

Соколов Олег Аркадьевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Новак Александр Александрович

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Термоэлектрогенерация, как возможный путь повышения экономической эффективности авиапредприятий

Аннотация. В статье рассматривается перспектива применения термоэлектрогенерации в авиации как способа повышения экономической эффективности гражданских воздушных судов и беспилотных летательных аппаратов. Анализируются особенности конструкции термоэлектрогенераторов, принципы их работы, их преимущества и недостатки и основные технологические ограничения. Проводится финансовый анализ, демонстрирующий положительные экономические эффекты внедрения термоэлектрогенерации, включая сокращение расхода топлива и снижение эксплуатационных расходов. Приводятся расчёты сроков окупаемости и перспективы широкого применения термоэлектрогенерации в ближайшем будущем. Кроме того, оценивается экологический вклад термоэлектрогенерации в снижении вредных выбросов авиационной техники, подчёркивается её роль в достижении целей устойчивого развития. Отмечается необходимость междисциплинарного сотрудничества инженеров, учёных и экономистов для комплексного изучения и эффективного внедрения термоэлектрогенерации в современную авиационную индустрию.

Ключевые слова: авиация, термоэлектрогенератор, экономика, БПЛА, воздушное судно, пульсирующий воздушно-реактивный двигатель, альтернативная генерация электроэнергии, генератор.

Sokolov Oleg Arkadievich

Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

Novak Alexander Aleksandrovich

Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

Thermoelectric generation as a possible way to increase the economic efficiency of aviation enterprises

Abstract. The article explores the potential of thermoelectric generation in aviation as a means to enhance economic efficiency for civil aircrafts and unmanned aerial vehicles. It analyzes the design features of thermoelectric generators, their operating principles, and key technological limitations. Financial analysis demonstrates positive economic effects from implementing thermoelectric generation, including reduced fuel consumption and lower maintenance costs. Calculations of payback periods are provided along with prospects for widespread adoption in the near future. In addition, the environmental contribution of thermoelectric generation is assessed in terms of reducing harmful emissions from aviation technology, emphasizing its role in achieving sustainable development goals.

Keywords: aviation, thermoelectric generator, economics, unmanned aerial vehicles, aircraft, pulsejet engine, alternative power generation, generator.

Современные жесткие быстроизменяющиеся условия рыночной экономики диктуют требования предприятиям, которые в свою очередь внедряют все новые и новые технологии и методики для повышения экономической эффективности и выживания. Улучшать экономические показатели позволяют новые научно-технологические достижения в различных областях. Это утверждение не обходит стороной и область авиапромышленности, где, эффективность является одним из решающих факторов, позволяющих производителям, эксплуатантам оставаться востребованными на общемировом рынке. Производители авиационной техники направляют свои инженерно-технические мощности на реализацию данных требований, с каждым годом повышая качество производимых машин, эксплуатанты для достижения поставленных целей совершенствуют процедуры.

В статье рассмотрен один из возможных путей повышения экономической эффективности как беспилотных летательных аппаратов, так и пассажирских воздушных судов.

Гражданская авиация, как отрасль, начала свое существование относительно недавно, в сравнении с другими отраслями. Но развитие ее было достаточно бурным и стремительным. Так, появившись только в начале двадцатого века, в виде отдельных небольших предприятий, производивших простейшие летательные аппараты, способные осуществлять перелет на сравнительно небольшие расстояния, авиаотрасль к сегодняшнему дню имеет множество логистических узлов, огромные производственные площади со сложнейшими технологическими процессами, с тысячами узкопрофильных специалистов, в числе которых инженерно-технический состав, летный состав. Таким образом современная авиационная промышленность представляет собой множество созависимых предприятий с тысячами производственных циклов, существование предприятий базируется на экономической эффективности производимого продукта.

С учетом событий новейшей истории можно уверенно сказать, что беспилотные летательные аппараты, как составная часть авиационной промышленности, в ближайшие годы будет также развиваться стремительными темпами. Это вынуждает производителя находить все новые и новые пути оптимизации конструкций воздушных судов (далее - ВС) и беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА). Одним из перспективных путей можно назвать применение термоэлектрогенерации в летательных аппаратах.

Развитие технологий привело к тому, что на современных воздушных судах устанавливается различное оборудование, энергопотребление которого только за последние 40 лет выросло в 2 раза [1]. Непрерывный рост энергопотребления заставляет производителей увеличивать энерговыделение или экстенсивным путем - установкой дополнительных генераторов, или интенсивным - увеличением эффективности уже имеющегося электрооборудования.

Неоспоримым фактом является то, что в авиации к электрооборудованию предъявляются особые требования к надёжности и неприхотливости к условиям работы. Рассматривая альтернативные способы питания бортовых сетей БПЛА и ВС гражданской авиации, можно выделить такой подход, как термоэлектрогенерацию (далее - ТЭГ) среди ряда других, по причине достаточно высокой надежности, относительной простоты конструкции. Такие генераторы не имеют подвижных частей, устойчивы к высоким температурам и практически не нуждаются в обслуживании. В настоящий момент термоэлектрогенераторы применяются в различных отраслях экономики. В авиакосмической области зачастую применяют радиоизотопные ТЭГ, примером является марсоход Curiosity. Применение обусловлено ввиду, опять же, высокой надежности [2].

Если рассмотреть эпюру распределения температур по тракту любого авиационного двигателя (рисунок 1), то уверенно можно сказать, что имеется большой перепад температур, который можно использовать для рекуперации.

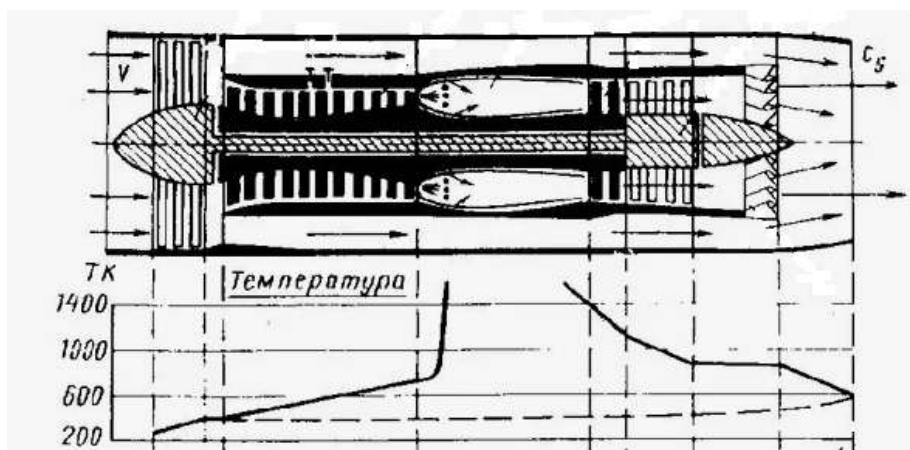


Рисунок 1 - Распределение температуры в газотурбинном двигателе

Принцип действия ТЭГ основан на эффекте Зеебека, который заключается в том, что при соединении двух разнородных проводников и поддержании разности температур в месте спая, возникает ЭДС, называемая термоЭДС [3]. Величина термоЭДС определяется по формуле:

$$E_{TEDS} = \alpha_{AB} \cdot \Delta T,$$

где $\Delta T = T_1 - T_2$; α_{AB} – коэффициент Зеебека одной ветви, измеряемый в мкВ/К.

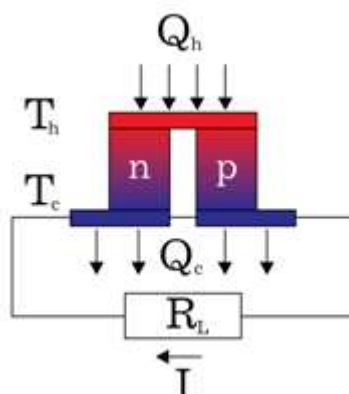


Рисунок 2 – Термоэлектродгенератор

Зеебек провел множество экспериментов с различными материалами и составил список, положение в котором соответствовало большей или меньшей способности отклонять магнитную стрелку создаваемым током в замкнутой цепи при подаче тепла на термопару. Данный список используется и по сей день, только с уточненными данными. Тогда коэффициент полезного действия (далее – КПД) термопар Зеебека составлял лишь единицы процентов, но уже мог конкурировать с паровыми машинами того времени.

Составными частями любого ТЭГ (рисунок 2) являются: источник тепла, который через теплопереходы передает энергию тепла, термоэлектрический преобразователь (термопара) (далее - ТЭП), в котором осуществляется непосредственная трансформация тепловой энергии в энергию электрического тока и холодильник, который отводит и сбрасывает неиспользованную теплоту [4].



Рисунок 3 – Термоэлектрический преобразователь

Сам ТЭП (рисунок 3) состоит из батарей, каждая из которых имеет в своем составе термоэлементы, состоящие из полупроводниковых сплавов р и n типов проводимости. Ветви соединяются в последовательную электрическую цепь металлическими шинами. В ветви р-типа проводимости ток движется от "горячего" спая к "холодному", в ветви n-типа направление тока обратное. Теплопереходы выполняют функцию электроизоляторов. Паразитные перетечки тепла уменьшаются за счет теплоизоляции, которая также предохраняет полупроводниковый сплав от испарения и химических взаимодействий при высоких температурах [5].

Устанавливая батареи друг над другом (каскадирование) или применяя различные материалы (сегментирование) можно получить различные последовательно-параллельные цепи по теплу и электричеству. Таким образом, ТЭГ представляет собой многоэлементную систему с неравномерным распределением тепловых и электрических полей.

Основным параметром, который характеризует эффективность ТЭГ, как и любого другого генератора является КПД:

$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \times \frac{M - 1}{M + \frac{T_C}{T_H}}; M = \sqrt{1 + ZT}, Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda},$$

где Z – добротность полупроводникового материала, α – дифференциальная термо-э.д.с. ветвей термоэлементов, σ и λ – электропроводность и теплопроводность ветвей термоэлементов соответственно, T_H – температура горячего спая, T_C – температура холодного спая, T – средняя температура ветви термоэлемента $T = (T_H + T_C) / 2$, M – критерий Июффе.

Добротность зависит как от свойств материала, так и от рабочей температуры, правильный подбор материала, эффективность которого максимальна в диапазоне средних эксплуатационных температур обеспечивает достаточно высокий КПД системы. Также эффективная работа может быть обусловлена добавлением редкоземельных металлов, которые обеспечивают минимальное электрическое сопротивление при максимальном тепловом (наибольший перепад температур). При использовании ранее упомянутого каскадирования можно добиться того, что каскады будут оптимизированы для различных температур.

Так же для обеспечения продолжительной и эффективной работы должен быть реализован отвод тепла. Холодильник может быть жидкостный (с насосом) или воздушным с активным обдувом или конвективным способом отвода тепла. Возвращаясь к теме авиации: так как летательные аппараты передвигаются со сравнительно большими скоростями и на больших высотах, охлаждение может осуществляться за счет набегающего

воздушного потока, без необходимости установки дополнительных средств обдува или системы жидкостного охлаждения, хотя последняя может также быть реализована.

КПД ТЭГ на основе различных материалов заметно отличается. Можно отметить, что с течением времени и развитием материаловедения наблюдался значительный прирост КПД (более 20%) [3].

Однако использование ТЭГ сопряжено с некоторыми трудностями: необходимо тщательно, с высокой точностью обработать деталь перед установкой для уменьшения шероховатости поверхности и увеличения активной площади контакта, также необходимо использовать термопроводящие пасты, заполняющие неотшлифованные зазоры. Особое внимание необходимо уделять усилиям прижатия деталей и учесть коэффициент температурного расширения материалов, чтобы не выйти за пределы прочности конструкции.

Применение ТЭГ возможно совместно с пульсирующими воздушно-реактивными двигателями (далее – ПуВРД). Данный тип двигателей считался достаточно перспективным во времена Второй Мировой войны, создавались даже прототипы беспилотных летательных аппаратов. Применение в современных реалиях может быть вновь возобновлено, ПуВРД обладают рядом неоспоримых преимуществ: простая конструкция без двигающихся частей (за исключением упругой мембраны — в некоторых вариантах исполнения), высокая надежность, относительно высокая скорость полета. На данный момент в Российской Федерации эксплуатируется БПЛА «Герань - 2», разрабатываются модификации с U - образными ПуВРД. Температуры в тракте ПуВРД могут достигать до 1700 К.

При использовании таких БПЛА возникает проблема с генерацией электроэнергии: если в поршневых модификациях проще и дешевле использовать классические генераторы постоянного тока, то в модификациях с ПуВРД вращать ротор генератора будет нечем. Необходимо устанавливать либо дополнительную ветряную турбину, вследствие чего увеличится лобовое сопротивление, либо аккумуляторную батарею достаточной емкости, что значительно увеличит массу.

Предлагается рассмотреть вариант применения ТЭГ. Установить их можно на теплопереходы, соединяющие корпус двигателя с горячей стороной или, придав необходимую цилиндрическую форму на этапе сборки — непосредственно на обшивку из жаропрочной стали.

Холодная сторона ТЭГ будет охлаждаться за счет набегающего воздушного потока, обдувающего легкие алюминиевые радиаторы с небольшими ребрами. Предположим, что БПЛА идет на высоте 2 км, тогда температура согласно стандартной атмосфере (каждый километр температура уменьшается на 6,5 градусов по Цельсию) составит в среднем 2 градуса по Цельсию.

На российском рынке не так много готовых решений ТЭГ, из имеющихся можно рассмотреть применение ТЭГ Fobos - 55 (рисунок 4) [6], который при работе в нормальном режиме выдает напряжение 5 В и ток 11 А.

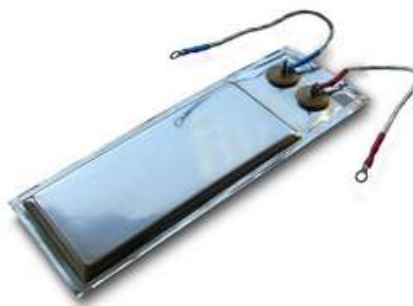


Рисунок 4 - ТЭГ Fobos - 55

БПЛА «Герань - 2» оснащен навигационным и вычислительным оборудованием, камерой, датчиками ИНС и т.д. и имеет электросистему постоянного тока напряжением 24 В около 270 Вт. Соединив 5 ТЭГ Fobos - 55 последовательно цепи получим выходное напряжение 25 В, мощностью 275 Вт, чего вполне достаточно для питания электросистемы данного типа БПЛА.

Модуль имеет габариты 260x92 мм, ПуВРД БПЛА «Герань - 2» по различным данным имеет диаметр камеры сгорания (далее - КС) 150-200 мм, примем это значение равным 170 мм. Тогда длина окружности составляет около 534 мм. Таким образом можно разместить по два модуля «кольцом» в одной плоскости, непосредственно на обшивке КС.

Стоит также отметить, что при таком способе электрогенерации снижается масса БПЛА. В сравнении с поршневыми модификациями: масса генератора постоянного тока схожих характеристик будет составлять до 8 кг, в то время как, суммарный вес ТЭГ — 4,5 кг. Таким образом увеличивается масса полезной нагрузки. Но необходимо оговориться, что использование БПЛА в такой конфигурации рентабельно только в разведывательных целях. Если говорить о гражданском применении, то это идеальное решение для авиационных работ, поиска и спасения.

На сегодняшний день теплоэлектрические преобразователи (термопары) широко применяются в области авиастроения больших пассажирских воздушных судов, но пока лишь в качестве датчиков измерения температуры.

Разместив ТЭГ на выходном сопле двухконтурного газотурбинного двигателя, (рисунок 5) (что обосновывается тем, что снизу — непосредственно горячая область, а холодная сторона обдувается быстрым холодным потоком из внешнего контура) или непосредственно у КС для питания датчиков, расположенных в двигателе, уменьшается масса за счет уменьшения длины проводки и в целом повышается рентабельность, так как, энергия обычных генераторов не тратится на питание датчиков двигателя, да и сами ТЭГ практически не нуждаются в обслуживании на протяжении многих лет. Также дополнительно масса уменьшается за счет уменьшения мощности генераторов, немного уменьшается расход топлива, за счет того, что отбираемая мощность двигателей ниже.

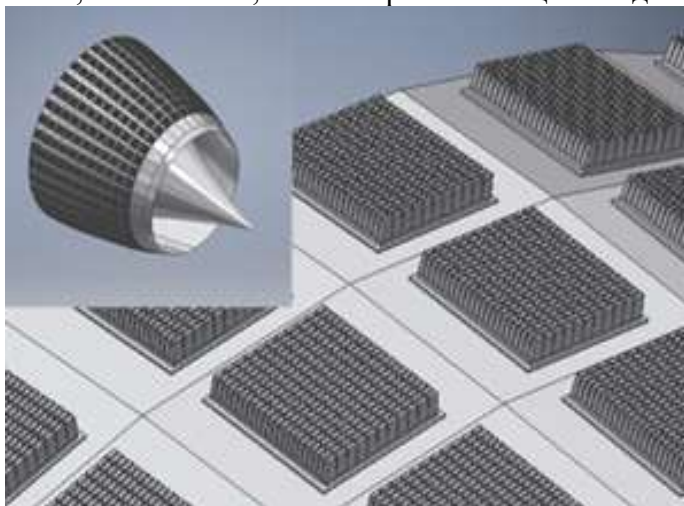


Рисунок 5 – Пример расположения ТЭГ на выходном сопле современного ВС

Подводя итог можно сказать, что при внедрении ТЭГ в авиаотрасль решаются не только некоторые инженерные задачи, но и экономические. Если в будущем с развитием полупроводниковых материалов будет достигнут более высокий КПД, то можно смело сказать, что авиация практически полностью перейдет на термоэлектрогенерацию, это позволит брать большую коммерческую загрузку и приведет к увеличению прибыли эксплуатанта. Также будут снижены расходы на амортизацию: больше не придется обслуживать классические генераторы, а ТЭГ смогут надежно работать на протяжении десятилетий.

Если утверждать, что КПД ТЭГ будет достаточен, а стоимость станет ниже, чем в настоящее время, то с некоторыми условностями можно произвести расчет.

Исходные данные:

- Самолет Боинг 747 в собственности авиапредприятия.
- Средний годовой налет самолета: 3600 часов.
- Топливная эффективность при использовании ТЭГ: 8% от общего уровня выработки.
- Выработка топлива: 2800 кг/ч.
- Стоимость топлива: в различных аэропортах варьируется, примем равной 90 000 рублей за тонну ТС-1.
- Стоимость одного генератора - 10 000 долларов.
- Соотношение стоимости ТЭГ к классическому генератору - 17.
- Регламентные работы: обслуживание каждые 1200 часов - 200 долларов и полная замена каждые 12000 часов. Если генератор заменен, то соответственно считается, что регламентные работы проведены. Перевод стоимости в рубли будет осуществлен по курсу 75,6 рублей за 1 доллар.

Экономический расчет

1. Расход топлива за год, без применения ТЭГ:

$3600 \text{ ч} \times 28000 \text{ кг/ч} = 10800000 \text{ кг}$ (в год).

Экономия топлива при использовании ТЭГ (8%): $10800000 \times 0,08 = 806000 \text{ кг}$ (в год).

Стоимость сэкономленного топлива:

$806 \times 90000 = 72576000 \text{ рублей}$ (в год).

2. Расчет стоимости классического генератора и ТЭГ.

Стоимость одного генератора - 757327 рублей, генераторов 4, тогда:
 $4 \times 757327 = 3029308 \text{ рублей}$.

Стоимость ТЭГ: $3029308 \times 17 = 51498236 \text{ рублей}$.

Разница в стоимости:

$51498236 - 3029308 = 48468928 \text{ рублей}$.

3. Расходы на обслуживание.

Регламентные работы каждые 1200 часов, соответственно, при среднем годовом налете 3600 часов они будут проводиться 3 раза в год:

$3 \times 15146 = 45439 \text{ рублей}$ (в год)

Для 4 генераторов: $4 \times 45440 = 181760 \text{ рублей}$.

За 10 лет эксплуатации самолет налетает 36000 часов, за 20 лет - 72000 часов, соответственно, за 10 лет будет произведено: $36000/12000 = 3$ замены, за 20 лет - 6 замен, стоимость замен составит: за 10 лет: $3 \times 3029308 = 9087924 \text{ рублей}$; за 20 лет: $6 \times 3029308 = 18175848 \text{ рублей}$.

4. Итоговый экономический эффект.

За 1 год эксплуатации:

$E = 72576000 - 48468928 + 181760 = 24288832 \text{ рублей}$.

Предлагаемый способ электрогенерации дает явный экономический эффект. Справедливо также будет и суждение о том, что будут улучшаться экологические показатели благодаря экономии топлива. Нет сомнений, что в недалеком будущем авиация сможет использовать преимущества термоэлектрогенерации. Увеличится не только уровень безопасности полетов, но и улучшится экономическая составляющая авиакомпании.

Список источников

1. Новак, А. А. Перспективы использования термоэлектрогенераторов в авиации / А. А. Новак // Актуальные вопросы гражданской авиации: наука, техника и общество : Сборник материалов III Международной молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27–28 марта 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский

государственный университет гражданской авиации им. главного маршала авиации А.А. Новикова, 2025. – С. 167-172

2. Термоэлектричество и термоэлектрические генераторы: история, развитие, примеры и перспективы применения // Школа для электрика URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/eltehustr/2763-termoelektrichestvo-i-termoelektricheskie-generatory.html> (дата обращения: 31.01.2026).

3. Злобин В. Г. Термоэлектрические генераторы и термоэмиссионные преобразователи: учебное пособие / В. Г. Злобин. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. — 161 с. ISBN 978-5-91646-456-6

4. Термоэлектрические генераторы [Текст] / [А. С. Охотин, А. А. Ефремов, В. С. Охотин, А. С. Пушкарский] ; Под ред. д-ра физ.-мат. наук А. Р. Регеля. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Атомиздат, 1976. — 320 с.

5. Турбореактивный двигатель, содержащий термоэлектрические генераторы - RU2631847C2 // РОССТИП URL: <https://rosstip.ru/patents/105148-turboreaktivnyj-dvigatel-soderzhashchij-termoelektricheskie-generatory?ysclid=ml1yq073v6462583827> (дата обращения: 31.01.2026).

6. Fobos-55 // ЭКОГЕН ТЕХНОЛОДЖИ URL: <https://ecogenthermoelectric.com/ru/fobos-55.html> (дата обращения: 31.01.2026).

Сведения об авторах

Соколов Олег Аркадьевич, заведующий кафедрой № 13, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова», Санкт-Петербург, Россия.

Новак Александр Александрович, студент факультета летной эксплуатации, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова», Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Sokolov Oleg Arkadievich, Head of Department No. 13, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, St. Petersburg, Russia.

Novak Alexander Alexandrovich, student of the Faculty of Flight Operations, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, St. Petersburg, Russia.