телеуправляемый аппарат осмотрового класса // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2019. Т. 1, №1. С. 70. EDN: LCOPFQ.
25. *Чемоданов М.Н., Кожемякин И.В., Блинков А.П., Захарьева О.В.* Опыт разработки и использования учебно-практических морских роботов в СПбГМТУ // Экстремальная робототехника. 2024. №1 (34). С. 444—449. EDN: VHXBEP.
26. *Tsurkan K.A., Aksenova N.V.* Application of autonomous and remotely operated underwater robots in the oil and gas industry // Recent Achievements and Prospects of Innovations and Technologies. 2025. №4. P. 340—347. EDN: WDQBIZ.
27. *Данцевич И.М., Лютикова М.Н.* Системный анализ достижимости параметров динамики телеуправляемых аппаратов по показателям статической устойчивости и технической производительности // Морские интеллектуальные технологии. 2024. №2-1 (64). С. 189—197. doi: 10.37220/MIT.2024.64.2.022. EDN GUKIRD.
28. *Русецкий А.Е., Шестибратов Д.В., Сергеев С.Р.* Применение подводных роботизированных систем в нефтегазовой отрасли // Академическая публикация. 2023. №8-1. С. 83—92. EDN: SPFTAI.

Об авторах

Артем Вадимович Ребриев — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: rebriev2001@gmail.com

Павел Сергеевич Щербань — кандидат технических наук, доцент образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: ursa-maior@yandex.ru

Э. А. Пликаускайте**СЕРОВОДОРОДНАЯ КОРРОЗИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ:
ПРИЧИНЫ, ПОСЛЕДСТВИЯ И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ**

Актуальность проблемы сероводородной коррозии обусловлена ее значительным негативным воздействием на надежность и безопасность всей нефтегазовой отрасли. Это воздействие затрагивает критически важное технологическое оборудование, трубопроводы и резервуары, используемые для добычи, транспортировки и хранения углеводородов. Цель работы — комплексный и детальный анализ механизмов, ключевых факторов риска, последствий и, что наиболее важно, современных эффективных методов защиты. В данной работе рассматриваются как химические, так и физические подходы к ингибированию коррозии в различных условиях эксплуатации. Методология исследования включает систематический обзор и глубокий анализ актуальной научной литературы, а также международных стандартов и рекомендаций. Детально рассмотрены сложные процессы взаимодействия сероводорода с металлами, образование сульфидных слоев и их значительное влияние на разрушение защитных пленок, которое приводит к ускоренной локальной коррозии и серьезным повреждениям. Проанализированы современные методы диагностики и мониторинга для раннего обнаружения возможных угроз. Основные результаты включают в себя детализирование механизмов сероводородной коррозии с учетом термодинамических и кинетических аспектов, четкую классификацию видов разрушений и систематизацию методов защиты: от применения ингибиторов до выбора устойчивых сплавов и нанесения современных полимерных покрытий. Выводы подтверждают, что комплексный подход на основе глубокого понимания химических процессов и своевременном применении современных средств защиты значительно повышает эксплуатационную надежность оборудования и существенно снижает риски разрушений и повреждений нефтегазового оборудования.

The relevance of the problem of hydrogen sulfide corrosion is due to its significant negative impact on the reliability and safety of the entire oil and gas industry. This impact affects critical technological equipment, pipelines, and storage tanks used for hydrocarbon production, transportation, and storage. The aim of this work is a comprehensive and detailed analysis of the mechanisms, key risk factors, consequences and, most importantly, modern effective protection methods. This study considers both chemical and physical approaches to corrosion inhibition under various operating conditions. The research methodology includes a systematic review and in-depth analysis of current scientific literature, as well as international standards and recommendations. The complex processes of hydrogen sulfide interaction with metals, the formation of sulfide layers, and their significant effect on the destruction of protective films, which leads to accelerated localized corrosion and serious damage, are examined in detail. Modern methods of diagnostics and monitoring for

early detection of possible threats are analyzed. The main result includes detailing the mechanisms of hydrogen sulfide corrosion, considering thermodynamic and kinetic aspects, a clear classification of types of damage and systematization of protection methods — from the use of inhibitors to selecting resistant alloys and applying modern polymer coating. The conclusions confirm that a comprehensive approach based on a deep understanding of chemical processes and timely application of modern protection means significantly increases the operational reliability of equipment and substantially reduces the risks of damage and failures of oil and gas equipment.

Ключевые слова: сероводород, сульфиды, материалы, ингибиторы коррозии, коррозия, сероводородное растрескивание, водородно-индуцированное растрескивание

Keywords: hydrogen sulfide, sulfides, materials, corrosion inhibitors, sulfide stress cracking, hydrogen induced cracking

Сероводородная коррозия оказывает существенное негативное влияние на надежность и безопасность нефтегазового оборудования, представляя собой одну из наиболее острых проблем на всех этапах: от добычи до транспортировки углеводородов. Активное взаимодействие сероводорода (H_2S) с металлами приводит к формированию коррозионных продуктов, которые способствуют ускоренному разрушению металлических конструкций и ухудшению их механических свойств. Данный вид коррозии не только сокращает срок службы дорогостоящего оборудования, но и создает серьезные экологические и техногенные риски, включая возможность разгерметизации и аварийных выбросов токсичных веществ. Изучение механизмов сероводородной коррозии и методов эффективной защиты оборудования является одной из самых важных и ресурсоемких задач нефтегазовой промышленности, требующих комплексного подхода, сочетающих материаловедение, электрохимию и эксплуатационные технологии.

Сероводород, растворяясь в водной среде, образует сульфидную кислоту, способную разрушать металл, особенно в условиях повышенной температуры и давления. При взаимодействии сероводорода с поверхностью металлов, в частности углеродистой и легированной сталей, образуется слой сульфида железа (FeS), который, в отличие от плотных оксидных пленок, имеет рыхлую и несплошную структуру, что разрушает защитный оксидный слой, выполняющий пассивирующую (защитную) функцию. Нарушение пассивности (коррозионной стойкости) приводит к ускоренному электрохимическому растворению металла и развитию локальной коррозии: язв, трещин и глубоким поражениям на поверхности металла (питтингам). Биокоррозия, вызванная деятельностью сульфатовосстанавливающих бактерий, которые в процессе своей жизнедеятельности продуцируют сероводород непосредственно в оборудовании, повышенные температура и давление, а также наличие влаги и хлорид-ионов, выступающих в роли катализаторов коррозии, усиливают эти процессы [11, с. 187—188].

Основные факторы риска сероводородной коррозии включают в себя концентрацию сероводорода в среде, влажность, температуру, содержание хлорид-ионов и активность сульфатовосстанавливающих бактерий [4]. С увеличением парциального давления сероводорода скорость коррозионного процесса возрастает по логарифмическому закону, а комбинированное воздействие температуры и хлоридов может приводить к синергетическому эффекту, ускоряющему деградацию материалов в десятки раз. Контроль и управление этими параметрами являются первоочередной задачей для обеспечения долговечности оборудования, что требует непрерывного мониторинга состава среды и применения соответствующих технологических решений, таких как осушка и дегазация [5].

Осушка — это процесс удаления влаги из технологических газов и нефтепродуктов, направленный на снижение влажности, которая выступает одним из факторов, ускоряющих сероводородную коррозию. Осушка достигается адсорбционными установками с использованием специальных сорбентов (молекулярных сит) или методами конденсации, которые позволяют снизить содержание воды до безопасных уровней для оборудования, тем самым уменьшая коррозионный риск.

Дегазация — это процесс удаления растворенного или связанного сероводорода из жидких нефтепродуктов и сырой нефти с целью снижения их коррозионной активности и повышения безопасности транспортировки и хранения. Как правило, дегазация проводится в специальных емкостях или колоннах, где через жидкость пропускается газ (например, инертный азот или воздух) для вытеснения или окисления сероводорода, что снижает его концентрацию в продукте [12].

Коррозионное разрушение металлов в условиях присутствия сероводорода приводит к прогрессирующему снижению прочности трубопроводов, резервуаров, теплообменной температуры и другого важного оборудования. На поверхности образуются пиррофорные отложения сульфида железа, которые способны самовоспламеняться при контакте с воздухом, и сульфидные пленки, маскирующие истинную глубину коррозионных повреждений, что в совокупности значительно увеличивает риск аварийных ситуаций, утечек взрывоопасных и токсичных газов и наносит колоссальный экономический ущерб вследствие простоев, дорогостоящего ремонта и экологических штрафов. Особую опасность представляет частое скрытое развитие коррозии, а визуальный контроль не позволяет своевременно выявить критические дефекты, например, расслоения и микрополости внутри стенки металла [15].

Кроме того, сероводородная коррозия провоцирует два наиболее опасных вида разрушения.

1. Сероводородное растрескивание под напряжением (SSC) — это хрупкое разрушение высокопрочных сталей под действием растягивающих напряжений в присутствии влаги и сероводорода. Атомарный водород, образующийся в результате катодной реакции при коррозии, адсорбируется на поверхности металла и диффундирует в его объем, где

накапливается в зонах повышенных напряжений (дефекты, отверстия, концентраторы) [1]. Накопление водорода снижает пластичность стали и приводит к формированию и развитию трещин, которые вызывают внезапное разрушение конструкции. SSC развивается при сочетании высокого содержания сероводорода, наличия влаги и критических напряжений, а также зависит от микроструктуры и химического состава стали. Наличие хлорид-ионов и низкий pH повышают риск растрескивания. Обнаружение SSC затруднено из-за внутреннего характера дефектов, требуя специализированных методов контроля.

2. Водородно-индуцированное растрескивание (НИС) — характеризуется образованием внутренних расслоений и трещин вдоль неметаллических включений (например, сульфидов марганца) из-за рекомбинации атомарного водорода в молекулярный в микрополостях материала. Создаваемое при этом высокое давление приводит к расслоению металла, причем разрушения часто остаются незамеченными до значительного повреждения. Ступенчатое растрескивание (SWC) является разновидностью водородно-индуцированного растрескивания, при которой отдельные расслоения соединяются между собой, формируя характерную «ступенчатую» структуру разрушения, которая увеличивает площадь и глубину разрушений, еще сильнее ухудшая механические свойства материала [13].

Оба вида растрескивания представляют большую угрозу для целостности нефтегазового оборудования, поскольку приводят к неожиданным и катастрофическим отказам. Их раннее выявление возможно только с помощью комплексного технического контроля и мониторинга.

Диагностика и мониторинг осуществляются с использованием комплекса современных методов, направленных на выявление дефектов на ранних стадиях, а именно:

1. Неразрушающий контроль (далее — НК): метод, позволяющий выявлять дефекты металла без нарушения целостности конструкции. Регулярное проведение обследований с применением ультразвуковых, радиационных, вихретоковых, рентгеновских и других методов нацелено на раннее обнаружение трещин, питтингов и других коррозионных повреждений до достижения ими критических размеров. НК позволяет оценить состояние сварных соединений и основных металлов, что важно для своевременного принятия ремонтных мер и предотвращения аварий [7].

2. Ультразвуковой контроль (далее — УЗК): один из наиболее точных методов диагностики, применяемый для обнаружения как внутренних, так и поверхностных дефектов. Ультразвуковые волны отражаются от неоднородностей структуры металла, что фиксируется приемником; таким образом можно выявлять микротрещины, коррозионные полости и замерять остаточную толщину стенок труб и аппаратов. УЗК отличается высокой чувствительностью и точностью, которые позволяют оценить скорость общей коррозии и прогнозировать срок службы оборудования [8].

3. Магнитопорошковый контроль (далее — МПК): широко применяется для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов в ферромагнитных материалах, такие как углеродистые стали. Метод основан на намагничивании объекта и нанесении на его поверхность порошков, которые концентрируются в местах нарушения магнитного поля, что визуализирует трещины и поры. МПК прост в выполнении, хорошо выявляет мелкие дефекты, что обеспечивает высокую точность оценки состояния оборудования [6].

4. Визуальный измерительный контроль (далее — ВИК): является первичным методом выявления, позволяющим обнаружить видимые следы коррозии, повреждения изоляционных слоев, царапины и нарушения защитных покрытий. ВИК проводится регулярным осмотром с применением оптических приборов (лупы, камеры), которые помогают быстро определить области повышенного риска и направить специализированные методы для глубокого анализа.

5. Мониторинг коррозии: непрерывное или периодическое измерение параметров коррозионного процесса в реальном времени с помощью специализированных датчиков (например, инспекционных катушек, датчиков линейного поляризованного сопротивления, электрохимических сенсоров). Мониторинг позволяет оперативно отслеживать скорость коррозии и изменять режим ингибирования и другие защитные меры. Анализ образцов-свидетелей (металлических пластин, помещенных в среду) дополнительно подтверждает эффективность принимаемых мер и обеспечивает прогнозирование ресурса оборудования.

Методы защиты от сероводородной коррозии подразделяются на:

1. Химические ингибиторы: пленкообразующие амины. Они адсорбируются на поверхности металла, создавая барьерную гидрофобную пленку, которая блокирует доступ агрессивных агентов к металлу и замедляет анодные и катодные электрохимические реакции [3, с. 60—61].

2. Выбор коррозионностойких материалов: для работы в средах с H_2S применяются стали, регламентированные стандартами (например, NACE MR0175/ISO 15156) [14, с. 7—8]:

— низкоуглеродистые и низколегированные стали для умеренно—агрессивных сред;

— высоколегированные стали (например, с содержанием хрома (Cr), молибдена (Mo), никеля (Ni)), образующие стойкие пассивные пленки оксидов и хроматов;

— коррозионностойкие сплавы на основе никеля и дуплексные стали для наиболее агрессивных условий с высокой температурой и давлением.

3. Защитные покрытия: нанесение эпоксидных, полимерных или стеклоэмалевых покрытий на внутреннюю поверхность трубопроводов и емкостей создает физический барьер между металлом и агрессивной средой [9].

4. Инженерно-технологические методы:

— осушка газа и очистка от сероводорода с помощью аминовых скрубберов для снижения агрессивности транспортируемой среды;

- катодная защита в сочетании с высококачественными изоляционными покрытиями для подземных и подводных трубопроводов;
- контроль технологических параметров (например, снижение температуры) в зонах повышенного риска [10].

На основе всего вышеперечисленного можно сделать вывод о том, что сероводородная коррозия — одна из основных и наиболее сложных проблем в эксплуатации нефтегазового оборудования. Глубокое понимание электрохимии и химии взаимодействия сероводорода с металлами, а также комплексное применение современных методов защиты, начиная от правильного выбора материалов и заканчивая системами мониторинга, позволяют значительно повысить надежность, безопасность и экономическую эффективность производственных процессов. Продолжающиеся исследования в области материаловедения, химической и технологической защиты способствуют разработке новых, все более эффективных, технологий и материалов для борьбы с сероводородной коррозией, что является залогом устойчивого развития нефтегазовой отрасли в условиях освоения агрессивных и сложных месторождений.

Список использованных источников

1. *Адаир С. Т.* Выбор материалов для трубопроводов, эксплуатируемых в сероводородной среде // Коррозия в нефтегазовой промышленности. 2016. URL: <https://conf-conf.ru/upload/iblock/ec2/ec2b2bb3d324af24179aa422a5d20f4b.pdf> (дата обращения: 22.10.2025).
2. *Быстрова О. Н.* Влияние сероводорода на коррозию углеродистой стали: натурные испытания в резервуарах по очистке сточных нефтепромысловых вод // Вестник Казанского технологического университета. 2017. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-serovodoroda-na-korroziyu-uglerodistoy-stali-naturnye-ispytaniya-v-rezervuarah-po-ochistke-stochnyh-neftepromyslovyh-vod> (дата обращения: 09.10.2025).
3. *Гурбанов Гусейн Рамзан оглы, Гасымзада Айсель Валийеддин кызы.* Ингибиторная защита нефтепромыслового оборудования от коррозии в средах, содержащих сероводород и углекислый газ // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2023. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ingibitornaya-zaschita-neftepromyslovogo-oborudovaniya-ot-korrozii-v-sredah-soderzhasih-serovodorod-i-uglekislyu-gaz> (дата обращения: 22.10.2025).
4. *Кантюков Р. Р., Запелалов Д. Н., Ваганов Р. К.* Анализ применения и воздействия углекислотных сред на коррозионное состояние нефтегазовых объектов // Записки Горного института. 2021. URL: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/14886?setLocale=ru_RU (дата обращения: 22.10.2025).
5. *Коннов Д. В.* Прогнозирование коррозионных дефектов в нефтяных трубопроводах // UNIVERSAM: Технические науки. 2023. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16180> (дата обращения: 22.10.2025).
6. *Мельникова А. С.* Магнитопорошковый контроль: особенности метода, этапы проведения, требования к специалистам // НЦПО. 2025. URL: <https://ncpo.ru/blog/magnitoporoshkovyj-kontrol-osobennosti-metoda-ehrapy-provedeniya-trebovaniya-k-specialistam/> (дата обращения: 22.10.2025).

7. Мельникова А. С. Неразрушающие методы контроля металлов и сварных соединений: особенности методов, этапы проведения, требования к специалистам // НЦПО. 2025. URL: <https://ncpo.ru/blog/nerazrushayushchie-metody-kontrolya-metallov-i-svarnykh-soedineniy-osobennosti-metodov-etapy-provede/> (дата обращения: 22.10.2025).

8. Мельникова А. С. Ультразвуковой контроль (УЗК): особенности метода, этапы проведения, требования к специалистам // НЦПО. 2025. URL: <https://ncpo.ru/blog/ultrazvukovoy-kontrol-uzk-osobennosti-metoda-etapy-provedeniya-trebovaniya-k-spetsialistam/> (дата обращения: 22.10.2025).

9. Ниязов А. И., Василевская С. П. Комплексный подход к выбору технологии борьбы с коррозией на месторождениях с содержанием сероводорода // Молодой ученый. 2025. № 3 (554). С 37—41. URL: <https://moluch.ru/archive/554/121819> (дата обращения: 09.10.2025).

10. Очистка воздуха от сероводорода: источники, методы, скрубберы газоочистки от H₂S // Факел. 2022. URL: <https://fakel-f.ru/blog/25-10-22> (дата обращения: 22.10.2025).

11. Петрушин Е. О. Анализ протекания сероводородной коррозии и очистка природного газа от сероводорода // Науки о земле. 2023. URL: <https://id-yug.com/images/id-yug/SET/2023/4/2023-4-186-194.pdf> (дата обращения: 10.10.2025).

12. Удаление H₂S путем дегазации сырой нефти // Atlas Copco. 2018. URL: <https://www.atlascopco.com/ru-kz/rental/resources/blog/removal-of-h2s-via-crude-oil-stripping> (дата обращения: 22.10.2025).

13. Hydrogen-Induced Cracking (HIC) // Corrosionpedia. 2024. URL: <https://www.corrosionpedia.com/definition/649/hydrogen-induced-cracking-hic> (дата обращения: 22.10.2025).

14. Petroleum, petrochemical, and natural gas industries. Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production. Part 1: General principles for selection of cracking-resistant materials // International Standard ANSI/NACE MR0175/ISO 15156-1:2015. 2015. URL: <https://energy-steel.com/wp-content/uploads/2024/12/NACE-MR0175-or-ISO-15156.pdf> (дата обращения: 23.10.2025).

15. Understanding the Impact of Corrosion on the Oil and Gas Industry // CDI Products. 2024. URL: <https://www.cdiproducts.com/blog/understanding-the-impact-of-corrosion-on-the-oil-and-gas-industry> (дата обращения: 10.10.2025).

Об авторе

Элина Алексеевна Пликаускайте — студент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: EAPlikauskayte@stud.kantiana.ru

А. А. Юрова, О. И. Барсуков**К ВОПРОСУ О МАССИВНОМ ВЕКТОРНОМ ПОЛЕ
ВО ФРИДМАНОВСКОЙ МЕТРИКЕ**

Тензор энергии-импульса электромагнитного поля в однородных, изотропных пространствах (пространствах Фридмана) обладает избытком симметрий, которые буквально приводят к заключению о том, что в таких пространствах может существовать лишь нулевое электромагнитное поле. Это находится в резком противоречии с фактом существования главного космологического объекта — реликтового излучения с температурой 2,7 К и равновесным планковским спектром. Тот факт, что Вселенная FRW не допускает электромагнитного поля, обычно игнорируется в стандартных текстах по космологии. Вместо этого предполагается, что реликтовое излучение подчиняется простому уравнению состояния $p = 1/3 \rho$, а тензор энергии-импульса — это просто тензор энергии-импульса идеальной жидкости. Что касается электромагнитной природы излучения, то предполагается, что оно является результатом некоей сложной схемы усреднения, которая, однако никогда подробно не описывается. В данной работе мы рассматриваем экзотическую возможность того, что фотоны реликтового излучения имеют чрезвычайно малую, но не нулевую массу. Мы показываем, что в этом случае, проблема существования точных и нетривиальных решений снимается.

The electromagnetic stress-energy tensor in homogeneous, isotropic spaces (Friedmann spaces) possesses an excess of symmetries that literally lead to the conclusion that only a zero electromagnetic field can exist in such spaces. This is in sharp contradiction with the existence of a key cosmological object: the cosmic microwave background radiation with a temperature of 2.7 K and an equilibrium Planck spectrum. The fact that the FRW universe does not admit an electromagnetic field is usually ignored in standard cosmology texts. Instead, it is assumed that the cosmic micro-wave background radiation obeys the simple equation of state $p = 1/3 \rho$, and the stress-energy tensor is simply the stress-energy tensor of an ideal fluid. As for the electro-magnetic nature of the radiation, it is assumed that it is the result of some complex averaging scheme, which, however, is never described in detail. In this paper, we consider the exotic possibility that cosmic microwave background photons have an extremely small but non-zero mass. We show that in this case, the problem of the existence of exact and non-trivial solutions is eliminated.

Ключевые слова: электромагнитное поле, массивные векторные поля, вселенная Фридмана, уравнения Лагранжа — Эйлера

Keywords: electromagnetic field, massive vector fields, Friedman universe, Lagrange — Euler equations

В работе [1, с. 8] Типлер обратил внимание на следующее обстоятельство: калибровочное $U(1)$ поле (то есть электромагнитное поле) не может существовать в метрике Фридмана. Возьмем тензор энергии-импульса (stress energy tensor) $T^{\mu\nu}$ электромагнитного поля (греческие индексы пробегают значения от нуля до трех, латинские от единицы до трех, сигнатура матрицы метрического тензора в пространстве Минковского $(+, -, -, -)$). В ортонормированном базисе в метрике Фридмана нет потоков, потому следует потребовать, чтобы недиагональные элементы типа T^{0i} были равны нулю. Эти элементы пропорциональны вектору Пойтинга, откуда

$$T^{0i} = \frac{(\vec{E} \times \vec{B})^i}{4\pi} = 0.$$

Отсюда следует, что $\vec{B} = a\vec{E} = aE\vec{l}$. Здесь a — число; для простоты предположено, что вектор напряженности электрического поля направлен вдоль орта \vec{l} . Вычисляя диагональные компоненты $T^{\mu\nu}$, находим:

$$T^{00} = \rho = E^2(1 + a^2)/8\pi, \quad (1)$$

$$T^{11} = -\rho = -T^{22} = -T^{33}. \quad (2)$$

Однако изотропность метрики Фридмана требует выполнения условий

$$T^{11} = T^{22} = T^{33},$$

откуда немедленно следует, что

$$E^2 + B^2 = 0,$$

то есть

$$\vec{E} = \vec{B} = 0.$$

Чтобы избежать такого обескураживающего вывода, Типлер предполагает, что на самом деле реликтовое излучение связано не с абелевой группой $U(1)$, а с неабелевой группой $SU(2)$! Действительно, любое неабелево поле Янга — Миллса с нормальной подгруппой $SU(2)$ может быть ненулевым в замкнутой вселенной Фридмана, потому что $SU(2)$ является однородной и изотропной 3-сферой. Соответственно, в серии статей он защищает гипотезу (см. например [1; 2]), что квантованное калибровочное поле в плоской Вселенной Фридмана обязательно имеет планковское распределение с «псевдотемпературой», пропорциональной $1/R$, где R — масштабный фактор Вселенной Фридмана. Таким образом, возможно, что чистое калибровочное поле $SU(2)$ (левое) в очень ранней Вселенной сохранилось до наших дней (в сочетании с полем Хиггса), и в этом случае реликтовое излучение не будет электромагнитным тепловым излучением: согласно гипотезе Типлера должна отсутствовать абелева часть $U(1)$, что означает, что реликтовое излучение не будет взаимодействовать с правыми кварками. Наблюда-

ния космических лучей сверхвысокой энергии (UHE) за последние несколько десятилетий, включая наблюдения проведенные коллаборацией Пьера Оже [3—5], указывают, что это не исключено.

Кроме того, Типлер отмечает, что если CBR (реликтовое излучение) представляет собой (левое) калибровочное поле $SU(2)$, объединенное с вакуумом Хиггса, а не исключительно $U(1)$ электромагнитное поле, то оно также не может эффективно взаимодействовать с правыми электронами. Таким образом, можно ожидать, что псевдофотоны CBR будут демонстрировать существенно меньший эффект Сюняева — Зельдовича, чем предсказывает традиционная теория. Есть некоторые указания на то, что это может иметь место, на экспериментах WMAP [6; 7], а также PLANCK [8].

Вернемся к проблеме тривиальных решений уравнений Максвелла в метрике Фридмана. Можно допустить и иное объяснение данного результата: в частности, предположить, что во фридмановской вселенной (и в том числе в пространстве Минковского) электромагнитное поле на самом деле является *массивным векторным полем*.

Действительно, будем исходить из лагранжиана вида

$$L = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^2 + \frac{m^2}{2} A_\mu^2, \quad (3)$$

или в явном виде

$$L = \frac{1}{2} (\vec{E}^2 - \vec{B}^2) + \frac{m^2}{2} (\phi^2 - \vec{A}^2), \quad (4)$$

где все обозначения — стандартные:

$$\vec{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial\vec{A}}{\partial t}, \quad \vec{B} = \nabla \times \vec{A},$$

$A^0 = \phi$, $A^i = (\vec{A})^i$, $g_{\mu\nu} = \text{diag}(+1, -1, -1, -1)$, а также используются традиционные упрощенные обозначения типа $A_\mu^2 = A_\mu A^\mu$ и т. д.

Варьируя, получаем уравнение Прока:

$$\partial_\mu F^{\nu\mu} = m^2 A^\nu. \quad (5)$$

Здесь сделаем два важных замечания. Во-первых, для упрощения расчетов далее мы будем работать сугубо в пространстве Минковского. Во-вторых, отметим, что для того, чтобы закон сохранения заряда действовал, нам необходимо использовать калибровку Лоренца:

$$\partial_\mu A^\mu = 0. \quad (6)$$

Для того чтобы убедиться, что условие (6) необходимо, достаточно продифференцировать (5) по x^ν . Отметим также, что, используя (4), можно переписать (5) в знакомом виде уравнения Клейна — Гордона:

$$(\partial_\mu \partial^\mu + m^2) A^\nu = 0.$$

Теперь перейдем к вычислению тензора энергии-импульса. Для этого можно либо проварьировать действие по метрике, либо воспользоваться уравнениями Лагранжа — Эйлера. В последнем случае нужно вычислить $\partial_\mu L$ и воспользоваться уравнениями движения (5) или, что то же самое,

$$\partial_\mu \frac{\partial L}{\partial A_{\nu,\mu}} = \frac{\partial L}{\partial A_\nu}, \quad (7)$$

где, как обычно, $A_{\nu,\mu} = \partial A_\nu / \partial x^\mu$. Для удобства проверки можно использовать следующую формулу:

$$\frac{\partial F_{\rho\sigma}}{\partial A_{\nu,\mu}} = \delta_\sigma^\nu \delta_\rho^\mu - \delta_\rho^\nu \delta_\sigma^\mu.$$

После дифференцирования по x^μ и ряда преобразований с использованием (5) получаем

$$\partial_\beta T_\mu^\beta = 0, \quad (8)$$

где

$$T_\mu^\beta = F^{\nu\beta} \partial_\mu A_\nu - \delta_\mu^\beta L. \quad (9)$$

Тензор энергии-импульса (9) не симметричен, поэтому вычтем из него выражение

$$S_\mu^\beta = \partial_\lambda (F^{\lambda\beta} A_\mu).$$

В силу асимметрии $F^{\lambda\beta}$ имеет место быть равенство $\partial_\beta T_\mu^\beta = 0$, поэтому, определяя $\theta_\mu^\beta = T_\mu^\beta - S_\mu^\beta$, мы получаем новую величину:

$$\partial_\beta \theta_\mu^\beta = 0,$$

которая является сохраняющейся в силу справедливости (8), но при этом уже симметрична по индексам: $\theta_{\mu\nu} = \theta_{\nu\mu}$. Это и есть наш искомый тензор энергии-импульса:

$$\theta_\mu^\beta = F^{\nu\beta} F_{\mu\nu} + m^2 A^\beta A_\mu - \delta_\mu^\beta L. \quad (10)$$

Если вычислить след от (10), получаем

$$Tr \theta_\mu^\beta = \theta_\mu^\mu = -m^2 A_\mu^2. \quad (11)$$

Таким образом, тензор энергии-импульса, как и следовало ожидать, становится не бесследовым, что очевидно: массивное поле не обладает конформной симметрией. Но тогда, казалось бы, для массивного векторного поля уже неверным будет использовать уравнение состояния с параметром адиабатичности $^{4/3}$ (то есть $w = 1/3$). Но, оказывается, это не так!

Для начала наложим условие отсутствия потоков типа (1): $T^{0i} = 0$. После вычислений находим:

$$\vec{E} \times \vec{B} = -m^2 \phi \vec{A}, \quad (12)$$

где $\phi = A^0$, $A^i = (\vec{A})^i$. Таким образом, при $m \neq 0$ не требуется коллинеарности \vec{E} и \vec{B} , из-за которой и возникали все проблемы. Далее, вычисляя диагональные компоненты (10) получаем:

$$\begin{aligned} \theta_0^0 &= \frac{1}{2}(\vec{E}^2 + \vec{B}^2) + \frac{m^2}{2}(\phi^2 + \vec{A}^2), \\ \theta_1^1 &= E_x^2 - B_z^2 - B_y^2 - m^2 A_x^2 - L, \\ \theta_2^2 &= E_y^2 - B_z^2 - B_x^2 - m^2 A_y^2 - L, \\ \theta_3^3 &= E_z^2 - B_x^2 - B_y^2 - m^2 A_z^2 - L, \end{aligned} \quad (13)$$

где нижние индексы обозначают обычные компоненты: $\vec{A} = (A_x, A_y, A_z)$ и т. д.

Теперь выберем $\vec{E} = (E, 0, 0)$. Из (12) следует, что $A_x = 0$ (проверку случая $\phi = 0$ мы оставляем читателю). Потребовав, чтобы обращались в нуль все остальные, недиагональные, компоненты θ_j^i , получим:

$$\theta_2^1 = B_y B_x = 0, \quad \theta_3^1 = B_z B_x = 0, \quad \theta_3^2 = B_y B_z - m^2 A_y A_z = 0. \quad (14)$$

Отсюда следует, что нужно выбрать $B_x = 0$. Теперь потребуем, чтобы $\theta_1^1 = \theta_2^2 = \theta_3^3$. Решая эти уравнения совместно с третьим уравнением (14), находим, что $m^2 = -\mu^2 < 0$ и

$$A_y = \frac{\kappa B_z}{\mu}, \quad A_z = -\frac{\kappa B_y}{\mu},$$

причем $\kappa = \pm 1$. Кроме того:

$$E = \pm \sqrt{B_y^2 + B_z^2} = -\kappa \mu \phi.$$

Последнее уравнение можно использовать для выражения ϕ и $B_{y,z}$ через E . Окончательно имеем

$$\begin{aligned} B_y &= E \sin \eta, & B_z &= E \cos \eta, \\ \phi &= -\frac{E}{\kappa \mu}, & A_y &= \frac{\kappa E \cos \eta}{\mu}, & A_z &= -\frac{\kappa E \sin \eta}{\mu}, \end{aligned} \quad (15)$$

где η — произвольная пока функция. Вот теперь легко убедиться, что

$$A_\mu^2 = \phi^2 - \vec{A}^2 = 0,$$

то есть несмотря на то, что массовый член наличествует (и он тахионный!), тем не менее

$$\theta_{\mu}^{\mu} = \rho - 3p = 0.$$

Другим словами, обычное уравнение состояния, которое пишется для электромагнитного поля с $w = 1/3$ остается верным.

Таким образом, мы показали, что векторное массивное тахионное поле вкладывается в метрику Фридмана и описывается обычным баротропным уравнением состояния с адиабатическим коэффициентом $^{4}/_{3}$. Конечно, тахионная природа векторного поля не вселяет оптимизма по поводу физических приложений. Тем не менее, хотя в чисто методическом плане интересно задать вопрос о тахионных эффектах, например, не могут ли тахионные поля объяснить эффект обрезания в спектре высокоэнергетичных космических лучей Грейсена, Зацепина, Кузьмина [9—11], мы отложим этот вопрос для дальнейшего исследования.

Список литературы

1. *Tipler F.J.* Genesis: How the Universe Began According to Standard Model Particle Physics. 2001. URL: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0111520> (дата обращения: 25.05.2025).
2. *Tipler F.J.* The Structure of the World from Pure Numbers // *Rep. Prog Phys.* 2005. Vol. 68. P. 897—964.
3. *Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al.* Correlation of the highest-energy cosmic rays with nearby extragalactic objects // *Science.* 2007. Vol. 318. P. 938.
4. *Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al.* Correlation of the highest-energy cosmic rays with the positions of nearby active galactic nuclei. URL: <https://arxiv.org/abs/0712.2843> (дата обращения: 04.10.2025).
5. *Abreu P., Aglietta M.* Measurement of the Depth of Maximum of Extensive Air Showers above 1018 eV // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104. P. 091101.
6. *Lieu R., Mittaz J.P.D., Zhang Sh.-N.* The Sunyaev-Zel'dovich Effect in a Sample of 31 Clusters — a Comparison Between the X-ray Predicted and WMAP Observed CMB Temperature Decre-ment // *Astrophysical Journal.* 2006. Vol. 648. P. 176—181.
7. *Diego J.M., Partridge B.* The Sunyaev — Zeldovich Effect in Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2010. Vol. 402. P. 1179—1194.
8. *Ade P., Aghanim N., Armitage-Caplan C. et al.* Planck 2013 Results. XX Cosmology from Sunyaev-Zeldovich Cluster Counts to appear in *Astronomy & Astrophysics.* URL: <https://arxiv.org/abs/1303.5080> (дата обращения 20.10. 2025).
9. *Zatsepin G. T., Kuz'min V.A.* Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays // *Sov. Phys. JETP Lett.* 1966. Vol. 4. P. 78—79.
10. *Greisen K.* End to the Cosmic Ray Spectrum? // *Phys. Rev. Lett.* 1966. Vol. 16. P. 748.

11. *Abbasi R. U., Abu-Zayyad T., Allen M. et al.* First Observation of the Greisen — Zatsepin — Kuzmin Suppression // *Phys.Rev.Lett.* 2008. Vol. 100. P. 101101.

Об авторах

Алла Александровна Юрова — канд. физ.-мат. наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта; доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий, Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия.

E-mail: alla.yurova@klgru.ru

Олег Игоревич Барсуков — ассистент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: oibarsukov97@gmail.com

Научное издание

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Выпуск 4

Сборник научных трудов

Под редакцией А. Д. Быковой

Редактор *О. И. Бессчастнова*
Компьютерная верстка *Г. И. Винокурова*

Подписано в печать 20.01.2026 г.
Дата выхода в свет 27.01.2026 г.
Формат 70 × 108 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 11,0
Тираж 300 экз. (1-й завод 31 экз.). Заказ 03

Издательство Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта
236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, 14