



АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ МИКРОТУРБИНЫХ МЭМС-УСТРОЙСТВ В КАЧЕСТВЕ ВЫСОКОЭНЕРГОЕМКИХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Галиулина¹ А.Р., Денисов² А.И., Денисова¹ Н.В., Ившин И.В.¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
²ООО «Шайдэн»

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования обусловлена растущей потребностью в создании компактных, высокоэнергоемких источников питания для автономных систем, таких как беспилотные летательные аппараты (БПЛА), где традиционные литий-ионные аккумуляторы демонстрируют ограничения по удельной энергоемкости. Перспективным направлением является разработка микротурбинных генераторов на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), способных преобразовывать химическую энергию топлива в электрическую с высоким КПД. ЦЕЛЬ. Восполнить пробел в отечественной литературе по микротурбинным технологиям, систематизировать мировой опыт и определить перспективы разработки высокоэнергоемких МЭМС-источников питания в Российской Федерации. Провести анализ конструкций, материалов, технологий изготовления и термодинамических характеристик микротурбин, а также выполнить оценочный расчет параметров микрогазотурбинного генератора. МЕТОДЫ. В работе применены методы системного анализа научно-технической литературы, сравнительная оценка конструктивных решений и термодинамический расчет на основе цикла Брайтона. Для оценочного расчета мощности микротурбины использованы фундаментальные законы термодинамики и упрощенные модели работы компрессора, камеры сгорания и турбины. РЕЗУЛЬТАТЫ. Проведен всесторонний обзор ключевых технологических решений в области микротурбин, включая применение газовых подшипников, термостойких материалов (карбид кремния), методов микрообработки и особенностей проектирования для микромасштаба. Выполненный оценочный расчет для микротурбины с расходом топлива $\sim 5.84 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ показал потенциальную электрическую мощность порядка 100 Вт. Выявлены основные технологические вызовы: обеспечение стабильности при сверхвысоких оборотах, управление микросгоранием, тепловые режимы и интеграция компонентов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Микротурбинные технологии на основе МЭМС обладают значительным потенциалом для создания источников питания с удельной энергоемкостью, в 10-20 раз превышающей лучшие образцы аккумуляторов. Несмотря на существующие технологические барьеры, дальнейшие исследования в области оптимизации термодинамических циклов, разработки новых материалов и совершенствования методов микрообработки открывают перспективы для разработки отечественных высокоэффективных энергетических установок для БПЛА и других автономных систем, что является ключевым для укрепления технологического суверенитета.

Ключевые слова: микротурбины; микрогенераторы; микроэлектромеханические системы; беспилотные летательные аппараты; гибридные энергосистемы.

Для цитирования: Галиулина А.Р., Денисов А.И., Денисова Н.В., Ившин И.В. Анализ перспектив микротурбинных МЭМС-устройств в качестве высокоэнергоемких источников питания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 2. С. 101-121. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-101-121

ANALYSIS OF THE PROSPECTS OF MICROTURBINE MEMS DEVICES AS HIGH-POWER SUPPLY SOURCES

Galiulina¹ A.R., Denisov² A.I., Denisova¹ N.V., Ivshin¹ I.V.

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
²LLC «Shaiden»

Abstract: The relevance of this research is driven by the growing need to create compact, high-energy power sources for autonomous systems, such as unmanned aerial vehicles (UAVs), where traditional lithium-ion batteries exhibit limitations in specific energy capacity. A promising direction is the development of microturbine generators based on microelectromechanical systems (MEMS), capable of converting the chemical energy of fuel into electrical energy with high efficiency. **PURPOSE:** To fill the gap in the domestic literature on microturbine technologies, systematize global experience, and identify prospects for the development of high-energy MEMS power supplies in the Russian Federation. To analyze the designs, materials, manufacturing technologies, and thermodynamic characteristics of microturbines. **METHODS.** This study utilizes methods of system analysis of scientific and technical literature, a comparative evaluation of design solutions, and a thermodynamic calculation based on the Brayton cycle and fundamental laws of thermodynamics. **RESULTS.** A comprehensive review of key technological solutions in the field of microturbines, including the use of gas bearings, heat-resistant materials (silicon carbide), micromachining methods, and design features for the microscale. An evaluation of the output power of a microturbine generator with a fuel consumption of $\sim 5.84 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ showed that this machine is capable of producing approximately 100 W. Complex technological aspects during the development process included ensuring stability at ultra-high speeds, microcombustion control, thermal conditions, and component integration. **CONCLUSION.** MEMS-based microturbine technologies offer significant potential for creating power sources with a specific energy density 10-20 times higher than the best batteries. Despite existing technological barriers, further research in optimizing thermodynamic cycles, developing new materials, and improving micromachining methods offers prospects for developing domestically produced, highly efficient power systems for UAVs and other autonomous systems, which is key to strengthening technological sovereignty.

Keywords: microturbines; microgenerators; microelectromechanical systems; unmanned aerial vehicles; hybrid power systems.

For citation: Galiulina A.R., Denisov A.I., Denisova N.V., Ivshin I.V. Analysis of the prospects of microturbine MEMS devices as high-power supply sources. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (2): 101-121. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-101-121.

Введение (Introduction)

Теоретический и методологический базис работы составляют:

- термодинамическая модель цикла Брайтона для микрогазотурбинной установки с учётом ограничений по температуре и эффективности компрессора, турбины и генератора;
- использование закона куба-квадрата для анализа масштабируемости микротурбинных систем и обоснования модульной архитектуры;
- методы сравнительного анализа конструктивно-технологических решений (тип подшипников, материалы SiC/Si₃N₄, схемы интеграции генератора), применённые к выбору перспективных направлений для отечественных разработок.

Цель исследования нашей работы заключается в восполнении пробела в отечественной научно-технической литературе по проблематике применения технологии микротурбин для создания высокоэнергоемких источников питания, а также в определении перспектив и направлений её развития в Российской Федерации.

Научная значимость работы состоит не только в систематизации и критическом анализе мирового опыта по микротурбинным МЭМС-источникам энергии, но и в получении новых результатов: оценочных расчётов мощности и параметров микрогазотурбинного генератора в диапазоне 100–200 Вт для типичных БПЛА, а также в обосновании оригинальной технологической схемы прототипирования с использованием аддитивного производства, ориентированной на условия отечественной промышленности.

Полученные оценки и предложенная технологическая схема формируют основу для целенаправленного проектирования отечественных микротурбинных МЭМС-устройств, а не только для обзора существующих зарубежных разработок.

Практическая значимость исследования заключается в обосновании перспективности и потенциала технологии микро-турбин для разработки источников питания нового поколения, способных значительно (в разы) увеличить автономность критически важных автономных систем, таких как БПЛА. Предлагаемые направления развития данной технологии в России могут способствовать созданию отечественных высокоэффективных

энергетических решений, что является ключевым для укрепления технологического суверенитета и расширения возможностей применения автономных комплексов в различных отраслях.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Впервые для условий потенциального отечественного производства выполнен комплексный оценочный термодинамический расчёт микрогазотурбинного генератора мощностью порядка 100 Вт при расходе керосина $5,84 \cdot 10^{-9}$ м³/с, работающего по циклу Брайтона, с учётом параметров камеры сгорания и ограничений по температуре материалов.

2. Обоснована оригинальная технологическая концепция удешевления этапа НИОКР микрогазотурбинных МЭМС устройств за счёт использования электрохимического аддитивного производства и 3D печати (включая керамику) для изготовления прототипов вместо традиционных кремниевых технологических процессов на ранних стадиях разработки.

3. Предложена теоретическая модель модульной архитектуры энергетических установок на основе массивов микрогазотурбин, опирающаяся на закон куба квадрата, демонстрирующая потенциал кратного увеличения удельной мощности при объединении большого числа малогабаритных турбин в единый блок.

4. Сформулирован методологический подход к выбору направлений развития отечественных микрогазотурбинных технологий: от анализа мировых прототипов и расчётных оценок до технико-технологического обоснования перспектив миниатюризации (диаметры роторов ~10 мм и менее) для задач БПЛА и распределённой генерации.

В данной статье будет проведен всесторонний обзор достижений в области микрогазотурбинных технологий на основе зарубежных источников, а также предложены перспективные направления для развития данной технологии в Российской Федерации, с учетом актуальных потребностей и возможностей отечественной промышленности и науки.

Литературный обзор (Literature Review)

Применение МЭМС позволяет создавать микрогазотурбинные устройства для элементов питания с повышенной энергоёмкостью. Использование высокоточных методов микрообработки, включая аддитивное производство и глубокое реактивно-ионное травление, обеспечивает изготовление оптимизированных микроструктур, способствующих повышению эффективности энергопреобразования [1].

Несмотря на значительный потенциал, данное направление исследований, активно развивающееся за рубежом, в отечественной научно-технической литературе освещено недостаточно, а специализированные исследования практически отсутствуют. Одним из наиболее значимых прорывов в этой области стали работы, проведенные в Массачусетском технологическом институте (MIT) в период с 1997 по 2003 годы при финансовой поддержке DARPA [2, 3]. В рамках этих исследований был успешно разработан и продемонстрирован прототип МЭМС-микрогазотурбины мощностью 20 Вт с габаритными размерами 20x20x2 мм, что подтвердило принципиальную возможность изготовления таких устройств.

Изначальной целью этих работ было создание компактного источника автономного питания с беспрецедентно высокой удельной энергетической емкостью. Предварительные расчеты показали, что интеграция двадцати таких микрогазотурбин с компактным резервуаром для жидкого топлива могла бы обеспечить источник питания массой около 500 грамм (сопоставимой с типичной батареей небольшого БПЛА), но с временем автономной работы, более чем в 10 раз превышающим возможности современных литий-ионных аналогов. Для БПЛА, активно используемых в мониторинге, логистике, сельском хозяйстве, геодезии и других сферах, увеличение времени полета и, соответственно, дальности действия в десять раз является критически важным параметром, способным радикально расширить спектр их применения и экономическую эффективность.

В контексте повышения автономности БПЛА и преодоления ограничений традиционных источников энергии (аккумуляторов, солнечных панелей) значительный интерес представляют микроэлектромеханические системы (*Power-MEMS*) с микрогазотурбинными генераторами (MTG-модулями). В источнике *Schubert D.* [4] подробно исследует потенциал данной технологии, основанной на термодинамическом цикле Ренкина, для электроснабжения БПЛА.

В работе представлена концепция MTG-модулей, предложенная *Daniel Schubert (DLR German Aerospace Center)*, использующая органический цикл Ренкина (ORC) с толуолом в качестве рабочей жидкости. Указывается, что такие модули могут быть миниатюризированы для БПЛА, обеспечивая мощность до 10 Вт при КПД 10,85%. Приводятся примеры успешных реализаций *Power-MEMS*, включая микрогазотурбины групп *Reynaerts* (16 Вт, КПД 10,5%) и *Epstein* (17 Вт), а также микропаровые турбины

Колумбийского университета (КПД до 11%), что подтверждает технологическую осуществимость.

Среди ключевых преимуществ технологии для БПЛА выделяют высокую энергоёмкость по сравнению с аккумуляторами, компактность, независимость от температуры и универсальность в использовании различных источников тепла. Однако отмечаются и существенные недостатки, требующие дальнейшего изучения: сложность управления двухфазными потоками в условиях вибраций, наличие движущихся частей, масса системы и относительно более низкий КПД (10-11%) по сравнению с современными солнечными элементами (18-20%). В заключение подчеркивается, что, несмотря на текущие ограничения, микротурбинные системы на основе Power-MEMS обладают значительным потенциалом для энергетики БПЛА, особенно в комбинации с тепловыми буферами, и требуют дальнейших исследований для оптимизации КПД, снижения массы и повышения устойчивости к нагрузкам.

Для энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) значительное внимание уделяется адаптации микротурбинных систем к работе в различных климатических и эксплуатационных условиях. В частности, в работе *Hampel u Braun* [5] представлена модель микротурбины, позволяющая оценить ее производительность при переменных нагрузках и внешних воздействиях. Авторы показали, что электрический КПД микротурбины существенно снижается при частичных нагрузках (например, с 33% до 15% при 50% от номинальной мощности), в то время как тепловая эффективность демонстрирует большую стабильность (40-32%). Исследование также выявило влияние температуры окружающей среды (от -17.8°C до 50°C) на электрический КПД (30-34%) и тепловую мощность (колебания до $\pm 25\%$), а также чувствительность тепловой мощности к параметрам теплоносителя (до $\pm 9.5\%$ при изменении температуры возвратной воды на $\pm 22^\circ\text{C}$). Эти данные подчеркивают критическую важность учета переменных условий при проектировании компактных энергетических систем для БПЛА, несмотря на текущие ограничения микротурбин в аспекте удельной массы и КПД (10-15%). Тем не менее, высокая энергоёмкость микротурбин и их потенциал для гибридных систем делают их перспективным направлением для обеспечения длительной автономности БПЛА.

Сборка микросистем является фундаментальным этапом в производстве МЭМС и других микропродуктов. В отличие от макромира, где доминируют гравитационные силы, в микромасштабе ключевую роль играют поверхностные взаимодействия: электростатические силы, силы Ван-дер-Ваальса и капиллярные силы поверхностного натяжения. Это обуславливает принципиально иные требования к процессу, включающие достижение субмикронной точности позиционирования, преодоление адгезионных эффектов и решение проблем ограниченной визуализации. В работе [6], выполненной *Van Brussel H. et al.*, для решения этих задач разработаны различные методы и системы сборки. К ним относятся системы «ведущий-ведомый» с обратной связью по усилию, автоматизированные сборочные машины, использующие комбинации визуального и силового контроля, а также высокоточные микророботы, способные обеспечить нанометровую точность. Особое внимание уделяется бесконтактным методам манипуляции, таким как аэростатические захваты, оптические ловушки (лазерные пинцеты) и использование магнитных полей, минимизирующие механическое воздействие на хрупкие компоненты. Ключевым аспектом является также выбор адекватных технологий соединения, включающих механические крепления (микрозаклепки, пресс-посадки), различные виды бондинга (анодное, термокомпрессионное), склеивание и пайку, каждая из которых имеет свои преимущества и ограничения в зависимости от требуемой прочности, герметичности и точности позиционирования.

Подробное моделирование и разработка микротурбин проведено в работах [7, 8].

В статье *Dessornes et al.* (2005) [9] представлены исследования ключевых технологических элементов микротурбины, предназначенных для генерации энергии в микромасштабе, с целевыми характеристиками: диаметр 8 мм и скорость вращения до 1 миллиона оборотов в минуту.

Исследование сосредоточилось на трех критических аспектах:

1. Микрокамера сгорания: были изучены проблемы низкого числа Рейнольдса и высоких тепловых потерь. Оптимизация смешивания топлива и воздуха, а также проведение 3D-расчётов с использованием модели *PSR*, позволили определить параметры для устойчивого горения и минимизации тепловых потерь.

2. Газовые подшипники: разработаны гидродинамические подшипники с наклонными накладками и канавчатыми упорными подшипниками для обеспечения стабильности при экстремально высоких скоростях вращения. Масштабированные модели

подтвердили работоспособность подшипников и их потенциал при расчетном зазоре в 10 мкм.

3. МЭМС-технологии изготовления: применение многослойной кремниевой обработки (с использованием 3 пластин и 73 технологических этапов) позволило добиться требуемой точности изготовления микротурбины с лопатками высотой 220 мкм и зазорами 4 мкм, успешно решив проблемы трапецевидности и неравномерности травления.

Ключевые выводы работы подтвердили принципиальную возможность создания микротурбинных систем, особенно отметив преимущества разделения камеры сгорания и турбинного модуля для теплового управления, потенциал газовых подшипников для сверхвысоких скоростей и высокую точность, достигаемую МЭМС-технологиями. Однако, подчеркивается необходимость дальнейшей работы по интеграции компонентов и повышению общей надежности для коммерческого применения этих систем. Данное исследование является фундаментальным для понимания технических вызовов и путей их решения в области микротурбинных технологий.

Возрастающая потребность в высокоэнергоемких источниках питания для автономных микросистем, таких как портативные электронные устройства, делает микроэнергетические устройства на основе топлива перспективной альтернативой традиционным аккумуляторам, поскольку плотность энергии топлива значительно (до 100 раз) превосходит аналогичные показатели у лучших батарей. В этом контексте, работа [10] представляет собой всесторонний обзор микрогазовой турбины, разработанной в рамках проекта *PowerMEMS*, фокусируясь на ее конструкции, ключевых компонентах, технических вызовах и возможных решениях.

Согласно данным статьи микрогазовая турбина состоит из компрессора, камеры сгорания, турбины и электрогенератора. Прототип турбины с воздушным приводом, имеющий диаметр 10 мм, продемонстрировал механическую мощность до 50 Вт при КПД 24% на частоте вращения 130 000 об/мин. Однако для достижения высокой эффективности системы требуются скорости свыше 500 000 об/мин, что создает ряд серьезных инженерных задач.

Основными техническими вызовами при разработке таких систем являются: обеспечение стабильной работы при экстремально высоких частотах вращения (использование воздушного или специально разработанного гибридного аэростатического и фольгированного подшипника); устойчивость к высоким температурным нагрузкам (свыше 1200°C), что диктует применение термостойких материалов, таких как керамические композиты (например, карбид кремния); достижение высокой эффективности компонентов (компрессора и турбины) при малых размерах и низких числах Рейнольдса; минимизация потерь в системах рекуперации тепла; а также разработка высокоскоростного электрогенератора, способного эффективно функционировать при высоких температурах с учетом поверхностных и электромагнитных эффектов.

Решением стабильной работы при высоких частотах вращения являются гибридные аэростатические и фольгированный подшипники. В статье *Stefani F. et al.* [11] подмечается, что воздушные (аэродинамические, аэростатические) и магнитные подшипники, несмотря на их в высоких скоростях и температурах, сталкиваются с проблемами износа при пуске/остановке или требуют внешнего энергоснабжения. В связи с этим, предлагается инновационная гибридная система, сочетающая фольгированные подшипники для номинальных режимов работы и подшипники качения для переходных, что, по мнению авторов, обеспечивает высокую надежность, долговечность и адаптивность к экстремальным условиям эксплуатации микротурбин.

В частности, в работе [12] была представлена разработка одноступенчатой осевой микротурбины (турбины Лавалья) с диаметром ротора 10 мм. При тестировании на сжатом воздухе система, подключенная к генератору, продемонстрировала выработку 16 Вт электроэнергии при общем КПД 10%. Авторы отмечают, что основными технологическими барьерами являются ограничения по максимальной скорости вращения, обусловленные возможностями шарикоподшипников, а также значительные потери профиля лопасти и на выходе. Для сравнения, упомянута 4 мм микротурбина, разработанная в Массачусетском технологическом институте, обладающая плотностью мощности около 2 кВт/кг, что подчеркивает влияние масштабирования. Тем не менее, усовершенствованная версия представленной турбины показала увеличение электрической мощности до 44 Вт и КПД до 16% при повышенных температурах. В рамках данного проекта также ведется разработка центробежного компрессора (20 мм) для совместной работы с турбиной. Исследование подтверждает потенциал миниатюрных газотурбинных систем, указывая на необходимость

дальнейшей оптимизации скорости вращения, снижения потерь и интеграции камеры сгорания для повышения общей эффективности.

Критически важным компонентом ультрамикроразовых турбин (*UμGT*) являются высокоскоростные генераторы, где разработка *Celeroton* демонстрирует рекордную эффективность преобразования (93%) при скоростях до 840 000 об/мин благодаря использованию магнитов *SmCo* и безпазовых обмоток [13].

Так же стоит отметить, что в микрогенераторе оптимальная конфигурация расположения магнитов оказывает существенное влияние на коэффициент полезного действия (КПД) устройства, как это подробно рассмотрено в ряде научных статей [14, 15, 16]. Различные варианты организации магнитного поля, такие как радиальное, осевое или смешанное, приводят к различным характеристикам генерации электроэнергии.

Работа *Capata R., Marino L., Sciubba E.* (2014) [17] представляет собой одно из ключевых достижений, описывая разработку микротурбинного генератора на основе микроэлектромеханических систем (MEMS), представленного исследователями Массачусетского технологического института (MIT).

В работе подробно анализируются термодинамические и конструктивные особенности микротурбины, диаметром 1 см и толщиной 3 мм, изготовленной из карбида кремния (*SiC*). Устройство, работающее по циклу Брайтона, способно производить 10–20 Вт электроэнергии на водороде, с потенциалом до 100 Вт при использовании углеводородного топлива, демонстрируя плотность мощности, сопоставимую с крупногабаритными аналогами. Описывается использование сверхзвукового радиального компрессора (степень сжатия 4:1), оптимизированной для водорода камеры сгорания и турбины на общем валу с расчетной скоростью до 2 млн об/мин. Особое внимание уделяется применению *SiC* и нитрида кремния (*SiN*) как материалов, обеспечивающих высокую прочность и термостойкость в микромасштабе.

Однако, как подчеркивается, разработка таких систем сопряжена с уникальными технологическими вызовами, включающими особенности гидродинамики (доминирование вязких сил, ламинарное течение при сверхзвуковых скоростях), динамику высокоскоростных газовых подшипников, проблемы микромасштабного горения (короткое время пребывания, сложность с углеводородами) и интеграцию плоского индукционного генератора с эффективностью более 80%. Несмотря на эти сложности, подчеркивается высокий потенциал *MEMS*-микротурбин для создания мобильных источников энергии и микро-двигателей благодаря их высокой удельной мощности, компактности и мультитопливной способности. Перспективы дальнейших исследований связываются с совершенствованием технологий изготовления и разработкой каталитических камер сгорания.

Дальнейшее изучение и совершенствование камер сгорания отражено в работах [18, 19, 20]

В других своих исследованиях *Capata R. et al.* [21] демонстрируют, что миниатюризация приводит к существенным конструктивно-технологическим вызовам: снижение числа Рейнольдса, увеличение вязкостных потерь, ухудшение аэродинамической эффективности, а также необходимость обеспечения полного сгорания топлива в микрокамерах (требование числа Дамколера > 1).

Критически важными аспектами являются применение высокоскоростных газовых подшипников (до 2 млн об/мин), требующих исключительной точности изготовления ротора, и использование термостойких материалов (карбид кремния *SiC*, нитрид кремния *Si₃N₄*), которые, несмотря на хрупкость, обеспечивают необходимую прочность и термостойкость. Технологии производства, такие как глубокое реактивное ионное травление (DRIE) и микрореакционное спекание (MRS), позволяют создавать компоненты с требуемой точностью [22].

Экспериментальные исследования в публикации 2015 года подтверждают, что эффективность турбин достигает ~10% при высоких оборотах (до 110 000 об/мин), в то время как КПД компрессора снижается при низких числах Рейнольдса. Высокая температура выхлопных газов ($>450^{\circ}\text{C}$) открывает возможности для интеграции в комбинированные циклы (например, с ORC). Также из-за низкого числа Рейнольдса для минимизации потерь и оптимизации эффективности микротурбинных установок необходимо учитывать трёхмерную структуру потока и зазоров между лопаткой и корпусом, особенно в диапазоне свыше 8% от высоты лопатки, где вихрь в зазоре становится доминирующим [23].

Помимо авторов и институтов США, разработками и исследованиями ультрамикроразовыми турбинами занимаются авторы, представляющие Японское

общество газовых турбин и опирающиеся на международное сотрудничество при поддержке *NEOD*, подчеркивают потенциал таких устройств для будущего энергоснабжения [24].

В статье представлены результаты разработки двух моделей турбин: "район-кар" (2–3 кВт, 14,34 кг, 270 000 об/мин, тепловой КПД до 19% с регенерацией) и "тариф-кар" (до 170 000 об/мин, диаметр 20–32 мм, упрощенная сборка). В работе детально описываются ключевые технологии, включая конструкцию турбин с газовыми подшипниками и регенеративными теплообменниками для повышения эффективности. Отмечается разработка миниатюрных камер сгорания, обеспечивающих стабильное горение в широком диапазоне, и оптимизация радиальных турбин/компрессоров для минимизации аэродинамических потерь при малых размерах. Особое внимание уделяется высокой эффективности регенеративных теплообменников (до 80%) и стабильной работе газовых подшипников на высоких скоростях, а также испытаниям высокоскоростных генераторов с постоянными магнитами.

Как указывается в данном источнике, *UMGT* предназначены для использования в мобильных источниках питания, робототехнике, БПЛА и гибридных системах, благодаря их высокой удельной энергии (в 15–20 раз превышающей литий-ионные батареи) и компактности. Несмотря на значительный прогресс, авторы отмечают необходимость дальнейшей оптимизации теплопередачи, стабилизации вибраций и повышения эффективности компонентов, а также доработки преобразователей для высокочастотных генераторов.

В контексте развития распределённой энергетики и систем когенерации микрогазовые турбины (*Micro-GT*) сталкиваются с проблемой снижения эффективности при малых объёмах рабочей среды. В работе [25] предлагается решение этой проблемы за счёт применения замкнутых циклов с низким давлением на входе компрессора (ниже атмосферного). Авторы показывают, что такой подход позволяет сохранить высокий КПД даже для турбин малой мощности (до 10 кВт), достигая до 32% эффективности благодаря регенерации тепла и гибкости в выборе рабочей среды (например, гелий, водород, CO_2). Проведённый термодинамический анализ подтверждает, что наибольший КПД (до 36%) достигается при использовании воздуха, азота и водорода, с оптимальными параметрами давления на входе компрессора 0,02–0,1 МПа и температуры перед турбиной 850°C. Эти результаты демонстрируют, что замкнутые циклы позволяют преодолеть основные ограничения традиционных микротурбин, обеспечивая высокую эффективность (до 31.2% для 10 кВт) и уменьшение габаритов, что делает их перспективными для различных энергетических систем.

Ключевым элементом, определяющим эффективность преобразования тепловой энергии в механическую в этих системах, являются турбинные лопатки. Их проектирование требует тщательного учёта аэродинамических, тепловых и механических нагрузок, особенно при высоких скоростях вращения (до 120 000 об/мин) и температурах (до 1000°C). Основные факторы, снижающие эффективность, включают влияние зазоров между лопатками (увеличение на 10% может снизить производительность на 3–4%).

Результаты анализа показали, что распределение давления и скорости потока существенно зависят от угла атаки лопаток, при этом определенные углы обеспечивают максимальные показатели тяги (например, до 500 Н при массе двигателя 2050 г и расходе топлива 465 г/мин) [26, 27].

В своей работе А.В. Семенников [28] подчеркивает фундаментальную важность и динамичное развитие технологий микроэлектромеханических систем, которые, интегрируя микроэлектронные и микромеханические компоненты, создают устройства с уникальными функциональными возможностями для широкого спектра отраслей.

Основой для развития *MEMS* автор, как и в предыдущих источниках, отмечает кремний благодаря своим превосходным механическим и электрическим свойствам, а также полимеры (например, *PDMS*) для биомедицинских применений, металлы для проводящих элементов и перспективные наноматериалы, такие как графен и углеродные нанотрубки, обладающие уникальной прочностью и проводимостью. Семенников акцентирует, что свойства материалов напрямую определяют производительность, надежность и область применения *MEMS*-устройств.

Современные исследования в области газотурбинных технологий сосредоточены на гибридизации энергетических установок, в частности на интеграции солнечной энергии в парогазовые циклы (*ISCC*) для значительного снижения расхода топлива. Однако ключевыми нерешёнными проблемами остаются сложность миниатюризации микротурбин для портативных применений, высокие производственные затраты и оптимизация их

работы в условиях переменных нагрузок. Кроме того, отсутствуют эффективные методы прогнозирования деградации характеристик и внезапных отказов микротурбинного оборудования, что ограничивает надёжность таких систем в составе автономных элементов питания [29].

На основе проведённого анализа ключевых зарубежных исследований в области микротурбинных MEMS-устройств, систематизируем их основные параметры, технологические особенности и выявленные ограничения в виде сравнительной таблицы 1. Данная таблица позволяет наглядно сопоставить достижения различных научных групп и выявить общие тенденции, технологические барьеры и перспективные направления.

Таблица 1

Table 1

Сравнительный анализ ключевых исследований в области микротурбинных MEMS-устройств

Comparative analysis of key research in the field of microturbine MEMS devices

Автор(ы)/ Организа ция	Год	Мощность/ КПД	Ключевые технологии/ Особенности	Преимущества	Недостатки/ Вызовы
MIT (Epstein et al.)	1997 – 2003	20 Вт	Планарная конструкция, газовые подшипники, SiC-материалы	Высокая удельная мощность, компактность (20×20×2 мм)	Сложность интеграции, высокие скорости (>1 млн об/мин)
Schubert D. (DLR)	2012	До 10 Вт, КПД 10,85%	Органический цикл Ренкина (ORC), толуол как рабочая жидкость	Высокая энергоёмкость, независимость от температуры	Низкий КПД, сложность управления двухфазными потоками
Peirs et al.	2003	16 Вт, КПД 10,5%	Осевая микротурбина (турбина Лавалья), диаметр 10 мм	Простота конструкции, потенциал масштабирования	Ограничения по скорости из-за подшипников, потери на лопатках
Capata et al.	2014	10–20 Вт (на H ₂), до 100 Вт (углеводород)	Цикл Брайтона, SiC-материалы, скорость до 2 млн об/мин	Высокая плотность мощности, мультиплик.	Проблемы микросгорания, интеграция генератора
Hampel & Braun	2022	КПД 33% (номин.), 15% (при 50% нагрузки)	Модель микротурбины для переменных нагрузок	Стабильная тепловая эффективность (40–32%)	Чувствительност ь к температуре окружающей среды
Dessornes et al.	2005	Целевые параметры: 1 млн об/мин, диаметр 8 мм	Газовые подшипники, микрокамера сгорания, MEMS- обработка	Высокая точность изготовления, стабильность при высоких скоростях	Сложность интеграции, надёжность
Celeroton	2010	КПД 93% при 840 000 об/мин	Высокоскор. генератор на SmCo-магнитах, безпазовые обмотки	Рекордная эффективность преобразования	Высокая стоимость материалов
Matsuo et al. (Япония)	2003	2–3 кВт, КПД до 19%	Регенеративные теплообмен., газовые подшипники	Высокая энергоёмкость (в 15–20 раз выше Li-ion)	Оптимизация теплопередачи, вибрации
Kosowski & Piwowski	2020	До 32% КПД для 10 кВт	Замкнутый цикл с низким давлением на входе	Высокая эффективность при малой мощности	Сложность реализации в микромасштабе

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Проведённый сравнительный анализ позволяет сделать выводы, представленные ниже.

1. Технологическое разнообразие: существует несколько конкурирующих подходов к созданию микротурбин — от планарных конструкций (MIT) до систем на органическом цикле Ренкина (DLR), что свидетельствует о поиске оптимальных решений для микромасштаба.

2. Общие технологические вызовы: независимо от подхода, ключевыми проблемами остаются:

- обеспечение стабильности при сверхвысоких оборотах (более 500 тыс. об/мин);
- управление микросгоранием и минимизация тепловых потерь;
- интеграция высокоскоростных генераторов и газовых подшипников;
- снижение КПД при частичных нагрузках и в переменных условиях.

3. Потенциал для прорыва: наибольшая эффективность (до 93%) демонстрируется в системах с высокоскоростными генераторами (Celeroton), что указывает на важность совершенствования электромеханических компонентов.

4. Отсутствие коммерциализации: несмотря на рабочие прототипы и высокую удельную энергоёмкость (в 10–20 раз выше литий-ионных аккумуляторов), ни одна из разработок не вышла на стадию серийного производства, что подчёркивает наличие не только технических, но и экономических барьеров.

Перспективы для России: Учёт международного опыта, фокус на миниатюризацию (роторы менее 10 мм), применение аддитивных технологий и новых материалов (карбид кремния, нитрид кремния) могут стать основой для создания конкурентоспособных отечественных микротурбинных систем. Особое внимание следует уделить модульности и гибридным решениям, которые позволяют компенсировать недостатки отдельных микротурбин.

Говоря о методах печати, стоит отметить ключевые современные исследования в области многосопельной электрогидродинамической струйной печати в МЭМС, сосредоточенные на повышении пропускной способности Adrija Biswas и Shibendu Shekhar Roy [30]. В работе демонстрируется возможность прямой печати высокопроводящих микродорожек из коллоидных растворов наночастиц серебра и меди, используя многосопельные головки с индивидуальными кольцевыми заземляющими электродами для подавления межсопельного влияния (cross-talk). Однако сохраняющимися проблемами являются низкая скорость изготовления по сравнению с традиционными методами, необходимость ручной сборки некоторых МЭМС-устройств и сложность обеспечения стабильности всех струй в многоканальной системе, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации как конструкции печатающей головки, так и параметров процесса для промышленного внедрения.

Проведенный анализ современных исследований в области микроэлектромеханических систем (MEMS) и микротурбинных технологий позволяет сделать следующие выводы:

Технологический прорыв в области микротурбинных систем доказан успешными разработками прототипов мощностью до 50 Вт с габаритами порядка 1 см, что подтверждает возможность создания компактных источников энергии.

Основные преимущества микротурбинных систем состоят в высокой энергоёмкости по сравнению с аккумуляторами; компактности; независимости от температурных условий, масштабируемости и универсальности применения.

Ограничения в технологии, такие как сложность производства, проблемы стабилизации работы, трудности миниатюризации компонентов, не позволили за 25 лет развития достичь промышленного производства микротурбин.

Отечественное состояние: в России данная тематика развита слабо, что подтверждается ограниченным количеством исследований и разработок.

Несмотря на существующие ограничения, микротурбинные системы на основе MEMS демонстрируют значительный потенциал для развития автономных источников энергии.

Материалы и методы (Materials and methods)

Изготовление микротурбин с использованием технологии MEMS сопряжено с комплексным подходом, предполагающим тщательную оптимизацию конструкции с учетом аэродинамических, прочностных и тепловых характеристик посредством моделирования (CFD, FEA). Выбор материалов, способных выдерживать высокие нагрузки и температуры (кремний, нитрид кремния, карбид кремния, а также специализированные металлы и сплавы), является критически важным. Технология изготовления базируется на ключевых

методах *MEMS*, таких как осаждение тонких пленок (*CVD*, *PVD*), микролитография для создания точных рисунков и различные виды травления, включая глубокое реактивное ионное травление (*DRIE*), для формирования трехмерных структур. Такое производство требует специализированной инфраструктуры, включающей чистые комнаты и высокоточное оборудование для тонкопленочных процессов, литографии, травления и контроля качества. Однако реализация данного подхода сопряжена с рядом ключевых проблем, таких как минимизация трения, точная балансировка ротора, эффективное отведение тепла, сложность интеграции с другими компонентами и высокая стоимость разработки. Успешная реализация проекта требует междисциплинарного подхода и участия специалистов в области механики, электроники, материаловедения, химии и непосредственно *MEMS*-технологий.

Конструкция на рисунке 1 представляет собой плоский (планарный) газотурбинный двигатель, где все основные элементы расположены в одной плоскости. Такая компоновка обеспечивает лучший теплоотвод за счет увеличенной площади поверхности, а также снижение массы и компактность [4].

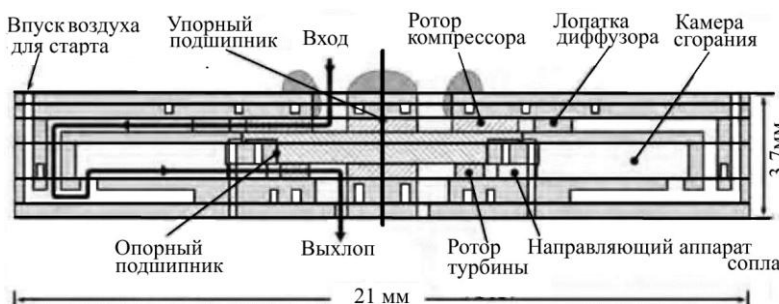


Рис. 1. Плоский газотурбинный двигатель

Fig. 1. Flat gas turbine engine

*Источник: [4] Source: [4]

1. Основные компоненты и их функции:

- 1) Вход стартового воздуха используется для первичного запуска двигателя (раскрутка ротора перед подачей топлива).
- 2) Упорный подшипник воспринимает осевые нагрузки от компрессора и турбины.
- 3) Ротор компрессора. Необходим для сжатия воздуха перед подачей в камеру сгорания.
- 4) Лопатки диффузора замедляют поток воздуха после компрессора, повышая статическое давление.
- 5) Камера сгорания. Топливо впрыскивается через микрофорсунки, а пламя распространяется вдоль плоскости. Охлаждение стенок происходит за счет воздушных каналов в плоских пластинах.
- 6) Опорный подшипник фиксирует вал ротора, предотвращая радиальные смещения.
- 7) Выхлоп. Реактивная струя создает тягу.
- 8) Ротор турбины преобразовывает энергию горячих газов в вращение вала.
- 9) Направляющие лопатки сопла формируют поток газов перед турбиной для максимального КПД.

Результат (Result)

Проведем оценочный расчет в два этапа, чтобы получить отправную точку для дальнейших исследований и экспериментов.

На первом этапе определим величину максимального потребления керосина микротурбиной с заданными параметрами. Из-за ограниченности информации о конкретной конструкции турбины, тепловых потерях и эффективности, мы будем оперировать теоретическими значениями и оценочными расчетами.

На рисунке 2 представлен разрез микрогазотурбинного генератора, объединившего газовую турбину и электрический генератор, разработанного в Массачусетском технологическом институте на основе технологии МЭМС [2]. В данном проекте предлагается 180-полюсная плоская индукционная машина, способная производить 20-40 Вт с эффективностью 80%.

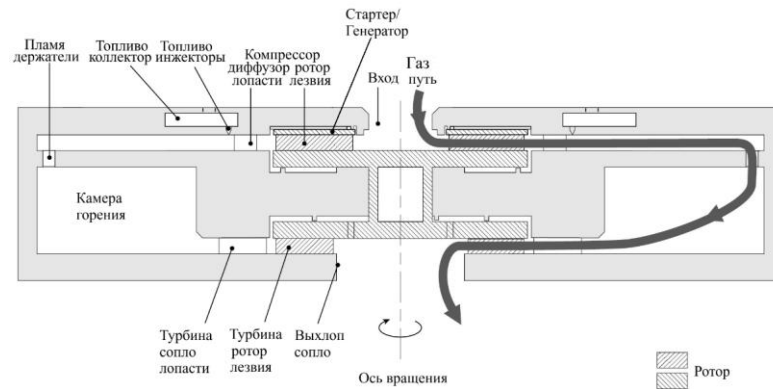


Рис. 2. Поперечное сечение микрогазотурбинного генератора Fig. 2. Cross-section of a micro-gas turbine generator

*Источник: [2] Source: [2]

Электрический модуль интегрирован в турбину, что устранило потребность в промежуточном редукторе к генератору и дополнительных системах охлаждения. Такая система повышает механическую прочность и минимизирует потери на трение, поскольку не требует дополнительных подшипников для передачи вращающего момента, а охлаждающий воздух доступен от компрессора. Встроенный генератор служит для выработки электроэнергии и дополнительно выполняет функции раскрутки турбины в момент старта.

Водород в газообразном состоянии подаётся после компрессора, где смешивается с воздухом, движущимся радиально к стабилизаторам горения. Камера сгорания направляет газ по радиусу внутрь турбины, выхлоп которой отклоняется на 90 градусов и выходит через сопло двигателя. Тонкоплёночный индукционный стартер-генератор установлен на кожухе над лопатками компрессора и охлаждается нагнетаемым воздухом. Ротор поддерживается воздушными подшипниками. Ротор полый, охлаждается воздухом и установлен на воздушных подшипниках.

Допущения и упрощения:

Предположим, что керосин сгорает полностью.

Рассматриваем идеальный цикл, игнорируя потери на трение, неполное сгорание и тепловые потери.

Используем средние значения для теплоты сгорания и плотности керосина.

Предположим разумную эффективность компрессора и турбины.

Стехиометрическое соотношение: предположим, что используется стехиометрическое соотношение воздух/топливо для достижения максимальной температуры горения.

Ограничение по температуре: предположим максимальную рабочую температуру, которую могут выдержать материалы турбины.

Оценим по рисунку объем камеры сгорания (V): $230 \text{ мм}^3 = 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$

Степень сжатия (ϵ): 1:4

Используем справочные: теплота сгорания керосина (q): 43 МДж/кг;

плотность керосина (ρ): 800 кг/м³;

стехиометрическое соотношение по массе воздух/топливо (L): для керосина примерно 15:1;

удельная теплоёмкость воздуха (C_p): 1005 Дж/(кг·К)

Ограничим максимальную температура газа (T_{max}): 1200 К

Начальная температура воздуха (T_1): 298 К.

Эффективность компрессора (η_k): 0.7.

Эффективность турбины (η_t): 0.7.

Расчет:

Температура воздуха после сжатия (T_2):

$$T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{((\gamma-1)/(\gamma \cdot \eta_k))},$$

где $\gamma = 1.4$ (показатель адиабаты для воздуха)

$$T_2 = 300 \cdot 4^{((1,4-1)/(1,4 \cdot 0,7))} \approx 462 \text{ К}.$$

Допустимый нагрев в камере сгорания (ΔT):

$$\Delta T = T_{\max} - T_2 = 1200 \text{ К} - 462 \text{ К} = 738 \text{ К} .$$

Масса воздуха, проходящего через камеру сгорания ($m_{\text{в}}$):

Определим массу воздуха, проходящего через камеру сгорания, предположив, что камера сгорания "продувается" воздухом, например, 100 раз в секунду (частота "продувки" - $f = 100 \text{ Гц}$). Тогда объемный расход воздуха можно оценить как:

$$V_{\text{возд}} = V \cdot f = 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot 100 \text{ Гц} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с} .$$

Плотность воздуха при давлении после компрессора ($P_2 = P_1 \cdot \epsilon$) и температуре T_2 можно оценить с помощью уравнения состояния идеального газа:

$$P_2 = 4 \cdot 101325 \text{ Па} \approx 405300 \text{ Па} ;$$

$$\rho_{\text{возд}} = P_2 / (R \cdot T_2) = 405300 / (287 \cdot 462) \approx 3,05 \text{ кг/м}^3 ,$$

(где R - удельная газовая постоянная для воздуха).

$$m_{\text{в}} = V_{\text{возд}} \cdot \rho_{\text{возд}} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с} \cdot 3,05 \text{ кг/м}^3 \approx 7,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$$

Масса керосина ($m_{\text{к}}$):

Используя стехиометрическое соотношение:

$$m_{\text{к}} = m_{\text{в}} / L = 7,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с} / 15 \approx 4,67 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с} .$$

Объемный расход керосина ($V_{\text{к}}$):

$$V_{\text{к}} = m_{\text{к}} / \rho = 4,67 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с} / 800 \text{ кг/м}^3 \approx 5,84 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{с} \approx 0,00584 \text{ мл/с} .$$

Проверка по температуре:

Проверим, достаточно ли этой массы керосина для нагрева воздуха на ΔT :

Выделяемая тепловая мощность:

$$Q = m_{\text{к}} \cdot Q = 4,67 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с} \cdot 43 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} \approx 200,8 \text{ Вт} .$$

Тепловая мощность, поглощаемая воздухом:

$$Q_{\text{возд}} = m_{\text{в}} \cdot C_p \cdot \Delta T = 7 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с} \cdot 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \cdot 735 \text{ К} \approx 51,8 \text{ Вт} .$$

Получается, что теоретически, сгорания такого количества керосина будет достаточно, чтобы нагреть воздух гораздо сильнее, чем на ΔT . Это указывает на то, что либо ограничение по температуре (1200К) достигнуто, либо смесь слишком богатая. На практике, необходимо регулировать подачу топлива для поддержания желаемой температуры.

На втором этапе расчета определим максимальную мощность микрогенератора, соосного с микротурбиной опираясь на максимальный расход керосина $5,84 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ в соответствии с законами термодинамики и эффективности компонентов.

Массовый расход керосина (\dot{m}):

$$800 \text{ кг/м}^3 \cdot 5,84 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с} \approx 4,672 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с} .$$

Тепловая мощность (Q):

$$4,672 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с} \cdot 43 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} = 200,9 \text{ Вт} .$$

Оценим температуры и давления после сжатия 1:4:

Температура после сжатия (T_2):

$$T_2 = T_1 \cdot (P_2 / P_1)^{((\gamma-1)/\gamma)} = 298 \text{ К} \cdot 4^{((1,4-1)/1,4)} \approx 442,8 \text{ К} \text{ (около } 169,8^\circ\text{C)} .$$

Оценка температуры после сгорания:

Предположения: считаем, что вся теплота сгорания керосина идет на нагрев воздуха. Также пренебрегаем изменениями теплоемкости воздуха с температурой.

Определим массовый расход воздуха ($\dot{m}_{\text{возд}}$), увеличив коэффициент избытка воздуха (α), опираясь на предварительную оценку, для эффективного сгорания $\alpha \approx 20$. Это означает, что на 1 кг керосина приходится 20 кг воздуха. Тогда

$$\dot{m}_{\text{возд}} = 20 \cdot \dot{m} = 20 \cdot 4,672 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с} = 9,344 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с} .$$

Суммарный массовый расход (\dot{m}_{total}):

$$\dot{m}_{\text{total}} = \dot{m} + \dot{m}_{\text{возд}} = 4,672 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с} + 9,344 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с} = 9,8112 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с} .$$

Удельная теплоемкость воздуха $C_p \approx 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Приращение температуры (ΔT):

$$Q = \dot{m}_{\text{возд}} \cdot C_p \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta T = Q / (\dot{m}_{\text{total}} \cdot C_p) = 200,9 \text{ Вт} / (9,8112 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с} \cdot 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}) \approx 2034 \text{ К} .$$

Температура после сгорания (T_3):

$$T_3 = T_2 + \Delta T = 442,8 \text{ К} + 2034 \text{ К} \approx 2476,8 \text{ К (около } 2200 \text{ }^\circ\text{C)} .$$

Температура после сгорания (T_3) получается очень высокой. На практике, она будет ниже из-за тепловых потерь и неполного сгорания. Этот расчет дает лишь верхнюю оценку. В реальности потребуется более детальное моделирование процесса горения.

Оценим мощность турбины ($P_{\text{турб}}$), работающей по идеальному циклу Брайтона. В идеальном цикле Брайтона мощность можно оценить как: $P_{\text{турб}} = \dot{m}_{\text{total}} \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4)$, где T_4 - температура на выходе турбины.

Значение T_4 можно оценить, зная степень расширения в турбине (которая примерно равна степени сжатия в компрессоре, если давление на выходе равно атмосферному) и эффективность турбины ($\eta_{\text{турб}}$). Предположим:

$$\eta_{\text{турб}} = 0,8 \cdot (80\%) : T_4 = T_3 / ((P_3 / P_4)^{(\gamma-1)/\gamma} \cdot \eta_{\text{турб}}) = 2476,8 / (4^{(1,4-1)/1,4} \cdot 0,8) \approx 1044 \text{ К} .$$

Мощность турбины:

$$P_{\text{турб}} = 9,8112 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с} \cdot 1005 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{К)} \cdot (2476,8 \text{ К} - 1044 \text{ К}) \approx 141,2 \text{ Вт} .$$

Оценка мощности, потребляемой компрессором ($P_{\text{компр}}$):

Идеальный цикл:

$$P_{\text{компр}} = \dot{m}_{\text{возд}} \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) = 9,344 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с} \cdot 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \cdot (442,8 \text{ К} - 298 \text{ К}) \approx 13,6 \text{ Вт} .$$

Тогда полезная мощность ($P_{\text{п}}$):

$$P_{\text{п}} = P_{\text{турб}} - P_{\text{компр}} = 141,2 \text{ Вт} - 13,6 \text{ Вт} \approx 127,6 \text{ Вт} .$$

Оценим мощность генератора ($P_{\text{Г}}$), если КПД генератора примем $\eta_{\text{Г}} \approx 0,8$ (80%).

Мощность генератора:

$$P_{\text{Г}} = P_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{Г}} = 127,6 \text{ Вт} \cdot 0,8 \approx 102,1 \text{ Вт} .$$

Результат:

При расходе керосина $5,84 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$, оценочная мощность микрогенератора составит приблизительно 102,1 Вт.

Важные замечания и факторы, влияющие на результат:

Эффективность турбины, компрессора и генератора оказывают огромное влияние на конечный результат. В реальности они могут быть ниже, особенно для микромасштабных устройств.

Потери: в расчете не учтены тепловые потери, потери на трение и другие факторы, которые снижают эффективность.

Коэффициент избытка воздуха (α): выбор α сильно влияет на температуру после сгорания и, следовательно, на мощность.

Этот расчет является оценочным. Для более точного определения потребуется детальное моделирование термодинамического цикла с учетом всех потерь и характеристик компонентов.

Изготовление микротурбин с использованием технологии MEMS сопряжено с комплексным подходом, предполагающим тщательную оптимизацию конструкции с учетом аэродинамических, прочностных и тепловых характеристик посредством моделирования (CFD, FEA).

Важным физическим ограничением при масштабировании микротурбин является закон куба-квадрата, согласно которому: при уменьшении размеров устройства площадь поверхности уменьшается пропорционально квадрату линейных размеров, а объем и масса уменьшаются пропорционально кубу линейных размеров. Это приводит к изменению соотношения теплоотвода и мощности.

В применении к микротурбинам это означает, что малые размеры обеспечивают лучшее соотношение площади теплообмена к объему. Модульный подход позволит компенсировать снижение КПД отдельных микротурбин за счет объединения их в блоки

Объединение множества микротурбин в единый блок может обеспечить суммарную мощность, превышающую мощность единого двигателя того же веса в 10 и более раз [31].

Выбор материалов, способных выдерживать высокие нагрузки и температуры (кремний, нитрид кремния, карбид кремния, а также специализированные металлы и сплавы), является критически важным. Технология изготовления базируется на ключевых методах MEMS, таких как осаждение тонких пленок (CVD, PVD), микролитография для создания точных рисунков и различные виды травления, включая глубокое реактивное ионное травление (DRIE), для формирования трехмерных структур.

За 25 лет развития технологии микротурбин не удалось достичь промышленного производства, несмотря на создание работоспособных прототипов, что указывает на значительные технические и экономические барьеры в масштабировании технологии. Это подчеркивает необходимость дальнейших исследований в области оптимизации процессов производства и эксплуатации микротурбинных систем.

В отличие от существующих работ, ограничивающихся описанием прототипов, в настоящей статье выполнен последовательный оценочный расчёт микрогазотурбинного генератора на основе цикла Брайтона с заданным расходом топлива, что позволяет количественно связать геометрию камеры сгорания, допуски по температуре и выходную электрическую мощность.

Обсуждение (Discussions)

Согласно проведенному нами обзору прототипов, концепция тепловых двигателей высокой удельной мощности на основе MEMS является осуществимой. Более того, такие устройства являются критически важными для конкурентоспособности и прогресса во многих сферах.

Микрогазотурбинный генератор может служить основой распределенной генерации электроэнергии, осуществлять электроснабжение удаленных объектов, выполнять роль аварийных и резервных систем, усиливать независимость потребителей от техногенных катастроф и социально-экономических обстоятельств.

Малое отношение веса к мощности, характерное для микротурбин в принципе может послужить основой целого направления в беспилотных и пилотируемых летательных аппаратах. Возможные применения не ограничены созданием питательного элемента для БПЛА с 10-кратно большим ресурсом. Также возможно и создание квадрокоптерных аэромобилей, с дальностью полета на одной заправке в сотни километров, и возможностью заправляться на обычных АЗС за минуты, продвинутых экзоскелетов и другое.

Масштабируемость технологии является ключевым преимуществом микротурбинных систем. Согласно закону куба-квадрата, объединение множества микротурбин в единый блок позволяет достичь значительно более высокой удельной мощности по сравнению с одним крупным двигателем при той же общей массе. Модульный принцип построения энергетических установок на базе микротурбин открывает новые возможности для создания гибких и масштабируемых систем энергоснабжения различного назначения.

Очевидно, что разработчики микротурбин за рубежом, и институты, которые их финансировали, также прекрасно понимали, что у данной технологии есть огромные перспективы, тем не менее ни в США, ни в других странах дальше научных прототипов дело не пошло. Были созданы экспериментальные образцы, но данных по коммерческому успеху этих разработок не обнаружено.

Как нам видится причина данной ситуации состоит в высокой стоимости процесса НИОКР. Разработка микрогазотурбинного генератора является сложной задачей, затрагивающей MEMS-технологии, машиностроение, электронику и другие смежные области. MEMS-технологии в целом отличаются высокой стоимостью и сложностью, требуя чистых производственных помещений и значительных затрат. Однако этот процесс можно значительно удешевить с помощью электрохимического аддитивного производства, основанного на принципах электролиза, где осаждение ионов металла из электролита позволяет формировать металлический слой на подложке. В рамках обсуждения технологий изготовления микротурбинных МЭМС-устройств целесообразно дополнительно отметить роль современных аддитивных методов, в частности, 3D-печати керамикой. Этот подход позволяет изготавливать сложные высокотемпературные компоненты (такие как камеры сгорания, лопатки турбин) из термостойких материалов (например, карбида кремния) с высокой точностью и минимальными отходами. Использование керамической аддитивной печати на ранних стадиях НИОКР существенно снижает стоимость и время создания прототипов по сравнению с традиционными методами микромеханообработки [32, 33]. Этот метод, в сочетании с ЧПУ-приводами или на базе механики FDM 3D-принтера, позволяет осаждать металл при комнатной температуре, избегая температурных напряжений и достигая субмикронного разрешения с меньшими энергозатратами. Это обеспечивает возможность трехмерной печати металлом с высокой точностью, позволяя создавать даже МЭМС-структуры [34].

Получается, что потенциально, этап разработки можно существенно удешевить, если изготавливать конструкции методами 3D печати, а уже на этапе массового производства использовать стандартные кремниевые технологии, подходящие для массового производства. Таким образом возможно, что мы увидим ренессанс данного направления на

новой технологической базе. Более того, данное направление может привести к появлению “Новой Кремниевой Долины”, которая по аналогии с процессорами будет производить миниатюрные тепловые машины, для огромного количества различных объектов, особенно для летательных аппаратов и портативных устройств, где важна высокая удельная плотность энергии и мощности.

Проведенный в рамках настоящей работы оценочный расчет микрогазотурбинного генератора с расходом топлива $\sim 5,84 \cdot 10^{-9}$ м³/с показал потенциальную электрическую мощность порядка 100 Вт. Этот результат необходимо интерпретировать в контексте ранее рассмотренных в обзоре литературных данных, что позволяет оценить его реалистичность, выявить возможные причины расхождений и определить перспективные направления оптимизации.

1. Согласованность с известными прототипами. Полученная оценка в 100 Вт находится в верхней части диапазона мощностей, продемонстрированных наиболее успешными прототипами. Например, она согласуется с заявленным потенциалом микротурбины MIT на углеводородном топливе (до 100 Вт, Capata et al., 2014) и значительно превышает мощность ранних прототипов MIT на водороде (10–20 Вт) или осевой микротурбины Peirs et al. (16 Вт). Это расхождение может быть объяснено рядом допущений, принятых в расчете (идеальный цикл, пренебрежение потерями, высокая оценка эффективности компонентов), что указывает на теоретический верхний предел мощности для системы подобного масштаба. В реальных условиях, как показывают работы Hampel & Braun (2022), существенное влияние оказывают потери при частичных нагрузках и переменных условиях эксплуатации, что может снизить эффективную мощность.

2. Анализ ключевых допущений и их влияния на результат.

КПД компонентов. В расчете использованы значения КПД компрессора и турбины ($\eta \approx 0,7$), характерные для модельных оценок. Однако, как отмечают Dessornes et al. (2005) и Capata et al. (2015), на микромасштабе КПД компрессора может значительно падать из-за низких чисел Рейнольдса и вязкостных потерь, часто не превышая 50–60%. Использование более консервативных оценок КПД (например, 0,5–0,6) привело бы к снижению расчетной мощности на 20–30%, что лучше согласовалось бы с экспериментальными данными по прототипам (10–50 Вт).

Температурные ограничения. Принятое ограничение температуры газа в 1200 К основано на возможностях современных термостойких материалов (SiC, Si₃N₄). Работа Kosowski & Piwowarski (2020) показывает, что для замкнутых циклов возможно повышение температуры перед турбиной до 850–900°C (1123–1173 К) без катастрофического снижения ресурса. Наш расчет, дающий очень высокую температуру после сгорания (T_3), указывает на необходимость строгого контроля состава смеси (коэффициента избытка воздуха α) и/или применения эффективного внутреннего охлаждения, что является одной из основных технологических проблем, отмеченных в работах по микрокамерам сгорания.

Коэффициент избытка воздуха. Выбранное значение $\alpha \approx 20$ является компромиссом между обеспечением полноты сгорания и минимизацией потерь на нагрев избыточного воздуха. В реальных микрокамерах сгорания, как показано в исследованиях Chen (2022) и Adamou et al. (2023), достижение стабильного горения при столь бедных смесях является нетривиальной задачей из-за короткого времени пребывания и высоких теплопотерь. Фактическое значение α может быть ниже, что приведет к более высокой температуре газов, но также и к риску неполного сгорания и повышенному тепловому напряжению элементов.

3. Интерпретация в контексте технологических барьеров:

Расчетная потребность в скорости вращения для достижения такой мощности (косвенно вытекающая из степени сжатия и термодинамики цикла Брайтона) логично соотносится с необходимостью работы в диапазоне сотен тысяч оборотов в минуту. Это полностью согласуется с выводами большинства рассмотренных исследований (MIT, Peirs, Dessornes), где ключевым вызовом названа стабильность работы при сверхвысоких оборотах. Полученный результат подкрепляет вывод о том, что успешная реализация микротурбины мощностью ~ 100 Вт невозможна без преодоления проблем, связанных с газовыми или гибридными подшипниками, балансировкой ротора и динамикой высокоскоростных узлов.

Оцененный расход топлива и соответствующая ему тепловая мощность (~ 250 Вт) подтверждают высокую энергоемкость микротурбинного подхода. Даже с учетом реалистичных потерь, удельная энергоемкость такой системы будет многократно (в 10–20 раз, как отмечено в заключении) превышать показатели литий-ионных аккумуляторов. Это согласуется с выводами Matsuo et al. (2003) и Schubert (2012), что является

фундаментальным преимуществом, оправдывающим продолжение исследований, несмотря на сложности.

4. Сравнение с альтернативными подходами и модульной концепцией:

Сравнение расчетного КПД цикла (косвенно) с КПД систем на органическом цикле Ренкина (ORC), таких как у Schubert (2012) (10–11%), показывает, что прямоточный цикл Брайтона в теории способен обеспечить более высокую удельную мощность, но, вероятно, проигрывает в стабильности работы при переменных нагрузках, что критично для БПЛА. Это указывает на перспективность гибридных решений, где микротурбина работает в номинальном режиме, а аккумулятор или суперконденсатор сглаживает пики нагрузки.

Полученная мощность в ~100 Вт для одного модуля хорошо вписывается в логику модульного подхода, обоснованного законом «куба-квадрата». Как следует из работ MIT и анализа масштабирования, объединение таких модулей в батареи является наиболее реалистичным путем достижения мощности в киловаттный диапазон при сохранении массогабаритных преимуществ для применения в БПЛА. Наш расчет, таким образом, задает целевой параметр для отработки базового модуля, последующая кластеризация которого позволит гибко набирать требуемую суммарную мощность.

Проведенный оценочный расчет, будучи теоретическим и основанным на ряде упрощений, тем не менее, дает ценную количественную оценку, которая находится в качественном согласии с мировым опытом разработки микротурбин. Он подтверждает принципиальную возможность создания компактного источника питания мощностью порядка 100 Вт, но также четко высвечивает ключевые технологические барьеры (высокооборотные подшипники, эффективное микросгорание, тепловые режимы), преодоление которых необходимо для практической реализации. Расхождение с экспериментальными данными по существующим прототипам (обычно 10–50 Вт) объясняется оптимистичными допущениями модели и указывает на направления для ее уточнения: учет реальных аэродинамических потерь на микромасштабе, неидеальности горения и ограничений по теплоотводу. Данные результаты служат обоснованной основой для постановки дальнейших прикладных исследований, сфокусированных на решении этих конкретных инженерных задач.

Несмотря на активное развитие микротурбинных технологий за рубежом, как говорилось ранее, в России данное направление остается на стадии формирования научно-технического задела. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы относительно текущего состояния и необходимых шагов для реализации подобных проектов в РФ.

В области МЭМС-технологий в России имеется ряд компетенций, сосредоточенных в академических институтах (ИФП им. Ржанова СО РАН, ИФТТ РАН, МИЭТ) и на профильных кафедрах ведущих технических вузов (МИФИ, МГТУ им. Баумана, КГЭУ). Разрабатываются сенсоры, актюаторы, микрожидкостные системы, а также ведутся исследования в области материалов для высокотемпературных применений (карбид кремния, нитрид кремния). Однако специализированных исследований и прототипов именно в области микротурбинных МЭМС-генераторов в открытых источниках практически не представлено. Это указывает на наличие значительного пробела в прикладных разработках на стыке микротехнологий, газовой динамики и энергетики.

Производственная база для МЭМС в России ограничена и в основном ориентирована на единичные заказы или мелкосерийное производство в рамках исследовательских проектов. Ключевыми ограничениями являются такие факторы, как отсутствие специализированных линий для массового производства многослойных кремниевых или керамических микротурбин, дефицит оборудования для глубокого реактивно-ионного травления (DRIE) с необходимым для микротурбин соотношением сторон и точностью и ограниченный опыт в области высокоскоростных газовых подшипников и их тестирования на частотах свыше 500 тыс. об/мин.

Для создания конкурентоспособного микротурбинного МЭМС-генератора в России потребуется консолидация усилий и ресурсов по следующим направлениям: кадровые ресурсы, материально-техническая база и финансирование.

Даже при условии достаточного финансирования и концентрации усилий, создание работоспособного лабораторного образца микротурбинного МЭМС-генератора мощностью порядка 100 Вт может занять достаточно продолжительное время, не говоря о выходе на стадию опытных образцов для тестирования на реальных платформах.

Несмотря на отставание в области микротурбинных МЭМС, Россия обладает необходимым научным потенциалом и частичной технологической базой для запуска собственных разработок. Ключевыми факторами успеха станут концентрация ресурсов,

междисциплинарное взаимодействие и этапный подход с активным использованием современных методов цифрового проектирования и аддитивного прототипирования. Реализация подобного проекта не только укрепит технологический суверенитет в области автономной энергетики, но и создаст задел для нового поколения компактных высокоэнергетических источников питания широкого назначения.

В рамках дальнейших исследований планируется детальный анализ модульных и гибридных конструкций микротурбинных систем, позволяющих варьировать соотношение размеров турбины и генератора, а также интегрировать редукторные передачи для оптимизации рабочих характеристик. Такой подход может обеспечить более гибкую адаптацию системы под конкретные требования по мощности, частоте вращения и массогабаритным показателям. Например, использование микроредуктора между турбиной и генератором позволит снизить скорость вращения ротора генератора, что упростит его конструкцию и повысит надёжность, одновременно сохраняя высокие обороты турбины для обеспечения эффективного термодинамического цикла. Предлагаемая схема применения электрохимического аддитивного производства и 3D-печати металлом/керамикой в качестве промежуточного этапа между концептуальным проектированием и кремниевой технологией формирует новый подход к снижению стоимости НИОКР микротурбин, который ранее не был подробно рассмотрен в отечественной литературе. Детальный анализ данных конфигураций выходит за рамки данной работы и будет представлен в последующих публикациях.

Заключение (Conclusions)

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие ключевые выводы:

1. Проведенный анализ экспериментальных и расчетных данных по существующим прототипам микрогазотурбин (MIT, PowerMEMS, Peirs, Capata и др.) показал, что реально достигнутый диапазон электрической мощности одиночных микротурбинных модулей сегодня составляет примерно 10–50 Вт при КПД 10–20% и скоростях вращения до 10^5 – 10^6 об/мин.

2. Оценочный термодинамический расчет для микрогазотурбинного генератора с максимальным расходом керосина $5,84 \cdot 10^{-9}$ м³/с подтвердил принципиальную достижимость электрической мощности порядка 100 Вт при диаметре ротора около 1 см, что согласуется с целевыми параметрами проектов MIT и PowerMEMS и задает ориентир по верхней границе мощности одного МЭМС-модуля.

3. Наиболее перспективной с точки зрения сочетания удельной мощности, термостойкости и совместимости с МЭМС-технологиями является конструкция плоского (планарного) газотурбинного двигателя по циклу Брайтона с интегрированным тонкопленочным индукционным генератором, газовыми подшипниками и радиальным компрессором, реализованная в проектах MIT и PowerMEMS и принятая в работе в качестве базовой конфигурации для дальнейших расчетов.

4. В качестве материалов для ротора и горячих элементов целесообразно считать приоритетными карбид кремния (SiC) и нитрид кремния (Si₃N₄), обеспечивающие работу при температурах до 1000–1200 °С и скоростях вращения до 10^5 – 10^6 об/мин; при этом кремний и металлы могут использоваться в холодных ступенях и вспомогательных элементах, что прямо следует из обзора реализованных микротурбин и требований к прочности при сверхвысоких оборотах.

5. Анализ влияния масштабирования по закону «квадрат–куб» показал, что наиболее рациональной стратегией повышения суммарной мощности является модульный подход: объединение большого числа микротурбин мощностью 10–100 Вт в единый блок позволяет, при той же массе, получить суммарную мощность, многократно (в потенциально 10 и более раз) превосходящую мощность одиночного макродвигателя, что делает модульные микротурбинные батареи особенно перспективными для БПЛА.

6. Наиболее перспективными направлениями конструктивного развития признаны:

- применение газовых или гибридных газо–фольговых подшипников для обеспечения ресурса при частотах до 10^6 об/мин;

- оптимизация профиля микролопаток с учетом низких чисел Рейнольдса и зазоров порядка 4–10 мкм;

- использование регенеративных теплообменников (по результатам работ Kosowski и др.) для повышения КПД микротурбин малой мощности до 30–35% в замкнутых циклах.

7. С точки зрения технологий изготовления, наиболее перспективной комбинацией для этапа НИОКР является связка аддитивных методов (3D-печать металла и керамики, электрохимическое осаждение) и последующей доработки методами DRIE и

тонкопленочных процессов; такой подход позволяет радикально снизить стоимость первых прототипов по сравнению с немедленным переходом к полноформатным кремниевым технологиям, сохраняя возможность дальнейшей миграции в стандартный МЭМС-процесс.

8. Для практических применений в БПЛА и других автономных системах наибольший потенциал имеют:

- микротурбинные МЭМС-генераторы 50–100 Вт как «первичные» источники с удельной энергоемкостью в 10–20 раз выше Li-ion;

- гибридные системы «микротурбина + аккумулятор/конденсатор», где микротурбина обеспечивает базовую мощность и подзаряд, а аккумулятор — покрытие пиковых нагрузок и быстрый отклик

9. Проведенный анализ причин отсутствия коммерциализации (высокая стоимость НИОКР, сложность интеграции, проблемы микро-горения и подшипников) показывает, что ключевой резерв для снижения барьеров — удешевление прототипирования за счет аддитивного производства и создание специализированных «центров компетенций» по микротурбинным МЭМС, что особенно актуально для формирования отечественной технологической базы.

10. Полученные в работе количественные оценки (диапазон 10–100 Вт на модуль, целевые скорости вращения 10^5 – 10^6 об/мин, рабочие температуры до 1000–1200 °С, требуемые КПД 10–30%) и выделенные приоритетные конструктивные решения и материалы могут использоваться как исходные ориентиры при постановке прикладных проектов по разработке отечественных микротурбинных генераторов для БПЛА и других автономных потребителей.

Дальнейшие исследования будут посвящены конкретным этапам разработки, включая выбор оптимальных технологий и материалов.

Литература

1. Stanimirović Z., Stanimirović I. Advanced MEMS Technologies //Microelectromechanical Systems (MEMS)-Innovation, Manufacturing Techniques and Applications: Innovation, Manufacturing Techniques and Applications. – 2025. – С. 7.
2. Epstein A. H. et al. Power MEMS and microengines //Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers' 97). – IEEE, 1997. – Т. 2. – С. 753-756.
3. Epstein A. et al. Micro-heat engines, gas turbines, and rocket engines-The MIT microengine project //28th Fluid dynamics conference. – 1997. – С. 1773.
4. Schubert D. Mems-concept using micro turbines for satellite power supply //Solar Power, InTech. – 2012. – С. 195-210.
5. Hampel C. A., Braun R. J. Off-design modeling of a microturbine combined heat & power system //Applied Thermal Engineering. – 2022. – Т. 202. – С. 117670.
6. Van Brussel H. et al. Assembly of microsystems //CIRP annals. – 2000. – Т. 49. – №. 2. – С. 451-472.
7. Lin P. et al. Modeling and controller design of a micro gas turbine for power generation //ISA transactions. – 2022. – Т. 124. – С. 411-426.
8. Badum L., Cukurel B. Multidisciplinary design methodology for micro-gas-turbines— Part II: System analysis and optimization //Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2024. – Т. 146. – №. 10. – С. 101002.
9. Dessornes O. et al. Three technological bricks for a micro turbine concept for micro power generation //Technical Digest of PowerMEMS 2005. – 2005. – С. 28-30.
10. Peirs J. et al. Micro power generation based on micro gas turbines: a challenge //MST NEWS. – 2005. – Т. 4. – С. 37.
11. Stefani F. et al. Comparative analysis of bearings for micro-GT: an innovative arrangement //Bearing Technology. – 2017. – С. 1-26.
12. Peirs J., Reynaerts D., Verplaetsen F. Development of an axial microturbine for a portable gas turbine generator //Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2003. – Т. 13. – №. 4. – С. S190.
13. Dessornes O., Zwysig C. Micro-generator for ultra micro gas turbine //Power MEMS. – 2010. – С. 1-3.
14. Петров Т. И. Реализация оптимизации синхронного двигателя на основе генетического алгоритма в MATLAB / Т. И. Петров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 102-109.
15. Петров Т. И. Особенности проектирования синхронных двигателей с постоянными магнитами при помощи комплексной топологической оптимизации / Т. И.

Петров, А. Р. Сафин, Р. К. Behera // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 1(57).

16. Сафин А. Р. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин / А. Р. Сафин, Р. К. Behera // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 14-33. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33.

17. Capata R., Marino L., Sciubba E. A hybrid propulsion system for a high-endurance UAV: Configuration selection, aerodynamic study, and gas turbine bench tests //Journal of Unmanned Vehicle Systems. – 2014. – Т. 2. – №. 1. – С. 16-35.

18. Shah R. et al. Design and performance analysis of hydrogen-fueled micro combustion chamber with focus on back pressure minimization. – 2024.

19. Chen J. The importance of cavities to the stabilization of methane flames in micro-structured combustion systems. – 2022.

20. Adamou A. et al. Experimental performance and emissions of additively manufactured high-temperature combustion chambers for micro-gas turbines //International Journal of Engine Research. – 2023. – Т. 24. – №. 4. – С. 1273-1289.

21. Capata R. et al. Experimental tests of the operating conditions of a micro gas turbine device //Journal of Energy and Power Engineering. – 2015. – Т. 9. – №. 4. – С. 326-335.

22. Badum L., Leizeronok B., Cukurel B. New Insights From Conceptual Design of an Additive Manufactured 300 W Microgas Turbine Toward Unmanned Aerial Vehicle Applications //Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2021. – Т. 143. – №. 2. – С. 021006.

23. Omri M. et al. Analysis of Flow Structure in Microturbine Operating at Low Reynolds Number //Computers, Materials & Continua. – 2022. – Т. 71. – №. 1.

24. Matsuo E. et al. Towards the development of finger-top gas turbines //Power (W). – 2003. – Т. 50. – С. 50.

25. Kosowski K., Piwowarski M. Design Analysis of Micro Gas Turbines in Closed Cycles //Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 21. – С. 5790.

26. Lakshmy D. S. M. Design and analysis of turbine blades in a micro gas turbine engine [J] //International Journal for Trends in Engineering and Technology. – 2015. – Т. 5. – №. 2.

27. Capata R., Saracchini M. Experimental campaign tests on ultra micro gas turbines, fuel supply comparison and optimization //Energies. – 2018. – Т. 11. – №. 4. – С. 799.

28. Семенников А. В. Инновации в микроэлектромеханических системах (MEMS) / А. В. Семенников // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 5, № 8(147). – С. 84-96. – DOI 10.36871/ek.up.p.r.2024.08.05.010.

29. Li J., Liu Z., Ye R. Current status and prospects of gas turbine technology application //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2108. – №. 1. – С. 012009.

30. Biswas A., Roy S. S. A review on multi nozzle electrohydrodynamic inkjet printing system for MEMS applications //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1136. – №. 1. – С. 012015.

31. Закон квадрата — куба [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_квadrата_—_куба (дата обращения: 27.11.2025).

32. Payne J. E. Microfabrication of SiC Using Femtosecond Lasers. – 2025.

33. Jaiswal A. et al. Two decades of two-photon lithography: Materials science perspective for additive manufacturing of 2D/3D nano-microstructures //Science. – 2023. – Т. 26. – №. 4.

34. Реальна ли 3D-печать металлом на дому? // Хабр URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/944702/> (дата обращения: 07.09.2025).

Авторы публикации

Галиулина Алина Радиевна – студентка Казанского государственного энергетического университета. ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0003-4795-3503>, Email: galiulinaa8@gmail.com.

Денисов Алексей Игоревич – Ph.D., Ведущий исследователь ООО «Шайдэн». Email: real.agggro@gmail.com.

Денисова Наталья Вячеславовна – к.ф.-м.н., доцент кафедры «Электроснабжения промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Email: natali.denisova@bk.ru.

Ившин Игорь Владимирович – проректор по науке и коммерциализации, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжения промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Email: ivshini@mail.ru.

References

1. Stanimirović Z., Stanimirović I. Advanced MEMS Technologies //Microelectromechanical Systems (MEMS)-Innovation, Manufacturing Techniques and Applications: Innovation, Manufacturing Techniques and Applications. – 2025. – P. 7.
2. Epstein A. H. et al. Power MEMS and microengines //Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers' 97). – IEEE, 1997. – T. 2. – P. 753-756.
3. Epstein A. et al. Micro-heat engines, gas turbines, and rocket engines-The MIT microengine project //28th Fluid dynamics conference. – 1997. – P. 1773.
4. Schubert D. Mems-concept using micro turbines for satellite power supply //Solar Power, InTech. – 2012. – P. 195-210.
5. Hampel C. A., Braun R. J. Off-design modeling of a microturbine combined heat & power system //Applied Thermal Engineering. – 2022. – T. 202. – P. 117670.
6. Van Brussel H. et al. Assembly of microsystems //CIRP annals. – 2000. – T. 49. – No. 2. – pp. 451-472.
7. Lin P. et al. Modeling and controller design of a micro gas turbine for power generation //ISA transactions. – 2022. – T. 124. – p. 411-426.
8. Badum L., Cukurel B. Multidisciplinary design methodology for micro-gas-turbines— Part II: System analysis and optimization //Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2024. – T. 146. – №. 10. – p. 101002.
9. Dessornes O. et al. Three technological bricks for a micro turbine concept for micro power generation //Technical Digest of PowerMEMS 2005. – 2005. – p. 28-30.
10. Peirs J. et al. Micro power generation based on micro gas turbines: a challenge //MST NEWS. – 2005. – T. 4. – p. 37.
11. Stefani F. et al. Comparative analysis of bearings for micro-GT: an innovative arrangement //Bearing Technology. – 2017. – p. 1-26.
12. Peirs J., Reynaerts D., Verplaetsen F. Development of an axial microturbine for a portable gas turbine generator //Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2003. – T. 13. – №. 4. – p. S190.
13. Dessornes O., Zwysig C. Micro-generator for ultra micro gas turbine //Power MEMS. – 2010. – p. 1-3.
14. Petrov T. I. Features of designing synchronous motors with permanent magnets using complex topology optimization / T. I. Petrov, A. R. Safin, R. K. Behera // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. - 2023. - Vol. 15, No. 1 (57). - Pp. 58-67. - EDN KKTGUR.
15. Petrov T. I. Implementation of synchronous motor optimization based on a genetic algorithm in MATLAB / T. I. Petrov // News of higher educational institutions. Problems of power engineering. - 2025. - Vol. 27, No. 3. - Pp. 102-109. - DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-3-102-109. - EDN HTZVKI.
16. Safin A. R. Additive manufacturing and topology optimization of magnetic materials for electrical machines / A. R. Safin, R. K. Behera // News of higher educational institutions. Problems of energy. - 2021. - Vol. 23, No. 3. - Pp. 14-33. - DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33. - EDN QYWQTR.
17. Capata R., Marino L., Sciubba E. A hybrid propulsion system for a high-endurance UAV: Configuration selection, aerodynamic study, and gas turbine bench tests //Journal of Unmanned Vehicle Systems. – 2014. – T. 2. – №. 1. – p. 16-35.
18. Shah R. et al. Design and performance analysis of hydrogen-fueled micro combustion chamber with focus on back pressure minimization. – 2024.
19. Chen J. The importance of cavities to the stabilization of methane flames in micro-structured combustion systems. – 2022.
20. Adamou A. et al. Experimental performance and emissions of additively manufactured high-temperature combustion chambers for micro-gas turbines //International Journal of Engine Research. – 2023. – T. 24. – №. 4. – p. 1273-1289.
21. Capata R. et al. Experimental tests of the operating conditions of a micro gas turbine device //Journal of Energy and Power Engineering. – 2015. – T. 9. – №. 4. – p. 326-335.
22. Badum L., Leizeronok B., Cukurel B. New Insights From Conceptual Design of an Additive Manufactured 300 W Microgas Turbine Toward Unmanned Aerial Vehicle Applications //Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2021. – T. 143. – №. 2. – P. 021006.

23. Omri M. et al. Analysis of Flow Structure in Microturbine Operating at Low Reynolds Number //Computers, Materials & Continua. – 2022. – Т. 71. – №. 1.
24. Matsuo E. et al. Towards the development of finger-top gas turbines //Power (W). – 2003. – Т. 50. – P. 50.
25. Kosowski K., Piwowarski M. Design Analysis of Micro Gas Turbines in Closed Cycles //Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 21. – P. 5790.
26. Lakshmy D. S. M. Design and analysis of turbine blades in a micro gas turbine engine [J] //Internation Journal for Trends in Engineering and Technology. – 2015. – Т. 5. – №. 2.
27. Capata R., Saracchini M. Experimental campaign tests on ultra micro gas turbines, fuel supply comparison and optimization //Energies. – 2018. – Т. 11. – №. 4. – P. 799.
28. Semennikov A. V. Innovations in microelectromechanical systems (MEMS) / A. V. Semennikov // Economics and Management: Problems, Solutions. - 2024. - Vol. 5, No. 8 (147). - P. 84-96. - DOI 10.36871/ek.up.p.r.2024.08.05.010.
29. Li J., Liu Z., Ye R. Current status and prospects of gas turbine technology application //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2108. – №. 1. – P. 012009.
30. Biswas A., Roy S. S. A review on multi nozzle electrohydrodynamic inkjet printing system for MEMS applications //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1136. – №. 1. – P. 012015.
31. The Law of the Square and the Cube [Electronic resource] // Wikipedia. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/The_Law_of_the_Square_—_and_the_Cube (accessed: 27.11.2025).
32. Payne J. E. Microfabrication of SiC Using Femtosecond Lasers. – 2025.
33. Jaiswal A. et al. Two decades of two-photon lithography: Materials science perspective for additive manufacturing of 2D/3D nano-microstructures //Iscience. – 2023. – Т. 26. – №. 4.
34. Реальна ли 3D-печать металлом на дому? // Хабр URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/944702/> (дата обращения: 07.09.2025).

Alina R. Galiulina – Kazan State Power Engineering University.

Alexey I. Denisov LLC «Shaiden».

Natalia V. Denisova – Kazan State Power Engineering University.

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Получено **06.11.2025 г.**

Отредактировано **17.01.2026 г.**

Принято **28.01.2026 г.**