

**APPLICATION OF THE THERMOELECTRIC METHOD  
OF HEAT CONVERSION IN GAS TURBINE***Iskander Radikovich Garipov<sup>a</sup>, Alexey Evgenyevich Mikhailov*

Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi str. 32, Ufa, 450076, Russia

<sup>a</sup> garipovir@yahoo.com

---

**ABSTRACT**

The work is devoted to the problem of waste heat recovery of exhaust gases of gas turbine (GT). The emphasis in the work is on the use of non-machine methods of heat recovery, namely, thermoelectric. The thermoelectric method makes it possible to convert waste heat into electrical energy without the need for mechanical energy supply, which opens up a wide potential for improving GT redundancy systems and increasing their electrical efficiency. The article presents the main parameters characterizing the operation of thermoelectric generators (efficiency, specific power). The main structural elements of a thermoelectric generator are described. An overview of approaches to the use of thermoelectric generators in GT structures is presented. The main approaches and problems related to the integration of the TAG in the GT are identified. The most common approach is to integrate the TAG into the exhaust system. At the same time, the main limitation for the use of thermoelectric generators in existing GT designs is the low Q-factor of ZT thermoelectric materials, as well as thermal stresses resulting from cyclic loads. The authors investigated the potential of the introduction of the TAG in the design of GT of various capacities. It is revealed that the use of thermoelectric generators is advisable in small-sized GT, since this provides a greater increase in electrical efficiency. Based on the results of the work, the concept of using TEG as part of microturbine was formed.

**KEYWORDS**

Gas turbine (GT); heat recovery; recuperation; Brighton cycle; thermoelectric generator (TEG); electrical efficiency.

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ТЕПЛА В КОНСТРУКЦИЯХ ГТУ***Искандер Радикович Гарипов<sup>a</sup>, Алексей Евгеньевич Михайлов*

Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

<sup>a</sup> garipovir@yahoo.com

---

**АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена проблеме утилизации отработанного тепла выхлопных газов газотурбинных установок (ГТУ). Акцент в работе сделан на применении безмашинных методов утилизации

тепла, а именно – термоэлектрическом. Термоэлектрический метод позволяет преобразовывать отработанное тепло в электрическую энергию без потребности в подводе механической энергии, что открывает широкий потенциал для совершенствования систем резервирования ГТУ и увеличения их электрического КПД. В статье представлены основные параметры, характеризующие работу термоэлектрических генераторов (КПД, удельная мощность). Описаны основные конструктивные элементы термоэлектрического генератора. Представлен обзор подходов по применению термоэлектрических генераторов в конструкциях ГТУ. Выявлены основные подходы и проблемы, связанные с интеграцией ТЭГ в ГТУ. Наиболее распространенным подходом является интеграция ТЭГ в выхлопную систему. При этом основным ограничением для применения термоэлектрических генераторов в существующих конструкциях ГТУ является низкая добротность  $ZT$  термоэлектрических материалов, а также возникающие в результате циклических нагрузок термические напряжения. Авторами исследован потенциал внедрения ТЭГ в конструкцию ГТУ различных мощностей. Выявлено, что применение термоэлектрических генераторов целесообразно в малоразмерных ГТУ, так как это обеспечивает больший прирост электрического КПД. По результатам работы сформирована концепция применения ТЭГ в составе малоразмерных газотурбинных установок (МГТУ).

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Газотурбинная установка (ГТУ); утилизация тепла; рекуперация тепла; термодинамический цикл Брайтона; термоэлектрический генератор (ТЭГ); электрический КПД.

## Введение

Основные параметры, характеризующие эффективность ГТУ как тепловой машины, для существующих конструкций доведены до предельно высокого уровня. Дальнейшее повышение основных параметров ГТУ (суммарной степени повышения давления в компрессоре, температуры газов перед турбиной) и, как следствие, КПД цикла, сопряжено с ростом технико-экономических затрат. Поэтому в течение последних десятилетий ведутся поисковые исследования, направленные на разработку технических решений с качественно новым уровнем характеристик на основе достижений фундаментальных научных исследований. Одним из способов повышения характеристик ГТУ является рекуперация тепловой энергии выхлопных газов, не производящей полезной работы в цикле.

В настоящее время регенерация отработанного тепла нашла распространение в энергетических ГТУ. В установках подобного рода отработанное тепло возвращается в цикл ГТУ посредством теплообменников-

рекуператоров или реализуется в парогазовых циклах. Предполагается, что в будущем рекуперация тепла найдет широкое распространение и в авиационных двигателях. Оценка потерь тепла в конвертированных ГТУ, применяемых на компрессорных станциях ПАО Газпром, позволяет утверждать, что потенциал отработанного тепла составляет порядка 100 тыс. МВт [1]. Утилизация даже части этой энергии может повысить автономность и энергоэффективность работы как отдельных станций, так и всей газотранспортной системы.

Помимо описанного ранее подхода с использованием рекуператоров и парогазовых циклов, для преобразования отработанного тепла могут применяться безмашинные методы преобразования энергии [2]. Наиболее распространенным из них является термоэлектрический. Этот метод позволяет реализовывать уровни мощности от долей ватт до нескольких киловатт, однако имеет сравнительно малый КПД около 2–10% (в перспективе 20%). Очевидно, что реали-

зация основных энергоузлов с применением ТЭГ не является экономически целесообразным решением. Тем не менее термоэлектрический метод преобразования отработанного тепла на сегодняшний день является наиболее конкурентоспособной зеленой технологией. В силу особенностей рабочего процесса, работая в составе тепловой машины, термоэлектрический генератор, не приводя к дополнительному расходу топлива увеличивает выработку электроэнергии отдельной установки. В работе рассматриваются основные параметры, характеризующие термоэлектрический генератор, а также выделяются основные достоинства и недостатки, связанные с применением ГТУ (общепромышленного и судового назначения). Порядок изложения материала соответствует хронологической последовательности исследований.

## 1. Термоэлектрический генератор

Термоэлектрический генератор предназначен для преобразования тепловой энергии в электрическую. Генератор состоит из трех основных групп элементов:

- конструкций и систем, обеспечивающих подвод теплоты к термоэлектрической батарее;
- термоэлектрической батареи, преобразующей тепловую энергию в электрическую;
- конструкции и систем, обеспечивающих отвод теплоты от термоэлектрической батареи.

Важным фактором является то, что конструкция простой термобатареи не имеет для энергетического применения практического значения. Система без интенсификации охлаждения будет работать лишь в первый момент времени, до того, как тепло Джоуля, возникающее из-за внутреннего сопротивления ( $Q = I^2RT$ ), не оказывает существенного влияния.

Ключевым фактором, характеризующим батарею, является добротность используемого термоэлектрического материала  $ZT$ .

Под добротностью  $ZT$  понимается отношение средней термо-электро движущей силой (термоЭДС)  $\alpha$  для спая полупроводников, к произведению средней теплопроводности  $\lambda$  и средней удельной электропроводности  $\rho$  материала при заданной температуре (в уравнении индекс  $n$  и  $p$  соответствуют характеристикам материалов с электронной и дырочной проводимостью), пренебрегая контактным сопротивлением можно записать, следующую формулу [3]:

$$ZT = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{(\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n})^2}.$$

Параметры, определяющие добротность материала, зависят от плотности носителей заряда. Происходит это в первую очередь потому, что диффузия носителей заряда является основным механизмом переноса в металлах и полупроводниках. По мере увеличения плотности носителей заряда в зависимости от температуры меняются и термоэлектрические свойства [4].

Достижения последних лет позволяют говорить о существенном прогрессе в синтезе термоэлектрических материалов и достижении КПД порядка 10–15% [4–6]. Текущий уровень развития технологий (включая широкое распространение методов аддитивного производства) позволяет говорить о возможности обеспечения работоспособности ТЭГ в условиях циклических нагрузок [7, 8]. Подробнее характеристики материалов, применимых для термоэлектрического преобразования энергии, представлены в источнике [9].

Ключевым элементом при создании термоэлектрической батареи (также известна как термоэлектрический модуль) является адаптация синтезированного материала. Эффективность термоэлектрической батареи зачастую ниже, чем значение, полученное для материала в лабораторных условиях.

Это связано с возникновением контактных сопротивлений, которые возникают при формировании батареи. Батарея состоит из большого количества термоэлементов, соединенных последовательно в электрическую цепь и параллельно в тепловую (рис. 1). Соединение в электрическую цепь осуществляется при помощи металлических пластин. Внутренне сопротивление элементов коммутации, а также контактное сопротивление, образованное на стыке термоэлемента и металлической пластины, вносят вклад в общее омическое сопротивление батареи [10]. Соединение в тепловую цепь осуществляется через изоляционные пластины. Внешняя поверхность этих пластин образует окончательный контакт с устройствами подвода и отвода тепла. Производительность и КПД термоэлектрической батареи прямо пропорциональны градиенту температур на горячем и холодном спае термоэлемента, а не на торцах изоляции, в реальной термоэлектрической батарее будет присутствовать дополнительное термическое сопротивление.

Принимая во внимание, описанные выше моменты, важно обеспечение минимального

электрического и теплового сопротивления, поэтому контактные материалы должны обладать высокой электро- и теплопроводностью и быть достаточно тонкими, для размещения в термоэлектрической батарее. Также контактные материалы должны быть стабильными при высоких рабочих температурах термоэлектрического генератора, обеспечивать механическую прочность соединения и иметь коэффициент температурного расширения близкий к значению термоэлектрического материала. Последнее является важнейшим требованием, так как значительные несоответствия коэффициента температурного расширения приводит к возникновению значительных температурных напряжений, которые могут привести к разрушению или трещинам в местах соединения, вызывая увеличение как электрического, так и теплового контактного сопротивления. Это требование особенно актуально для термоэлектрического генератора, работающего в составе ГТУ, так уровень температур выхлопных газов составляет порядка 300–400 °С. Пример разрушения подобного рода, возникшего после нескольких рабочих циклов, представлен на рис. 2.

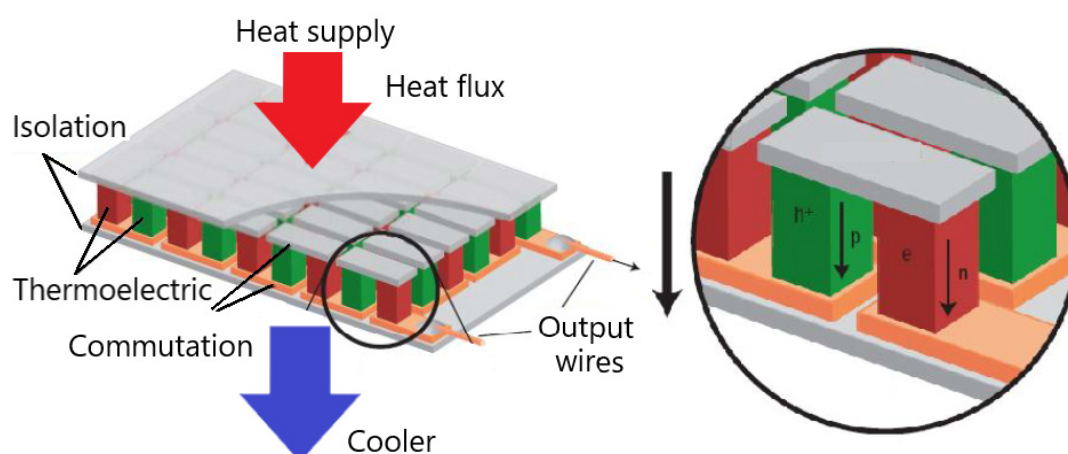
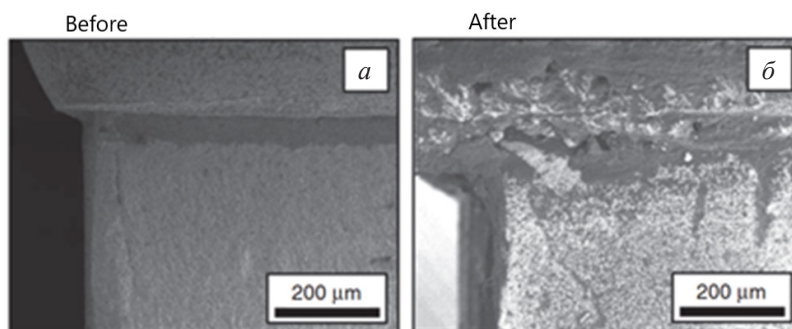


Рис. 1. Схема конструкции и элементов, образующих термоэлектрический модуль

Fig. 1. Diagram of the structure and elements forming the thermoelectric module



**Рис. 2.** Изображения контакта между термоэлектрической ножкой и медным электродом (а) до и (б) после нагружения [11]

**Fig. 2.** Images of the contact between the thermoelectric leg and the copper electrode (a) before and (b) after loading [11]

Наиболее распространенными термоэлектрическими генераторами, являются модули, основанные на теллуридах висмута и сурьмы, работающие в диапазоне температур от 30 °С до 200 °С. В рассматриваемом диапазоне температур эти термоэлектрические материалы имеют средние значения  $ZT$ , варьирующиеся от 0,6 до 0,9. Таким образом, ожидаемый диапазон КПД модулей составляет 3–6%. Технические характеристики распространенных коммерческих термоэлектрических модулей размером 40×40 мм для выработки электроэнергии представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Технические характеристики термоэлектрического генератора

**Table 1.** Technical characteristics of the thermoelectric generator

Градиент температур, °С	Удельная мощность, Вт/см <sup>2</sup>	КПД
100	0,1–0,22	3,2–3,6
170	0,28–0,59	4,6–5,4
200	>0,6	6

## 2. Предварительная оценка внедрения ТЭГ в конструкцию ГТУ

Основной задачей термоэлектрического генератора рекуперативного типа является обеспечение того, чтобы электрическая мощность, получаемая в термоэлектриче-

ской батарее, превышала возможные потери энергии, вызванные внедрением системы в ГТУ. В процессе проектирования термоэлектрического генератора требуется рассмотрение нескольких аспектов: источник тепла, отвод тепла от термоэлемента, эффективность преобразования тепла (КПД) и эффект от внедрения ТЭГ в ГТУ. Рис. 3 иллюстрирует распределение потока мощности в системе рекуперации тепла с термоэлектрическим генератором. В данном разделе приводятся соображения авторов по использованию в качестве источника тепловой энергии для питания ТЭГ сбросового тепла ГТУ.

Энергия, вырабатываемая термоэлектрическим генератором, работающим в составе ГТУ, может быть использована в качестве резервного источника питания для вспомогательного оборудования или для питания беспроводных датчиков давления и температуры. Применение ТЭГ в качестве резервного источника питания обеспечит дополнительное резервирование критических систем, так как питание будет производиться от энергии отработанного тепла, независимо от системы электроснабжения. Питание беспроводных датчиков с помощью ТЭГ устранил потребность в прокладке проводов, что обеспечит снижение массы системы, затрат на установку и устранение потенциальных точек отказа. В сравнении с существую-

ющими системами генерации постоянного тока, использование ТЭГ не требует отбора механической энергии от вала ГТУ, что потенциально может оказывать благоприятное влияние на удельный расход топлива.

Основными параметрами, характеризующими тепловую машину, выступают мощность и эффективный КПД. Известно, что с уменьшением мощности ГТУ, падает эффективность преобразования химической энергии топлива в механическую работу на валу. Для ГТУ мощностью порядка 30 кВт, КПД: в простом цикле составляет 14...18%, в регенеративном 28...32%. Для малоразмерных паротурбинных установок фирмы «Ormat Technologies inc» КПД лежит в диапазоне 3...5% [12]. Зависимость КПД от мощности МГТУ представлена на рис. 3. Следует отметить, что относительно низкая экономичность МГТУ объясняется малой размерностью и невысокими параметрами цикла, что зачастую компенсируется работой в составе когенерационных установок.

Иллюстрация зависимости КПД от мощности тепловой машины для ГТУ и термоэлектрических генераторов представлена на рис. 3. Очевидно, что при существующем и перспективном уровне развития термоэлектрических материалов использование

ТЭГ в качестве основного элемента системы выработки электроэнергии экономически нецелесообразно. Однако существует точка пересечения ниже некоторого уровня мощности (рис. 3), в которой термоэлектрическая технология, как правило, будет более эффективной. При этом рост эффективности преобразования переместит точку пересечения на более высокие классы мощности, расширяя диапазон применения ТЭГ.

Несмотря на то, что зависимость, представленная на рис. 4, носит условный характер, она позволяет сделать определенные выводы. Применение ТЭГ в качестве рекуператора целесообразно, для ГТУ малой мощности. В силовых установках с выходной мощностью менее 100 кВт массогабаритные ограничения ведут к относительно низким параметрам цикла, что в свою очередь ведет к уменьшению эффективного КПД. Как следствие присутствует большая доля неутраченного отработанного тепла. Безусловно, что для проведения точной оценки следует учитывать большее количество параметров генерирующих систем и ориентироваться на конкретный класс мощности. Логика представленных рассуждений подкрепляется и исследованиями по теплообменникам-рекуператорам [13], большинство которых проводится для малоразмерных ГТД [14–16].

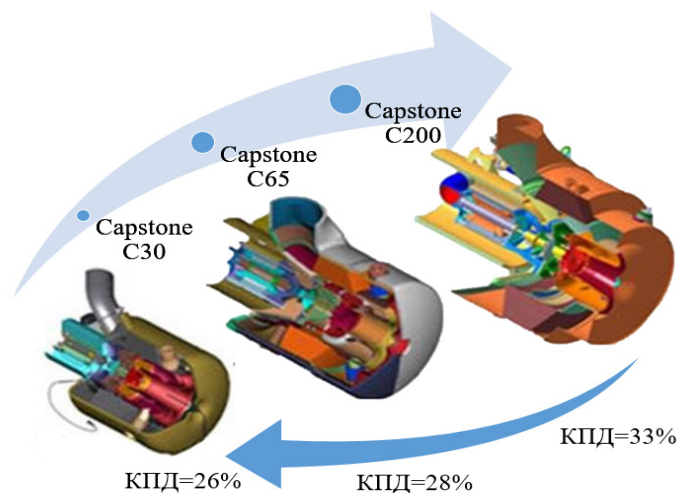


Рис. 3. МГТУ фирмы Capstone

Fig. 3. Microturbine Capstone

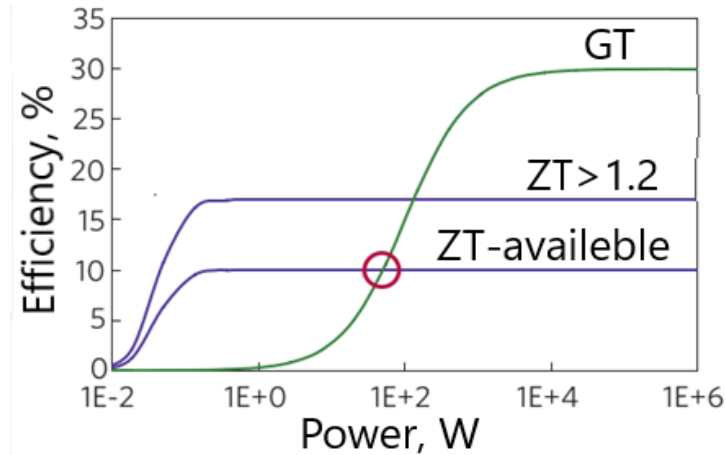


Рис. 4. Зависимость КПД от мощности системы

Fig. 4. Dependence of efficiency on system power

В работе [17] проведено экспериментальное исследование теплового состояния ПС-90ГП25 (рис. 5). Температура наружной стенки переходного корпуса по результатам исследований лежит в диапазоне 200–525 °С.

Применяя известные аналитические зависимости для термоэлектрического генератора [19], можно провести предварительную оценку использования ТЭГ для утилизации сбросового тепла переходного корпуса

ПС-90ГП25. Доступная площадь для размещения ТЭГ составляет 1,17 м<sup>2</sup>. Для отвода тепла с холодного спая ТЭГ использовалось масло с температурой от 15 до 30 °С. Результаты представлены на рис. 6, максимальная выходная мощность при существующем уровне термоэлектрических материалов составляет от 30 до 230 Вт, а для перспективных материалов может достигать значения от 65 до 477 Вт.

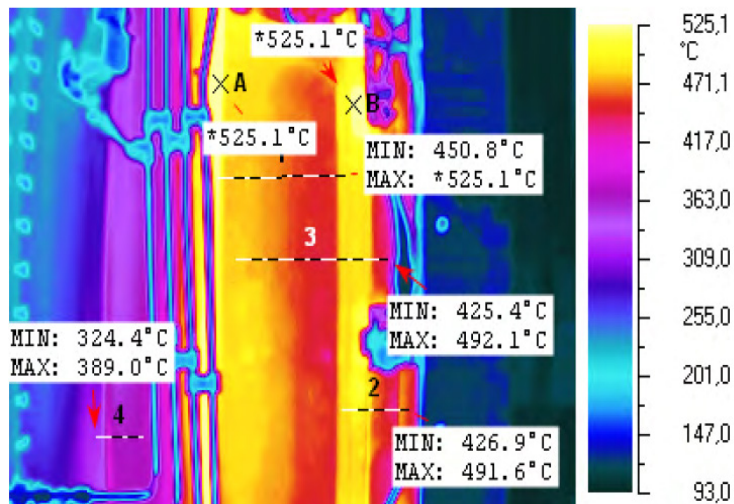
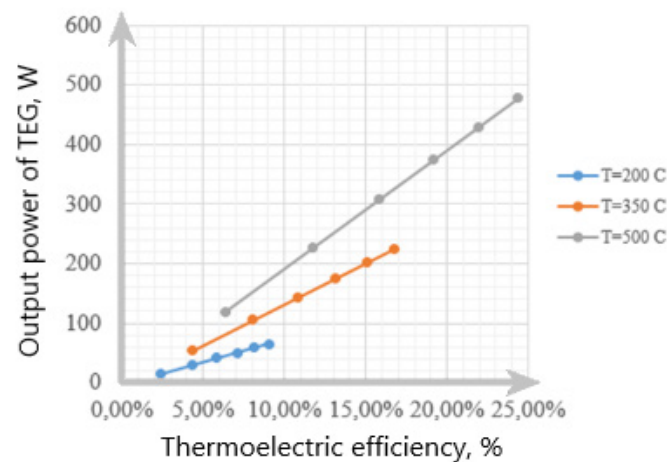


Рис. 5. Распределение температур на переходном корпусе ПС-90ГП25 [17]

Fig. 5. Temperature distribution on the PS-90GP25 transition housing [17]

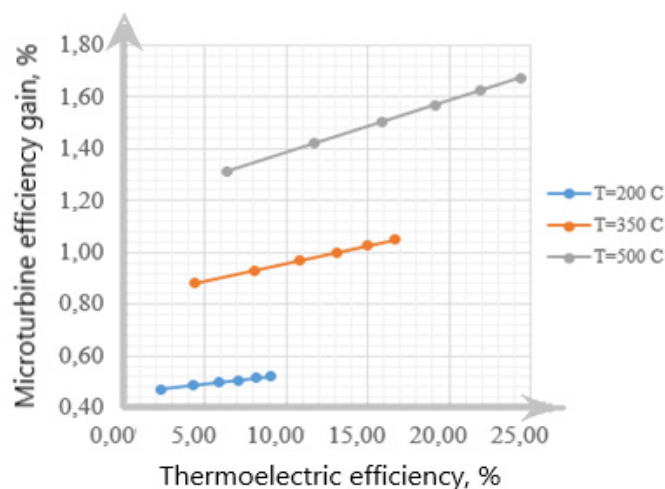


**Рис. 6.** Зависимость выходной мощности ТЭГ, размещенного на переходном корпусе ПС-90ГП25, от КПД преобразования в термоэлектрической батарее и температуры горячего спая

**Fig. 6.** Dependence of the output power of the PS-90GP 25 SO placed on the transition housing on the conversion efficiency in a thermoelectric battery and the temperature of the hot junction

Аналогичным образом проведем оценку интеграции ТЭГ в МГТУ. В оценке была учтена мощность, потребная на отвод тепла с холодной стороны термобатареи, КПД термоэлектрической батареи варьировался в диапазоне 2–25%, потребная площадь размещения составляла 0,5 м<sup>2</sup>. В результате предварительного анализа электрическая

мощность, получаемая через термоэлектрическую батарею, была больше, чем возможные потери энергии, вызванные интеграцией системы. При мощности 30 кВт и КПД МГТУ 25% прирост эффективного КПД от внедрения в конструкцию ТЭГ может составить от 0,2% до 0,7% (рис. 7).



**Рис. 7.** Оценка прироста КПД за счет внедрения ТЭГ в ГТУ мощностью 30 кВт

**Fig. 7.** Estimation of the efficiency gain due to the introduction of the TAG in the GTU with a capacity of 30 kW



### 3. Обзор проектов по интеграции ТЭГ в ГТУ

Регенерация отработанного тепла с использованием теплообменников-утилизаторов и парогазовых циклов не является безальтернативным решением для промышленных и судовых ГТУ. Возможным решением является применение ТЭГ. Температура газов, выбрасываемых в атмосферу, может достигать 300–400 °С, что является подходящим источником тепла для термоэлектрического генератора. В качестве источника холода возможно применение атмосферного воздуха, с температурой не более 50 °С, а в системах когенерации и воды. Тогда, располагаемый перепад температур будет лежать в диапазоне от 250 до 350 °С. При современном состоянии развития термоэлектрических материалов данная величина перепада температур позволяет говорить о рекуперации порядка 2–3% тепловой энергии. При этом абсолютная величина выигрыша может быть скорректирована за счет затрат мощности на отвод тепла или загромождения проточного тракта ГТУ. Кроме того, сдерживающим фактором остается стоимость высокотемпературных термоэлектрических модулей и рост первоначальных капиталовложений.

Известно конструктивное исполнение ГТУ с интегрированным ТЭГ, которое пред-

ставлено в патенте [18]. Особенностью конструкции (рис. 8) является расположение термоэлектрического генератора в выходном тракте. Существуют различные варианты расположения ТЭГ в выходном устройстве ГТУ: интегрированная в проточную часть система рекуперации тепла ГТУ, система рекуперации тепла ГТУ с дефлектором и распределенным выходным устройством; система рекуперации тепла ГТУ с дефлектором и прямооточным выходным устройством. Охлаждение модуля осуществляется жидкой средой, которая приводится в движение питаемым от термоэлектрического генератора насосом. За счет использования циркуляции жидкой среды обеспечивается перепад температур больший, чем в системах с теплоотводом «естественной» конвекцией или пассивным теплообменом. Форма канала выходного тракта может быть интегрирована под потребности дополнительных систем рекуперации. Особое внимание уделяется применению предложенной конструкции ТЭГ в составе когенерационных энергоустановок на базе МГТУ. Отмечается, что применение термоэлектрического генератора позволяет повысить эффективность преобразования химической энергии топлива в электрическую на 3–5%. Данный прирост является значительным, так как МГТУ обычно менее эффективны, чем генераторы большего размера.

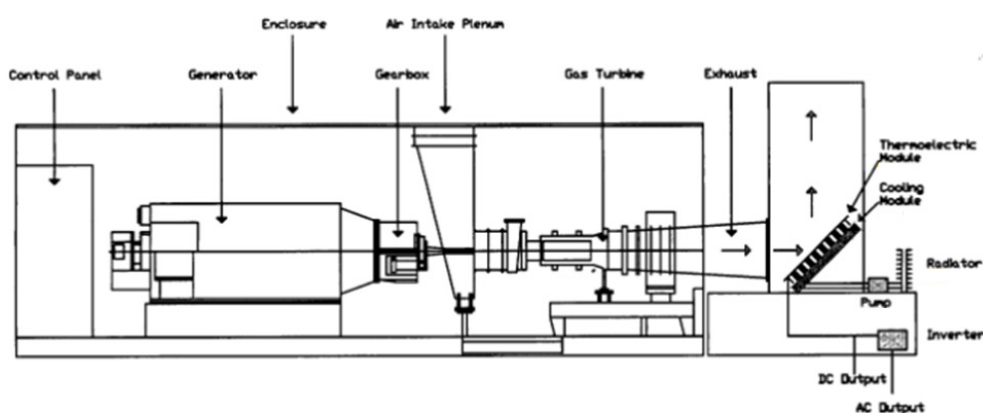


Рис. 8. Варианты конструкций ГТУ с термоэлектрическим генератором в выхлопном устройстве [18]

Fig. 8. Variants of GTU designs with a thermoelectric generator in the exhaust device [18]

Развитие концепции ТЭГ, интегрированного в систему когенерации нашло отражение в работе [19]. Схема установки представлена на рис. 9. Выходная мощность МГТУ составляет 100 кВт, электрический КПД 30%. Расход газа на выходе из МГТУ составлял 0,8 кг/с, при температуре 270 °С. В качестве целевого значения вырабатываемой электрической мощности было установлено значение в 500 Вт. Подобное увеличение выходной мощности позволяет сбалансировать потенциальное снижение эффективности МГТУ при работе на дроссельных режимах. В ходе работ были предложены три подхода к интеграции горячего спая термоэлектрического генератора с прочной частью МГТУ (рис. 9).

Рассматривался подход с подводом тепла к ТЭГ: непосредственно от корпуса выходного устройств МГТУ, при помощи трубчатого теплообменника; через тепловые трубки (рис. 10). Основная проблема, возникшая в ходе реализации проекта, заключалась

в увеличении гидравлического сопротивления затурбинного тракта. Рост гидравлического сопротивления приводил к падению мощности турбины. Наименьшие потери вносились в случае, когда термоэлектрические батареи размещались непосредственно на корпусе МГТУ, а минимальные габариты имела система с трубчато-ребристым теплообменником.

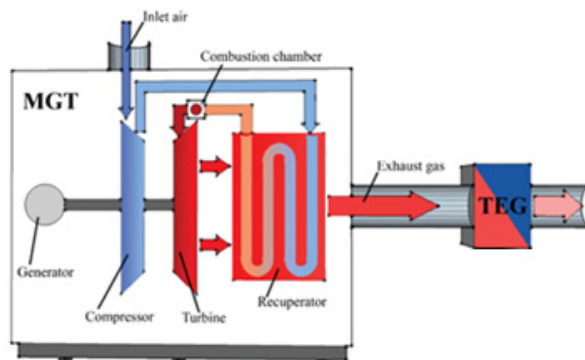


Рис. 9. МГТУ с утилизацией тепла [19]

Fig. 9. Microturbine with heat recovery [19]

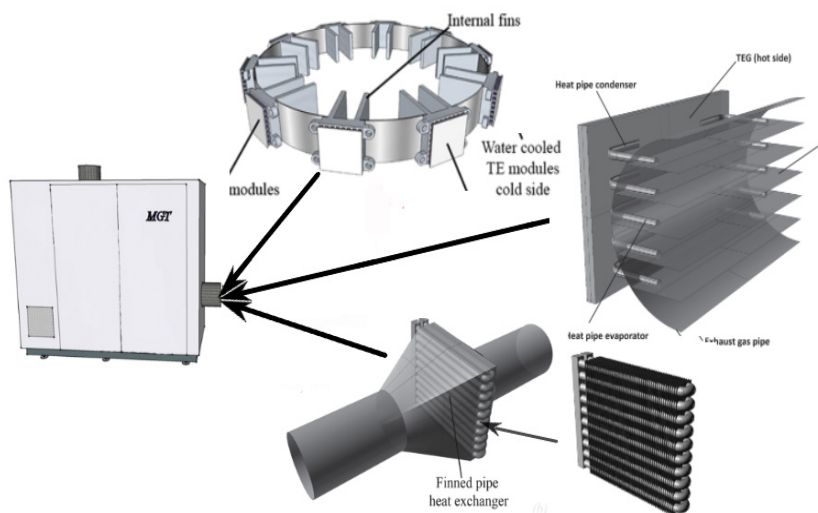


Рис. 10. Интеграция «горячей» стороны термоэлемента с проточной частью МГТУ:

*а – подвод тепла от корпуса ВУ МГТУ; б – подвод тепла через трубчатый теплообменник;*

*в – подвод тепло через тепловые трубки [19]*

Fig. 10. Integration of the «hot» side of the thermoelectric element with the flow part of the microturbine:

*a – heat supply from the housing of the Microturbine; б – heat supply through a tubular heat exchanger;*

*в – heat supply through heat pipes [19]*

На рис. 11 представлена конструкция одноконтурного ГТД с интегрированным в затурбинный корпус термоэлектрическим генератором [20]. Батарея термоэлементов размещается в проточной части ГТУ. Подвод тепла к горячему спаю осуществляется непосредственно от потока рабочего тела. Охлаждение элементов производится теплоотдачей в корпус. Теплопроводящая способность холодного спаю увеличивается за счет нанесенного покрытия. В качестве материалов термоэлемента может выступать теллурид висмута, теллурид кремния, германия и кадмия. Предложенная конструкция термоэлектрического генератора может быть использована в газотурбинных двигателях различных схем (турбореактивном двухконтурном двигателях (ТРДД), турбовальном двигателе ТВаД). При этом ТЭГ может быть расположен внутри корпуса турбины, в местах подвода охлаждающего воздуха, затурбинном корпусе или вокруг газотурбинного двигателя. Вырабатываемая электрическая энергия может быть направлена на питание датчиков или вспомогательного оборудования турбины.

В работе [21] рассмотрен вопрос интеграции высокотемпературного ТЭГ в цикл ГТУ.

В качестве источника тепла принималась ГТУ General Electric MS6001FA. Температура источника тепла принималась равным 1723 К. В расчетных исследованиях варьировались эффективность преобразования в термоэлектрическом генераторе в диапазоне 5–20 %, температура на входе в турбину варьировалась в диапазоне 600–1600 К. В ходе расчетов варьировалась суммарная степень сжатия в ГТУ, с последующей оптимизацией с целью обеспечения максимальной мощности.

При использовании ТЭГ в качестве дополнительного источника тепла в газовом цикле обеспечивался существенный прирост КПД. Отмечается, что изменение рабочих температур в цикле ГТУ имеет больший эффект, чем изменение значения эффективности преобразования в ТЭГ. По результатам расчетов существенный прирост эффективности обеспечивался для ГТУ при температуре на входе в турбину в диапазоне 900–1200 К. Уровень влияния на КПД энергоустановки при температуре на входе в турбину равной 900 К составлял порядка 30%, а при температуре 1200 К данный эффект ограничивался значением в 10%.

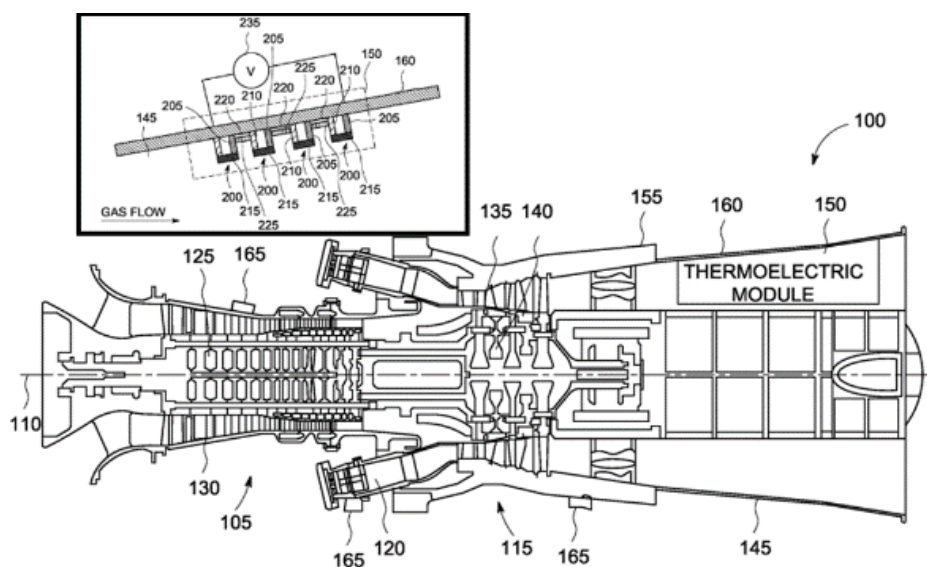


Рис. 11. Конструкция ГТУ со встроенным ТЭГ [20]

Fig. 11. The design of the GT with a built-in TEG [20]

По мнению исследователей, внедрение системы подобного рода целесообразно в случаях, когда технические и экономические ограничения не позволяют выбрать оптимальную соответствующей степени сжатия температуру.

Продолжением работ в данном направлении стало исследование по применению в ТЭГ в качестве дополнительного источника тепла для цикла паровой турбины [22]. Несовпадение между температурой сгорания топлива 2250 К и максимальной эксплуатационной температурой пара высокого давления 900 К, открывает потенциал для применения ТЭГ в парогазовых циклах. В результате исследований было найдено оптимальное соотношение максимальной выходной мощности и максимальной эффективности преобразования, для термоэлектрического генератора и паровой турбины. Максимальная мощность, которую способна преобразовывать комбинированная система, обеспечивалась при температуре выше 700 К и при ресурсе более 10000 тыс. часов.

Применение термоэлектрических генераторов рассматривалось при разработке системы рекуперации тепла для судовой ГТУ

Rolls-Royce MT30 [23]. Схема установки для рекуперации тепла MT30 представлена на рис. 13. В результате расчетно-аналитического исследования, обеспечивалась экономия топлива на 20%. Однако затраты на использование системы рекуперации CO<sub>2</sub> с интегрированными ТЭГ, выступают основным ограничением для дальнейшего развития системы подобного рода. Это обуславливается высокой стоимостью высокотемпературных термоэлектрических батарей.

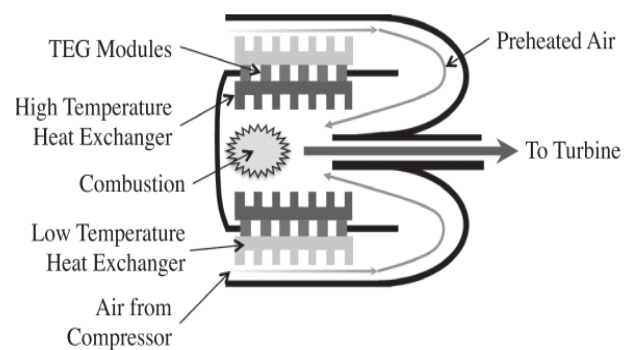


Рис. 12. Вариант конструктивного исполнения ГТУ с интегрированным ТЭГ [22]

Fig. 12. A variant of the design of the GT with an integrated TEG [22]

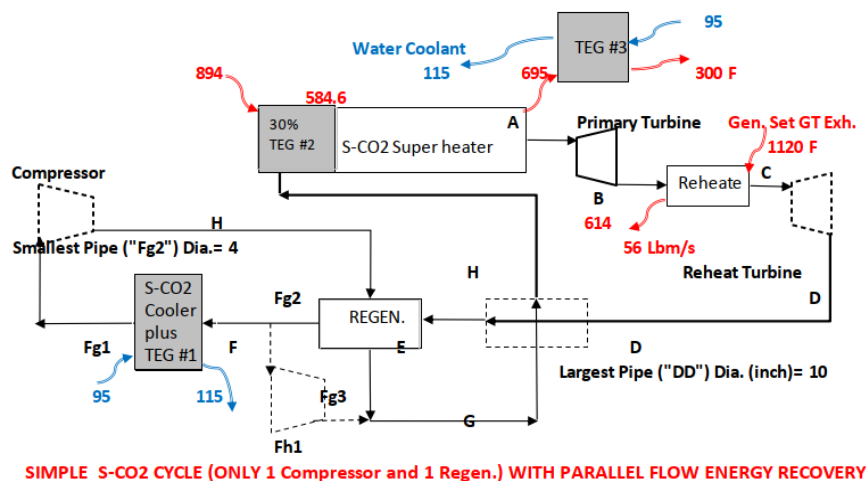


Рис. 13. Цикл утилизации тепла с рабочим телом CO<sub>2</sub> [23]

Fig. 13. Heat recovery cycle with CO<sub>2</sub> working fluid [23]

### Вывод

Утилизация отработанного тепла выхлопных газов ГТУ является актуальной научно-технической задачей. Анализ работ показывает, что для решения этой задачи может быть использован термоэлектрический метод преобразования энергии. Эффективность преобразования в термоэлектрическом генераторе определяется добротностью материала батареи  $ZT$  и располагаемым перепадом температур, а выходная мощность доступной площадью размещения и мощностью теплового потока, проходящего через спай термоэлементов. В настоящее время наиболее распространенными термоэлектрическими модулями, являются термобатареи из сплавов висмута и сурьмы, работающие в диапазоне температур от 30 °С до 200 °С. Модуль размером 40×40 мм обладает удельной мощностью 0,6 Вт/см<sup>2</sup> при КПД преобразования 6%.

В настоящее время основные принципы и технологии применения ТЭГ в качестве рекуператоров тепла сформулированы. В большинстве представленных работ достигнута совместимость, позволяющая обеспечить эффективную интеграцию и взаимодействие ТЭГ и ГТУ. По результатам проанализированных исследовательских работ внедрение ТЭГ обеспечивало прирост электрического КПД ГТУ. Однако высокие эксплуатационные затраты, связанные с внедрением высокотемпературных модулей, не позволили реализовать проекты в железе. Оптимальным источником «тепла» для ТЭГ интегрированного ГТУ выступали: корпусные элементы и поток рабочего тела. В качестве охлаждающей среды предпочтительно использование жидких хладагентов.

Перспектива дальнейшего применения ТЭГ, помимо описанных выше подходов, может быть сопряжена с реализацией новых концепций малоразмерных ГТУ. Это связано с лучшими массо-габаритными и экономическими характеристиками низкотемпературных термоэлектрических модулей.

Предварительная оценка по внедрению ТЭГ в конструкцию ГТУ, позволяет утверждать, что применение ТЭГ в качестве рекуператоров тепла, позволит повысить электрический КПД МГТУ. Это является актуальной задачей, так как в МГТУ в силу конструктивных особенностей реализуются невысокие параметры цикла. Совершенствование характеристик потребует проведения комплексного исследования: анализа существующих конструкций вспомогательных силовых установок; рассмотрения вопроса интенсификации теплообмена в контексте обеспечения оптимального режима работы ТЭГ и моделирования теплового состояния ГТУ с интегрированными термоэлектрическими элементами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фокин Г. А., Забелин Н. А., Иванов В. М., Смирнов М. В. Комплексные энерго- и ресурсосберегающие решения, применяемые на объектах ООО "Газпром трансгаз Санкт-Петербург" // Газовая промышленность. 2018. № 6 (769). С. 96–102.
2. Марченко О. В., Кашин А. П., Лозбин В. И., Максимов М. З. Методы расчета термоэлектрических генераторов. Новосибирск: Наука, 1995. 218 с.
3. Jaziri N., Boughamoura A., Muller J., Mezghani B., Tounsi F., Ismail M. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications // Energy Reports. 2020. V. 6, Iss. 7. P. 264–287. DOI: 10.1016/j.egy.2019.12.011.
4. Reddy B. V. K., Barry M. M., Li J., Chyu M. K. Thermoelectric-hydraulic performance of a multistage integrated thermoelectric power generator // Energy conversion and management. 2014. V. 77. P. 458–468. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.09.040.
5. Hinterleitner B., Knapp I., Ponder M., Shi Y., Muller H., Eguchi G., Eisenmenger-Sittner C., Stoger-Pollach M., Kakefuda Y., Kawamoto N., Guo Q., Baba T., Mori T., Ullah S., Chen X.-Q., Bauer E. Thermoelectric performance of a metastable thin-film Heusler alloy // Nature. 2019. V. 576, No. 7785. P. 85–90. DOI: 10.1038/s41586-019-1751-9.
6. Novitskii A., Serhienko I., Kolesnikov E. A., Zakharova E., Voronin A., Khovaylo V. Ultrafast synthesis of Pb-doped BiCuSeO oxyselenides by high-energy ball milling // Materials Letters. 2020. V. 262. Article number 12718. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.127184.
7. Zhou C., Lee Y. K., Yu Y., bYUN s., Luo Zh.-Zh., Lee H., Ge B., Lee Y.-L., Chen X., Lee J. Y., Cojocaru-Miredin O., Chang H., Im J., Cho S.-P., Wuttig M., Dravid V. P., Kanatzidis M. G., Chung I. Polycrystalline

SnSe with a thermoelectric figure of merit greater than the single crystal // *Nature materials*. 2021. V. 20, No. 10. P. 1378–1384. DOI: 10.1038/s41563-021-01064-6.

8. Jang H., Kim J. B., Stanley A., Lee S., Kim Y., Park S. H., Oh M.-W. Fabrication of skutterudite-based tubular thermoelectric generator // *Energies*. 2020. V. 13, Iss. 5. Article number 1106. DOI: 10.3390/en13051106.

9. Burton M., Howells G., Atoyo J., Carnie M. Printed Thermoelectrics // *Advanced Materials*. 2022. V. 34, Iss. 18. Article number 2108183. DOI: 10.1002/adma.202108183.

10. Гарипов И. Р. Современные материалы для термоэлектрического преобразования и рекуперации отработанного тепла. М.: Издательство АЛЕФ, 2022. С. 115–123.

11. Liu W., Jie Q., Kim H. S., Ren Zh. Current progress and future challenges in thermoelectric power generation: From materials to devices // *Acta Materialia*. 2015. V. 87. P. 357–376. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.12.042.

12. Barako M. T., Park W., Marconnet A. M., Asheghi M., Goodson K. E. Thermal cycling, mechanical degradation, and the effective figure of merit of a thermoelectric module // *Journal of electronic materials*. 2013. V. 42, No. 3. P. 372–381. DOI: 10.1007/s11664-012-2366-1.

13. Арбеков А. Н. Автономная долгоресурсная малообслуживаемая замкнутая газотурбинная установка, работающая на органическом топливе // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2012. № 3–2 (34). С. 307–312.

14. Ремчуков С. С., Ярославцев Н. Л. Методика изготовления пластинчатого теплообменника для малоразмерного газотурбинного двигателя с использованием лазерной сварки // *Техника и технология машиностроения: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф.* 2019. 147 с.

15. Дадоян Р. Г., Михайлов А. Е., Ахмедзянов Д. А., Михайлова А. Б. Формирование облика рекуперато-

ра для малоразмерного ГТД с регенерацией тепла // *Вестник УГАТУ*. 2021. Т. 25, № 1 (91). С. 22–32.

16. Осипов И. В., Ремчуков С. С. Малоразмерный газотурбинный двигатель со свободной турбиной и теплообменником системы регенерации тепла в классе мощности 200 л. с // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26, № 2. С. 81–90.

17. Григорьев А. А., Нихамкин М. Ш., Воронов Л. В., Саженов Н. А., Полянин А. В. Экспериментальное исследование теплового состояния корпусов газотурбинных двигателей // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2014. № 2 (37). С. 86–98.

18. Hightower A. Turbine engine with thermoelectric waste heat recovery system // *Patent USA № 10/241,047*. Publ. 11.03.2004.

19. Miozzo A., Stefano B., Alberto F., Monica F. Microturbine and Thermoelectric Generator Combined System: A Case Study // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2017. V. 17, No. 3. P. 1601–1607. DOI: 10.1166/jnn.2017.13734.

20. Hariharan S., Keny M. A., Morey K. B. Turbulated arrangement of thermoelectric elements for utilizing waste heat generated from turbine engine // *U.S. Patent 2012031067-A1*. Publ. 9.02.2012.

21. Brady Knowles C., Lee H. Optimized working conditions for a thermoelectric generator as a topping cycle for gas turbines // *Journal of Applied Physics*. 2012. V. 112, No. 7. Article number 073515. DOI: 10.1063/1.4757008.

22. Yazawa K., Koh Y. R., Shakouri A. Optimization of thermoelectric topping combined steam turbine cycles for energy economy // *Applied energy*. 2013. V. 109. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.03.050.

23. Di Bella F. A. Gas turbine engine exhaust waste heat recovery using supercritical CO2 Brayton cycle with thermoelectric generator technology // *Energy Sustainability. American Society of Mechanical Engineers*. 2015. V. 56840. Article number V001T04A003.