

УДК 621.59

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КРИОГЕННЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ В СОСТАВЕ БАЛЛОНА С КРИОГЕННОЙ ЗАПРАВКОЙ

© 2026 Е.В. Благин, Д.А. Угланов, Е.В. Битерякова, В.В. Казандаев,
А.С. Клентак, А.Л. Лопатин, И.С. Павлихин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 04.02.2026

В статье представлено исследование эффективности использования термоэлектрических генераторов (ТЭГ), установленных на корпусе криогенной ёмкости, для утилизации низкопотенциального тепла и автономного энергоснабжения. Разработана комплексная математическая модель, описывающая сопряжённые процессы нестационарного теплообмена и работы термоэлектрических преобразователей. На основе численного моделирования выполнена оценка влияния конструктивных и эксплуатационных параметров системы на вырабатываемую мощность, КПД и суммарную произведённую работу. Результаты показали, что в рассматриваемых условиях максимальный перепад температур на ТЭГ не превышает 3 К, что приводит к низкому коэффициенту полезного действия (менее 1%). Несмотря на это, система способна выработать до 80 кДж электроэнергии за время газификации. Установлено, что ключевыми факторами повышения эффективности являются: использование материалов ТЭГ с минимальной теплопроводностью, повышение температуры окружающей среды, увеличение интенсивности внешнего теплообмена, снижение начальной температуры стенки баллона и поддержание высокого коэффициента его заполнения. Практическая значимость работы заключается в выявлении параметров для оптимизации систем рекуперации тепла на криогенных объектах с помощью термоэлектрических генераторов.

Ключевые слова: термоэлектрические генераторы (ТЭГ), криогенная ёмкость, тепловой поток, газификация криопродукта, математическое моделирование, утилизация низкопотенциального тепла.
DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-140-151
EDN: HRBITV

*Результаты работы получены при финансовой поддержке
Минобрнауки России (проект № FSSS-2024-0017).*

1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях развития чистой энергетики во многих странах наблюдается быстрый рост объёмов генерируемой электроэнергии из возобновляемых источников. При этом в энергосистеме возникают проблемы, связанные с переменным характером поставки энергии от источников ветровых и солнечных электростанций [1]. К числу перспективных технологий, способствующих успешной интеграции возобновляемой генерации, относятся системы хранения энергии большой мощности.

Хранение энергии на жидком воздухе (LAES) [2] приобрело известность как альтернатива существующим крупномасштабным решениям по хранению электроэнергии. LAES предлагает высокую объёмную плотность энергии, превосходя географические ограничения, которые мешают современным технологиям хранения энергии. Хотя сжижение воздуха изучалось в течение многих лет, концепция использования «криогеники» LAES в качестве метода хранения энергии была первоначально предложена в 1977 году [3] и недавно вновь привлекла внимание.

В процессе хранения жидкого воздуха (криогена) происходят потери энергии, которые можно предотвратить, используя термоэлектрические генераторы [4-6], расположенные на баллоне с криогенной заправкой. Термоэлектрические генераторы способны преобразовывать тепловые потоки, неизбежно возникающие при перепаде температур между криогенной ёмкостью и окружающей средой, в электрическую энергию.

*Благин Евгений Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей.
Угланов Дмитрий Александрович, доктор технических наук, профессор. E-mail: uglanov.da@ssau.ru
Битерякова Екатерина Михайловна, НОЦ ГДИ-209 (Научно-образовательный центр газодинамических исследований), инженер-конструктор.
Казандаев Василий Владимирович, инженер-конструктор.
Клентак Анна Сергеевна, доктор технических наук, доцент. E-mail: anna_klentak@mail.ru
Лопатин Алексей Леонидович, младший научный сотрудник,
Павлихин Иван Сергеевич, инженер-конструктор.*

Текущие исследования термоэлектрических генераторов в основном сконцентрированы на оптимизации геометрии [7,8], проверке возможности использования новых материалов в конструкции [9]. Так же проводят исследования по оптимизации конструкции термоэлектрических генераторов, изготовленных с использованием технологий печати, что обеспечивает низкую стоимость и масштабируемость производства [10].

Целью данной работы является анализ эффективности работы термоэлектрических генераторов, установленных на корпусе ёмкости с криогенной заправкой. Для достижения этой цели разработана математическая модель рабочего процесса, дополненная уравнениями теплового баланса ТЭГ и теплопередачи через них, позволяющая оценить влияние конструктивных и эксплуатационных параметров на вырабатываемую мощность, коэффициент полезного действия и суммарную произведённую работу.

Научная новизна исследования заключается в комплексном моделировании сопряжённых процессов: нестационарного теплообмена криогенной системы с окружающей средой и работы термоэлектрических преобразователей, интегрированных в этот тепловой тракт. В исследовательской среде существуют разработки с использованием термоэлектрических генераторов в системе хранения энергии на жидком воздухе [11], однако они нацелены на рассмотрение термодинамических параметров и не рассматривают процессы детально. Настоящее же исследование позволяет количественно оценить реальный, а не теоретически максимальный, энергетический потенциал ТЭГ в таких условиях.

Практическая значимость работы заключается в выявлении ключевых параметров для оптимизации систем утилизации низкопотенциального тепла на криогенных объектах с помощью термоэлектричества.

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Термоэлектрические генераторы обеспечивают прямое преобразование тепловой энергии в электрическую, минуя необходимость механического производства энергии [4–6]. В последние годы они привлекли внимание как источники «зеленой» энергии, поскольку позволяют использовать отработанное тепло, выделяемое в различных промышленных процессах. ТЭГ работают, используя термоэлектрические эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона. В твердом теле (полупроводнике) температурный градиент вызывает движение носителей заряда, т.е. электрического тока, который сопровождается выделением и поглощением тепла. Отсутствие движущихся частей позволяет ТЭГ работать без технического обслуживания в течение длительного времени.

Относительно низкая эффективность ТЭГ (обычно не выше 10–15 %) определяет специфические условия их использования. Термоэлектрические генераторы нашли применение в военной, аэрокосмической и приборостроительной отраслях для питания маломощного электронного оборудования, когда требуется длительная работа без технического обслуживания, а такие характеристики, как надежность, вес, удельное энергетическое содержание, удельная мощность и другие, важнее эффективности. Эффективность термоэлектрических генераторов становится второстепенной по отношению к другим характеристикам также в случаях, когда тепловая энергия либо имеется в избытке, так что ее не нужно сохранять, либо когда при нормальных условиях она теряется в окружающей среде. Например, термоэлектрические генераторы используются для электрохимической защиты газопроводов от коррозии, рекуперации тепла из выхлопных газов транспортных средств и тепла, выделяемого при сжигании или газификации.

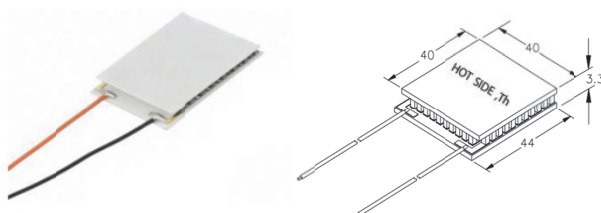


Рисунок 1 – Фото и схема используемого термоэлектрического генератора

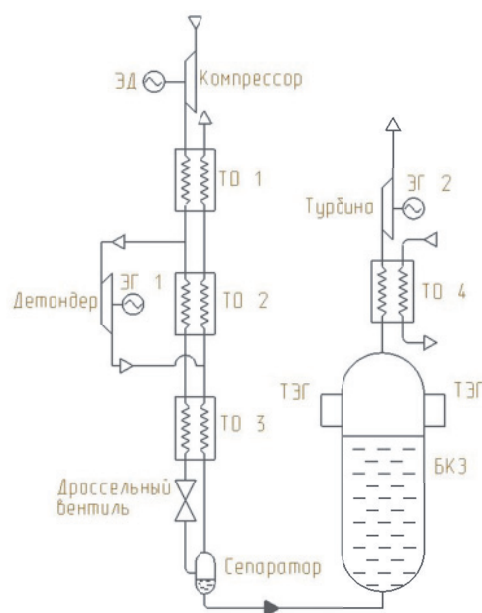


Рисунок 2 – Схема криогенной системы с БКЗ с ТЭГ на корпусе

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БАЛЛОНА С ТЭГ НА КОРПУСЕ

При расположении термоэлектрических генераторов на корпусе емкости с криогенной заправкой тепловой поток от окружающей среды перетекает сначала через термоэлектрические генераторы, после чего поступает во внешнюю стенку.

Уравнение теплового потока через термоэлектрический генератор:

$$Q_0 = \alpha_{\text{ТЭГ}} \cdot F_{\text{ТЭГ}} \cdot (T_{\text{окр}} - T_{\text{ТЭГ}}) \cdot \Delta\tau, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{ТЭГ}}$ – коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к термоэлектрическим генераторам;
 $F_{\text{ТЭГ}}$ – наружная площадь поверхности термоэлектрических генераторов (считаем, что они полностью покрывают корпус емкости);

$T_{\text{ТЭГ}}$ – температура наружной поверхности термоэлектрических генераторов.

Уравнение теплового баланса термоэлектрического генератора будет выглядеть следующим образом:

$$m_{\text{ТЭГ}} c_{\text{ТЭГ}} \left(\frac{T_{\text{ТЭГ}i} + T_{\text{ствнеш}i}}{2} - \frac{T_{\text{ТЭГ}i-1} + T_{\text{ствнеш}i-1}}{2} \right) = Q_0 - Q_1, \quad (2)$$

где $m_{\text{ТЭГ}}$ – суммарная масса термоэлектрических генераторов;

$c_{\text{ТЭГ}}$ – теплоемкость термоэлектрических генераторов.

Масса термоэлектрических генераторов определяется умножением массы одного генератора на их количество $N_{\text{ТЭГ}}$, которое можно определить следующим образом:

$$N_{\text{ТЭГ}} = \frac{F_{\text{внеш}}}{F_i},$$

где F_i – площадь контакта одного термоэлектрического генератора.

Тепловой поток Q_1 , проходящий через термоэлектрический генератор, определяется следующим образом:

$$Q_1 = \frac{\lambda_{\text{ТЭГ}}}{\delta_{\text{ТЭГ}}} \cdot F_{\text{ТЭГ}} \cdot (T_{\text{ТЭГ}} - T_{\text{ствнеш}}) \cdot \Delta\tau, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{ТЭГ}}$ – теплопроводность термоэлектрического генератора;

$\delta_{\text{ТЭГ}}$ – толщина термоэлектрического генератора.

Конвективный теплообмен между наружной стенкой и газом во внешней полости определяется следующим образом:

$$Q_2 = \alpha_{\text{Г1}} \cdot F_{\text{внеш}} \cdot (T_{\text{ствнеш}} - T_{\text{Г}}) \cdot \Delta\tau, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{Г1}}$ – коэффициент теплоотдачи между внешней стенкой и газовой полостью;

$T_{\text{Г}}$ – температура газа во внешней полости.

На энергетический баланс газа во внешней полости емкости влияют как тепловые потоки, так и массообмен с внутренней полостью:

$$c_{\text{вв}} \cdot ((m_{\text{Г}} + \Delta m_{\text{Г1}}) \cdot T_{\text{Г}i} - m_{\text{Г}} \cdot T_{\text{Г}i-1}) = Q_2 - Q_3 + c_{\text{рв}} \cdot \Delta m_{\text{Г1}} \cdot T_{\text{ж}}, \quad (4)$$

где $c_{\text{вв}}$ – изохорная теплоемкость воздуха;

$c_{\text{рв}}$ – изобарная теплоемкость воздуха;

$m_{\text{Г}}$ – масса газа, содержащаяся во внешней полости на начало временного шага;

$\Delta m_{\text{Г1}}$ – масса газа, поступившего из внутренней полости;

$T_{\text{ж}}$ – температура газа во внутренней полости;

Q_3 – количество теплоты, передаваемое от внешней газовой полости к теплоизоляции.

Количество теплоты, передаваемое от газовой полости к теплоизоляции, можно определить следующим образом:

$$Q_3 = \alpha_{\text{Г2}} \cdot F_{\text{из}} \cdot (T_{\text{Г}} - T_{\text{извнеш}}) \cdot \Delta\tau, \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{Г2}}$ – коэффициент теплоотдачи между газовой полостью и теплоизоляцией;

$F_{\text{из}}$ – площадь поверхности изоляции;

$T_{\text{извнеш}}$ – температура внешней поверхности теплоизоляции.

В отличие от стали, из которых состоят стенки, теплоизоляция обладает значительным термическим сопротивлением, вследствие чего необходимо различать температуры внешней и внутренней поверхности теплоизоляции. При это внутренняя поверхность будет непосредственно соприкасаться с материалом внутренней стенки, вследствие чего их температуры можно считать одинаковыми. Тогда тепловой баланс теплоизоляции будет выглядеть следующим образом:

$$m_{из} \cdot c_{из} \cdot \left(\frac{T_{извнеш} + T_{ствнут}i}{2} - \frac{T_{извнеш}i-1 + T_{ствнут}i-1}{2} \right) = Q_3 - Q_4, \quad (6)$$

где $m_{г}$ – масса теплоизоляции;

$c_{из}$ – теплоемкость теплоизоляции;

$T_{ствнут}$ – температура стенки внутренней емкости;

Q_4 – количество теплоты, передаваемое от теплоизоляции к стенке внутренней емкости.

Теплота, передаваемая через теплоизоляцию к стенке внутренней емкости, определяется следующим образом:

$$Q_4 = \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot F_{из} \cdot (T_{извнеш} - T_{ствнут}) \cdot \Delta\tau, \quad (7)$$

где $\lambda_{из}$ – теплопроводность теплоизоляции.

$\delta_{из}$ – толщина теплоизоляции теплоизоляции.

Теплота, потраченная на изменение температуры внешней стенки, будет численно равна разнице между количеством теплоты, поступившей от теплоизоляции, и количеством теплоты, передаваемым к внутренней емкости:

$$c_{ст} \cdot m_{ствнут} \cdot (T_{ствнут}i - T_{ствнут}i-1) = Q_4 - Q_5, \quad (8)$$

где Q_5 – количество теплоты, передаваемое от внутренней стенки к рабочему телу во внутренней полости.

$m_{ствнут}$ – масса внутренней стенки емкости.

Количество теплоты, передаваемое от внутренней стенки к рабочему телу внутри, определяется следующим образом:

$$Q_5 = \alpha_{внут} \cdot F_{внут} \cdot (T_{ствнут} - T_{ж}) \cdot \Delta\tau, \quad (9)$$

где $\alpha_{внут}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи во внутренней полости;

$F_{внут}$ – площадь поверхности внутренней емкости.

Теплота, подводимая к рабочему телу во внутренней полости, расходуется на нагрев жидкости и пара, а также на испарение части жидкости. Также учитывается отток газа из внутренней полости во внешнюю:

$$Q_5 - c_{рв} \cdot \Delta m_{г1} \cdot T_{ж} = r(p) \cdot (\Delta m_{г1} + \Delta m_{г2}) + c_{ж} \cdot ((m_{ж} - \Delta m_{г1} - \Delta m_{г2}) \cdot T_{жi} - m_{ж} \cdot T_{жi-1}) + c_{вв} \cdot ((m_{гвнут} + \Delta m_{г2}) \cdot T_{жi} - m_{гвнут} \cdot T_{жi-1}), \quad (10)$$

где r – теплота фазового перехода;

p – давление газа в емкости

$m_{гвнут}$ – масса газа во внутренней полости.

$m_{ж}$ – масса жидкости во внутренней полости.

$\Delta m_{г2}$ – масса испарившегося газа, оставшегося во внутренней полости.

Считаем, что жидкость и газ во внутренней полости находятся в состоянии равновесия, поэтому их температуры и давление равны. Это возможно только при условии их нахождения в состоянии насыщения, поэтому можно установить однозначную зависимость между температурой жидкости и давлением газа в емкости:

$$T_{ж} = f(p). \quad (11)$$

Для замыкания системы выразим определим объемы, занимаемые рабочими телами во внешней и внутренней полостях:

$$\frac{m_{г} + \Delta m_{г1}}{V_{г}} = \rho_{г}(p, T_{г}); \quad (12)$$

$$V_{внут} = \frac{m_{ж} - \Delta m_{г1} - \Delta m_{г2}}{\rho_{ж}(p)} + \frac{(m_{гвнут} + \Delta m_{г2})}{\rho_{п}(p)}. \quad (13)$$

Для определения режима работы емкости при газификации с подключенными термоэлектрическими генераторами на этапе газификации криопродукта необходимо решить систему уравнений с 15 неизвестными: $Q_0, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, T_{гг}, T_{ствнеш}, T_{г}, T_{извнеш}, T_{ствнут}, T_{ж}, p, \Delta m_{г1}, \Delta m_{г2}$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Таблица 1 – Исходные данные

Объем баллона	50 л
Высота внутренняя	1,094 м
Высота внешняя	1,118 м
Диаметр внутренний	0,249 м
Диаметр внешний	0,273 м
Масса заправляемой жидкости	1,8 кг
Модель ТЭГов	ТЕГ-127020-40Х44-200
Количество ТЭГов	753

Изменение температуры, давления и массы рабочего тела внутри баллона на данном режиме представлены на рисунках 3-5.

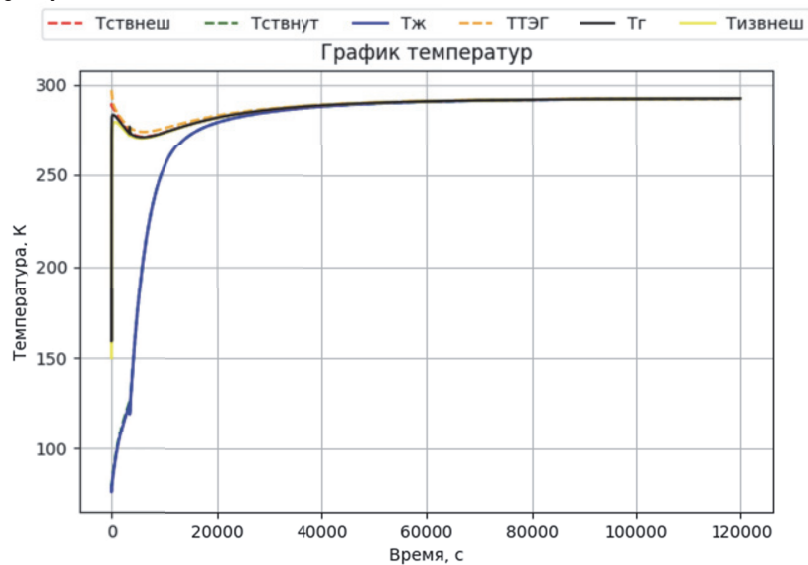


Рисунок 3 – Изменение температуры рабочего тела и материала емкости с течением времени с учетом работы ТЭГ

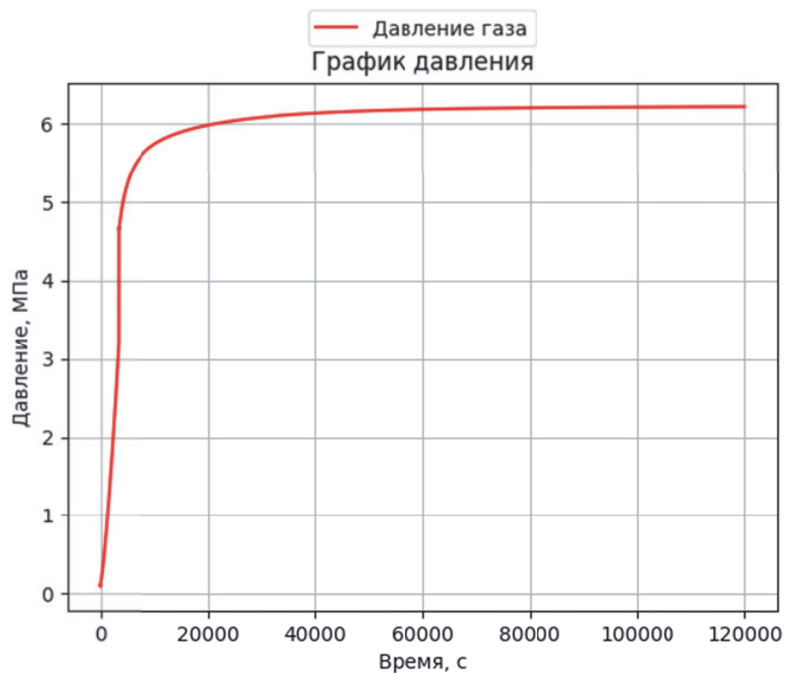


Рисунок 4 – Изменение давления рабочего тела с течением времени с учетом работы ТЭГ

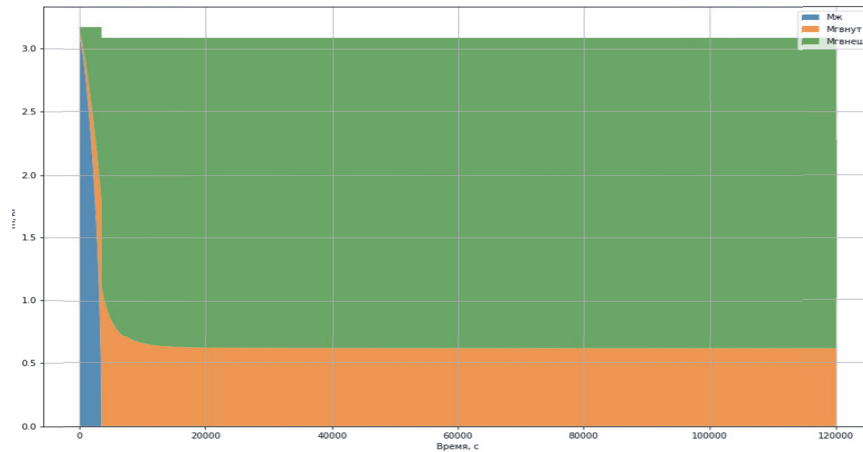


Рисунок 5 – Изменение массы рабочего тела, находящегося в разных полостях емкости с течением времени с учетом работы ТЭГ

График температуры на внешней и внутренней поверхности ТЭГ представлен на рисунке 6.

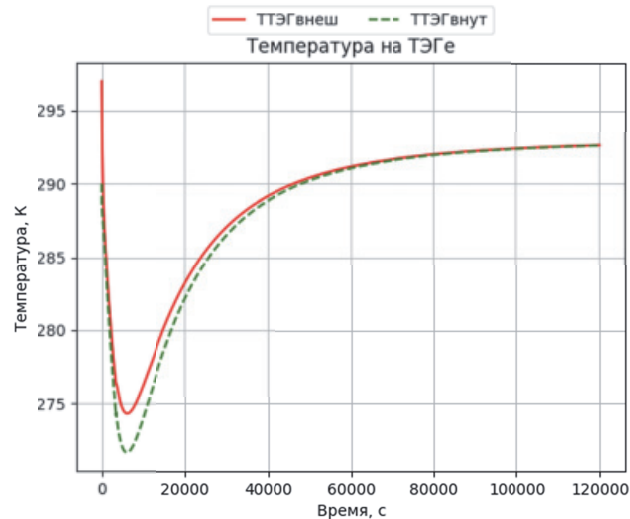


Рисунок 6 – Изменение температуры на наружной и внутренней поверхностях ТЭГ с течением времени

Как видно из графика, максимальный перепад температуры на ТЭГ равен порядка 3 К, что говорит о незначительной эффективности ТЭГ при заданных условиях. Режимы работы ТЭГ на других режимах будут рассмотрены далее.

Графики изменения мощности ТЭГ и их коэффициента полезного действия представлен на рисунках 7 и 8.

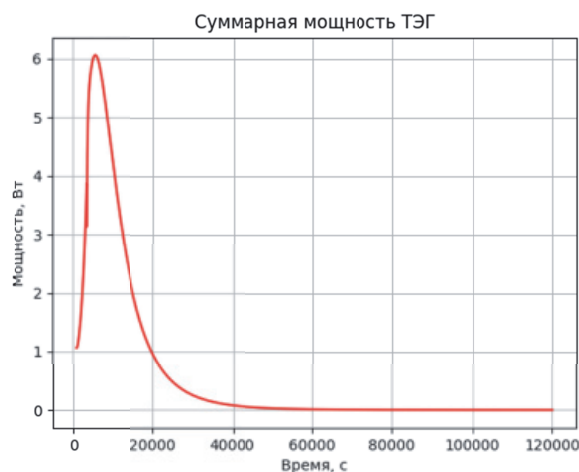


Рисунок 7 – Изменение суммарной мощности ТЭГ с течением времени

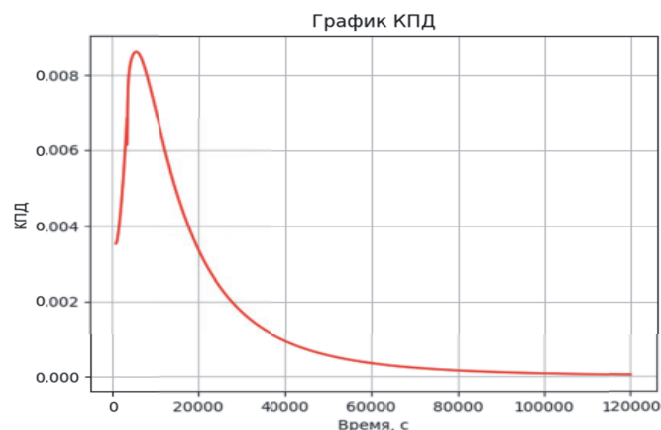


Рисунок 8 – Изменение КПД ТЭГ с течением времени

В начальный момент времени происходит настройка модели, поэтому значения мощности и КПД ТЭГ получаются аномально большими. В связи с этим начальный участок удален с графика. Анализ зависимостей показывает, что максимальная мощность и КПД ТЭГ достигаются в момент наибольшей разницы температур между ними (примерно 5000 с момента начала работы емкости). При этом КПД не достигает даже 1%, что позволяет сделать вывод о низкой эффективности работы ТЭГ в заданных условиях.

График изменения суммарной совершенной работы ТЭГ представлен на рисунке 9.

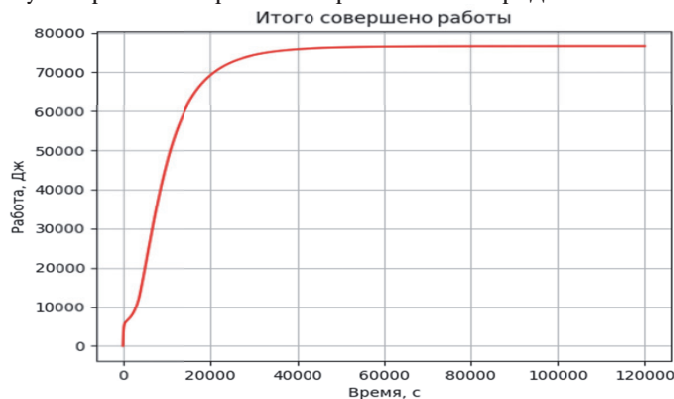


Рисунок 9 – Изменение совершенной работы с течением времени

Из анализа графика видно, что энергия активно вырабатывается примерно до 40000 с, после чего выходит на «полку» и ТЭГ практически не вырабатывает энергии. Тем не менее, даже с таким низким КПД ТЭГ выработали 80 кДж электроэнергии.

Влияние различных факторов на суммарную совершенную работу рассмотрено далее.

Сначала рассмотрим влияние свойств самого ТЭГ на эффективность работы установки (рисунок 10 и 11).

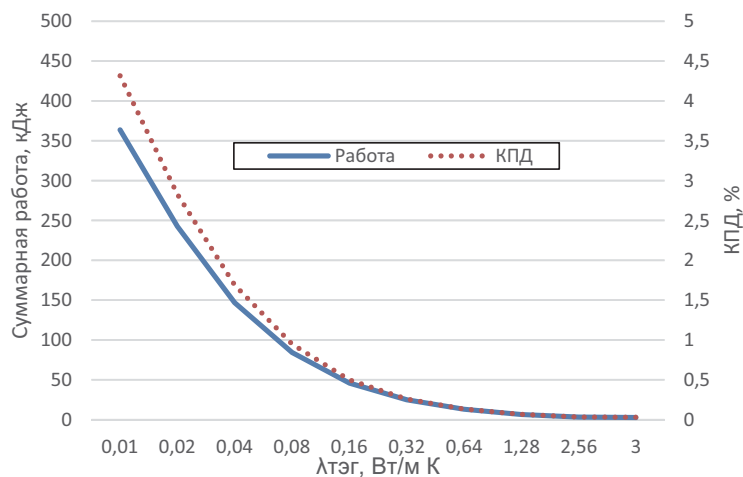


Рисунок 10 – Зависимость совершаемой работы и КПД термоэлектрических генераторов в зависимости от теплопроводности ТЭГ

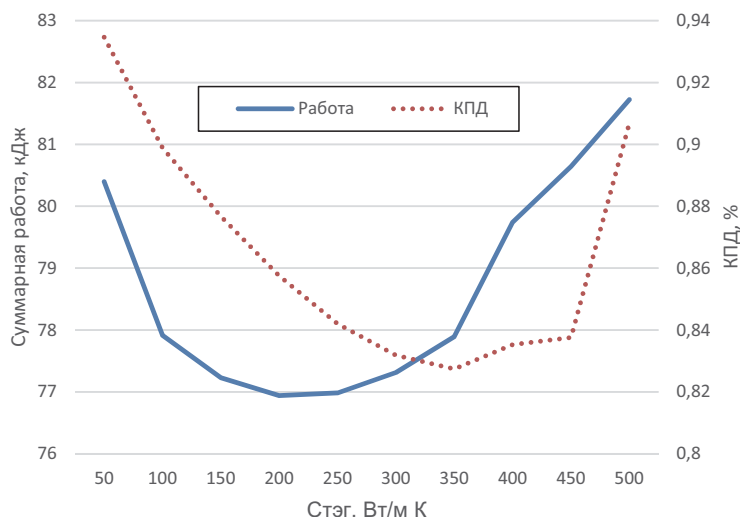


Рисунок 11 – Зависимость совершаемой работы и КПД термоэлектрических генераторов в зависимости от теплоемкости ТЭГ

При анализе зависимости работы и КПД от теплопроводности термоэлектрического генератора можно увидеть, что чем меньше теплопроводность, тем более эффективно работает ТЭГ. Это связано с тем, что с уменьшением теплопроводности увеличивается разница температур на сторонах ТЭГ, что в свою очередь повышает его КПД и вырабатываемую мощность. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при сравнении различных ТЭГ выбор должен отдаваться ТЭГ, сделанным из наименее теплопроводного материала.

При анализе влияния теплоемкости ТЭГ можно увидеть, что существуют явные минимумы по работе и КПД, при этом расположенные в различных областях значений теплоемкости. Однако стоит учитывать, что само изменение значений КПД и работы незначительно, и данные минимумы могут быть вызваны погрешностью расчета, а сама теплоемкость ТЭГ значимого влияния на результат не оказывает.

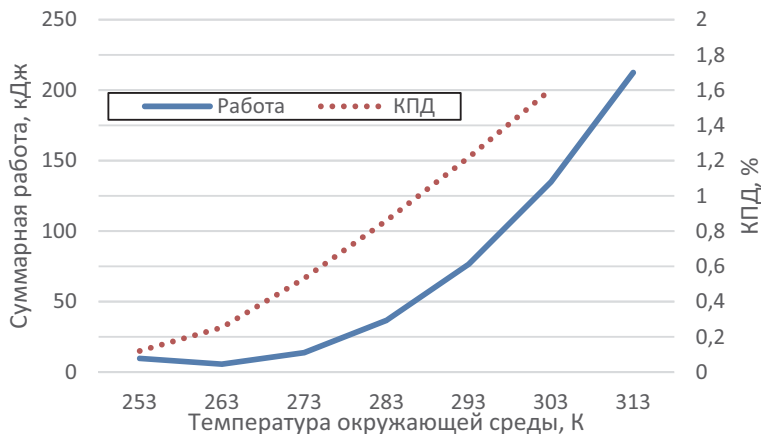


Рисунок 12 – Зависимость совершаемой работы и КПД термоэлектрических генераторов в зависимости от температуры окружающей среды

При оценке влияния температуры окружающей среды на работу ТЭГ (рисунок 12) можно отметить увеличение КПД ТЭГ с увеличением температуры окружающей среды. Это можно объяснить увеличением теплового потока, проходящего через ТЭГ, а также с увеличением разницы температур на сторонах ТЭГ.

Зависимость работы ТЭГ от свойств материала емкости представлена на рисунках 13 – 15.

Влияние теплоемкости стенки баллона на характеристики термоэлектрических генераторов можно объяснить следующим образом. Чем больше теплоемкость, тем медленнее будет меняться температура стенки, что означает меньшее понижение температуры стенки в процессе регазификации, и следовательно, меньшую разницу температур на сторонах ТЭГ и меньший КПД. С другой стороны, более медленный нагрев стенки будет приводить к тому, что большая разница температур будет дольше сохраняться на сторонах ТЭГ, что позволит дольше вырабатывать электроэнергию, что компенсирует понижение КПД.

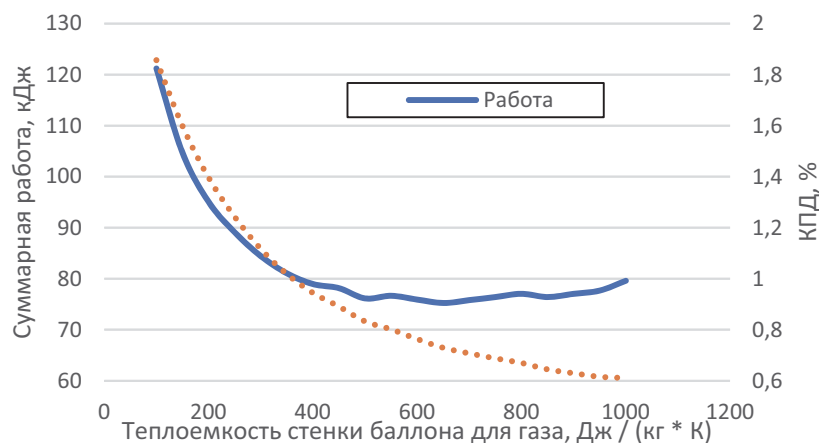


Рисунок 13 – Зависимость совершаемой работы и КПД термоэлектрических генераторов в зависимости от теплоемкости стенки баллона

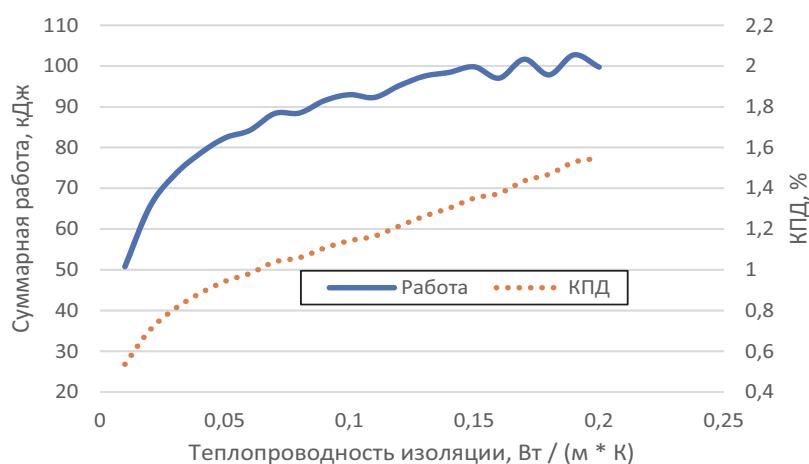


Рисунок 14 – Зависимость совершаемой работы и КПД термоэлектрических генераторов в зависимости от теплопроводности теплоизоляции

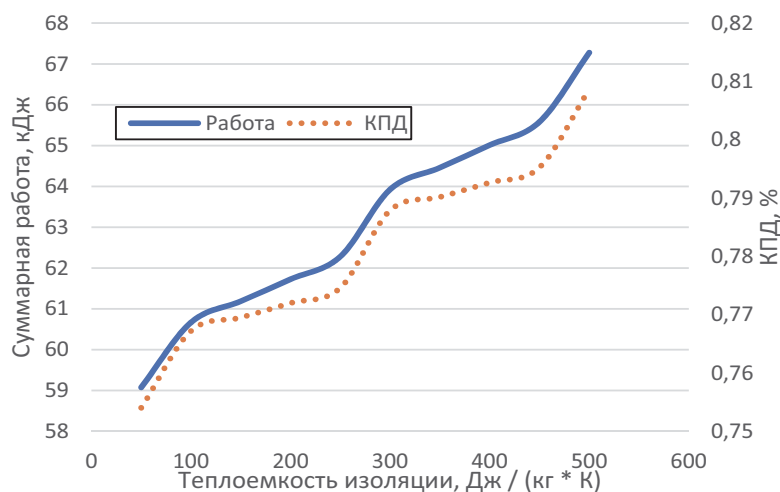


Рисунок 15 – Зависимость совершаемой работы и КПД термоэлектрических генераторов в зависимости от теплоемкости теплоизоляции

Повышение термического сопротивления теплоизоляции в баллоне за счет уменьшения её теплопроводности приводит к уменьшению общего теплового потока через емкость и, следовательно, к понижению КПД и работы, совершаемой ТЭГ. Теплоемкость изоляции в свою очередь, оказывает незначительное влияние на работу и КПД ТЭГ, так как несколько замедляет процесс, но незначительно.

Влияние коэффициента заполнения на характеристики ТЭГ проявляется следующим образом (рисунок 16). Уменьшение коэффициента наполнения приводит к более быстрому прогреву баллона, что приводит к тому, что минимальная температура внешней стенки выше, чем в случае более

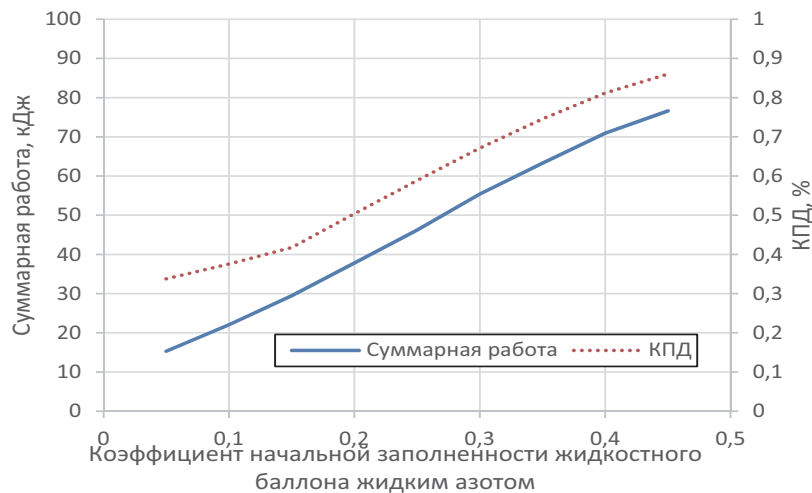


Рисунок 16 – Зависимость совершаемой работы и КПД термоэлектрических генераторов в зависимости от коэффициента наполнения баллона

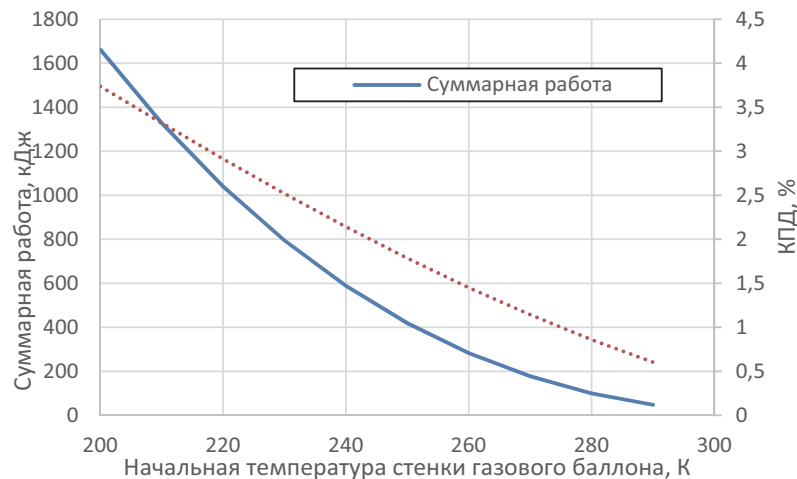


Рисунок 17 – Зависимость совершаемой работы и КПД термоэлектрических генераторов в зависимости от начальной температуры стенки баллона

полного наполнения, что в свою очередь приводит к уменьшению КПД ТЭГ. Кроме того, уменьшения коэффициента заполнения приводит к более быстрой газификации и уменьшению времени работы ТЭГ, что уменьшает суммарную работу.

Начальная температура стенки баллона значительно влияет на характеристики работы ТЭГ (рисунок 17). Ввиду значительной теплоемкости прогрев наружной стенки баллона занимает достаточно значительное время, в течение которого термоэлектрический генератор работает в благоприятных условиях, что выражается в повышении КПД и работы ТЭГ с понижением начальной температуры стенки баллона. В связи с этим, можно сделать вывод о целесообразности избегания перегрева баллона во время газификации.

Влияние интенсивности теплоотдачи между стенкой и газом представлено на рисунках 18 и 19

Анализ показывает, что интенсивность теплообмена между окружающей средой и внешней стенкой значительно влияет на эффективность работы ТЭГ, так как в значительной степени определяет тепловой поток, проходящий через ТЭГ. Увеличение этого теплового потока приводит к увеличению КПД ТЭГ и вырабатываемой работы.

С другой стороны, изменение интенсивности теплоотдачи между внешней стенкой и газом в газовой полости практически не влияет на эффективность и мощность ТЭГ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования был выполнен комплексный анализ эффективности работы термоэлектрических генераторов, установленных на корпусе ёмкости с криогенной заправкой. На основе разработанной математической модели были получены зависимости, характеризующие работу в процессе газификации криопродукта. На основании результатов расчётов можно сделать следующие выводы:

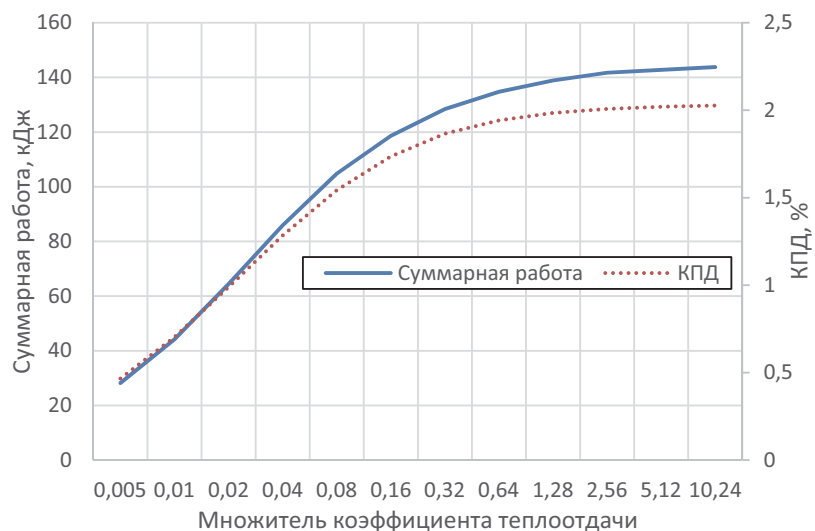


Рисунок 18 – Зависимость совершаемой работы и КПД термоэлектрических генераторов в зависимости от интенсивности теплоотдачи между наружной стенкой и окружающей средой

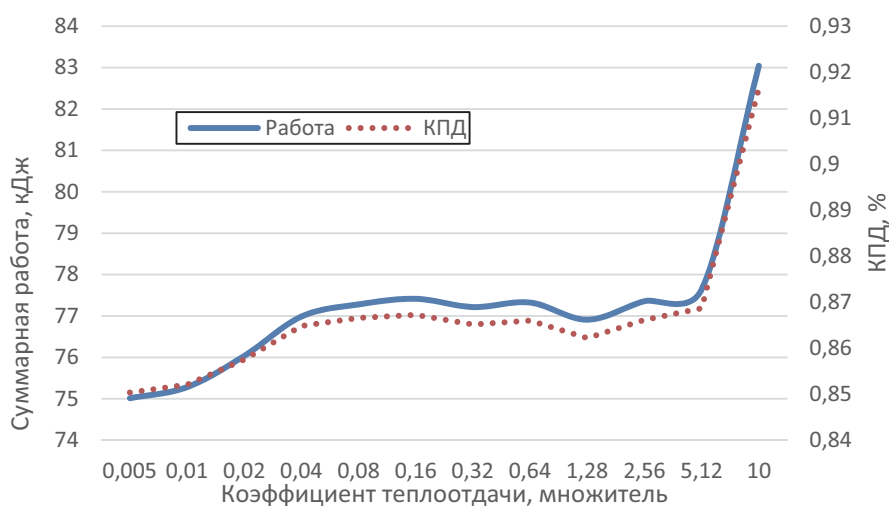


Рисунок 19 – Зависимость совершаемой работы и КПД термоэлектрических генераторов в зависимости от интенсивности теплоотдачи между наружной стенкой и газом в газовой полости

Максимальный перепад температуры на ТЭГ не превышает 3 К, что приводит к коэффициенту полезного действия менее 1%. Однако, даже при таком низком КПД, система способна выработать до 80 кДж электроэнергии за время работы.

Снижение теплопроводности материала ТЭГ увеличивает перепад температур на сторонах генератора, что напрямую повышает КПД и вырабатываемую мощность.

Повышение температуры окружающей среды усиливает тепловой поток через систему, увеличивая как перепад температур на ТЭГ, так и его КПД.

Интенсивность теплоотдачи между средой и внешней стенкой напрямую определяет количество тепла, проходящего через ТЭГ, и существенно влияет на его производительность.

Более низкая начальная температура стенки баллона продлевает период значительного перепада температур на ТЭГ, повышая суммарную выработанную работу.

Для повышения эффективности необходимо в первую очередь выбирать материалы ТЭГ с минимальной теплопроводностью и максимизировать теплоприток от окружающей среды в допустимых пределах. Одновременно следует минимизировать начальную температуру конструкции и поддерживать высокий коэффициент заполнения криогенной ёмкости.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Результаты работы получены при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2024-0017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Ren, J. Liu, J. Wan, Y. Guo, D. Yu Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions // *Applied Energy*. – 2017. Vol. 204. – P. 47-65. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.06.098.
2. Vecchi A., Li Y., Ding Y., Mancarella P., Sciacovelli A. Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives // *Advances in Applied Energy*. – 2021. – Vol. 3. – Art. 100047. – 24 p. – DOI: 10.1016/j.adapen.2021.100047
3. Storage of Electrical Energy Using Supercritical Liquid Air E.M. Smith, BSc, PhD, CEng, Volume 191, Issue 1. – DOI: 10.1243/PIME_PROC_1977_191_035_02
4. D.M. Rowe (Ed.), *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1995.
5. D.M. Rowe (Ed.), *Thermoelectric Handbook: Macro to Nano*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2006.
6. D.M. Rowe (Ed.), *Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2012
7. Chen W.H., Bandala A.A., Luo D., Ubando A. T., Uribe M. C., Mallari M. C. O. A review of next-generation thermoelectric generators: Advanced geometric and nanomaterial optimization and intelligent performance enhancement // *Energy Conversion and Management*: X. – 2025. – Vol. 28. – P. 101221. – DOI: 10.1016/j.ecmx.2025.101221.
8. Zhang C., Ling G. Multiphysics simulation and optimization of baffle geometry for enhanced performance in automotive thermoelectric generator systems // *Results in Engineering*. – 2025. – Art. 105822. – DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105822
9. Toan N. V., Li Y., Tuoi T. T. K., Sabran N. S., Kiat J. H., Voiculescu I., Ono T. Thermoelectric generator using nanoporous silicon formed by metal-assisted chemical etching method // *Energy Conversion and Management*. – 2025. – Vol. 323. – P. 119268. – DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119268.
10. Khan M.I., Franke L., Rosch A.G., Mallick M.M., Lemmer U. Design and optimization of printed thermoelectric generators for integration into plate heat exchangers in district heating applications // *Energy Conversion and Management*. – 2025. – Art. 119834. – DOI: 10.1016/j.enconman.2025.119834
11. Zhou, Y. Performance study on a new solar aided liquid air energy storage system integrated with organic Rankine cycle and thermoelectric generator / Y. Zhou, L. Duan, X. Ding, M. Li, C. Gao // *Journal of Energy Storage*. – 2023. – V. 59. – P. 106566. – DOI: 10.1016/j.est.2022.106566

**INVESTIGATION OF CRYOGENIC THERMAL ELECTRIC GENERATORS
OPERATION COUPLED TO CRYOGENIC FUELING TANK**

© 2026 E.V. Blagin, D.A. Uglanov, E.V. Biteryakova, I.S. Pavlikhin, V.V. Kazandaev,
A.S. Klentak, A.L. Lopatin, I.S. Pavlikhin

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

This article presents a study of the efficiency of using thermoelectric generators (TEGs) mounted on the body of a cryogenic tank to recover low-grade heat and provide autonomous power supply. A comprehensive mathematical model has been developed that describes the combined processes of transient heat transfer and the operation of thermoelectric converters. Based on the calculations, the design and operational parameters of the system are assessed for generated power, efficiency, and total work performed. The results show that under the considered conditions, the maximum temperature drop across the TEG does not reach 3 K, resulting in a low efficiency (less than 1%). Despite this, the system is capable of generating up to 80 kJ of electricity during gasification. Key factors for improving efficiency have been established: using TEG materials with minimal thermal conductivity, increasing the ambient temperature, increasing the degree of external heat transfer, reducing the initial cylinder temperature, and maintaining a high fill factor. The practical innovation of this work lies in determining parameters for optimizing heat recovery systems at cryogenic facilities using thermoelectric generators. *Keywords:* thermoelectric generators (TEGs), cryogenic capacity, atmospheric flow, cryogenic product gasification, mathematical modeling, low-grade heat recovery.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-140-151

EDN: HRBITV

*Evgeny Blagin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines.
Dmitry Uglanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor. E-mail: uglanov.da@ssau.ru
Ekaterina Biteryakova, Scientific and Educational Center for Gas Dynamic Research-209, Design Engineer.
Vvsilii Kazandaev, Design Engineer.
Anna Klentak, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor. E-mail: anna_klentak@mail.ru
Aleksey Lopatin, Junior Researcher,
Ivan Pavlikhin, Design Engineer.*