

Т. Шарипов¹, Г. Таткеева¹, А. Мехтиев¹, Б. Калбаев²

¹Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина,
Астана, Казахстан

²Алматинский государственный колледж энергетики и электронных технологий,
Алматы, Казахстан
E-mail: kalbayev_bk@mail.ru

УТИЛИЗАЦИЯ ОТРАБОТАННОГО ТЕПЛА И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЕГО В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Аннотация. В основных секторах потребления энергии включаются жилищное строительство и транспорт. В каждом из них часть потребляемой энергии обычно используется и обычно выбрасывается в окружающую среду в виде тепла, известного как отходы. Сначала подход заключается в оптимизации процессов для снижения расходов топлива. Затем, если остается остаточное отходное тепло, акцент смещается на превращение этого тепла в электричество для повышения эффективности. Для этой цели разрабатываются несколько технологий, таких как двигатель цикла органического Ранкина и концепция Турбосол, основанная на квазизотермическом расширении смеси воды и масла в сопле. Кроме того, продолжаются разработки поршневых двигателей на основе циклов Стирлинга, Эрикссона и Джоуля, объединенных под общим названием внешне нагреваемых двигателей. Научные исследования также охватывают термоэлектрические и термомагнитные эффекты. В этой статье приводится неполный список этих технологий с описаниями и комментариями с целью оценить их потенциал и выявить текущие ограничения. Оценка различных технологий с точки зрения эффективности согласно первому закону оказывается недостаточной, что приводит к предложению новых критериев. Предлагается оценивать потребление тепловой энергии относительно доступной тепловой энергии. Кроме того, для оценки качества превращения тепловой энергии в электроэнергию предлагается оценивать выходную мощность, деленную на потребление доступного тепла. Кроме того, предлагается оценивать коэффициент восстановления эксергии на основе второго закона термодинамики. Эти новые критерии для диссипации тепла сравниваются с классическим первым законом эффективности в различных сценариях. В настоящее время одним из главных вызовов является генерация достаточного количества электроэнергии для обеспечения прибыльности. Также выдвигаются некоторые термоэкономические соображения, включая потенциальное воздействие налогообложения отходного тепла.

Ключевые слова. Термодинамика; энергия; равномерное распределение; энергетика; устойчивость.

Введение.

Основные отрасли-потребители энергии [1]. В каждом из них часть энергии обычно не используется полностью и выделяется в окружающую среду в виде тепла, называемого идущим теплом. Основным путем упорядочения процесса для уменьшения траты горючего топлива.

Вследствие этого есть превышение тепла, способ повысить эффективность - перестроить данное тепло в электроэнергию. Обычные тепловые электростанции основаны на цикле Хирна, используя воду в качестве рабочей силы. Источником тепла может быть уголь, газ или ядерные реакции. В случае атомной электростанции

максимальная температура воды, как правило, близка к 200°C, максимальное давление близко к 130 бар. Нателный диапазон мощности является 2000 МВт, а КПД подходит около 40%. Для других источников тепла температура рабочей жидкости выше, обычно от 400°C до 600°C. Максимальное давление близко к 220 бар для докритических циклов и выше 300 бар для сверхкритических циклов. Нижний диапазон мощности составляет 10 МВт, а КПД - от 36% до 42% [2]. В случае использования отработанного тепла температура источника тепла составляет менее 400°C, диапазон мощности - от 3 МВт и до 22 МВт [3]. В этом диапазоне мощности паровая турбина не приспособлена и нерентабельна.

В дополнение к этому формируется создание несколько технологий. Во-первых, методика натурального неотделимого цикла Ренкина. Она основана на классическом цикле парового двигателя. Затем появилась новая концепция.

Технология Турбозоль основана на процессе квазиизотермического расширения смеси воды и масла в форсунке. Также проводятся исследования в области поршневых двигателей, использующих циклы Стирлинга, Эрикссона и Джоуля. Все эти технологии известны как двигатели с внешним подогревом. Некоторые другие научные работы затрагивают термоэлектрический и термомагнитный эффекты. Цель данной статьи - проанализировать современное состояние техники с целью оценки их потенциала и выявления текущих пределов. Несмотря на доступные обзорные статьи, такие как обзор технологий утилизации избыточного промышленного тепла, опубликованный в 2014 году [4], с тех пор было опубликовано много новых материалов. Недавняя статья "Обзор термодинамических циклов, используемых в системах рекуперации при низких температурах за последние два года" [5] уделяет основное внимание технологии ORC.

Оценка системы восстановления отработанного тепла представляет собой довольно сложную задачу. Обычно оценивают только эффективность по первому закону термодинамики, что является недостаточным. В некоторых научных работах предлагается рассматривать использование отработанного тепла для производства электроэнергии с участием различных критериев [6, 7]. В разделе 3 предлагается установить некоторые критерии для анализа восстановления отработанного тепла. Эти критерии применяются для оценки характеристик эндореверсивного двигателя Карно, нацеленного на достижение максимальной выработки мощности.

Текущей основной проблемой является экономическая состоятельность технологии. Экономическим ограничением является обеспечение достаточного производства электроэнергии для обеспечения прибыльности. Термоэкономическая оптимизация использования отходящего тепла для производства электроэнергии является одним из актуальных направлений исследований в Центре Прикладной Термодинамики (ICAT) [8-10]. В завершающем разделе представлены различные термоэкономические соображения, включая воздействие налогообложения отходящего тепла. Эффективное использование отходящего тепла для производства электроэнергии является не только важным с экологической точки зрения, но и открывает новые возможности для промышленности, особенно с учетом растущего внимания к устойчивости и энергоэффективности. Вопросы термоэкономики и налогообложения отходящего тепла требуют дальнейшего изучения, чтобы поддержать развитие таких инновационных технологий.

Материалы и методы.

Инновационные решения для извлечения энергии из отходящего тепла при производстве электроэнергии.

Экологически двигатель и цикл Ренкина на сегодняшний день экологически двигатель, основанный на цикле Ренкина, является наиболее развитым решением. По

всему миру было установлено большое количество демонстрационных, прототипных и коммерческих двигателей. Обзор мирового внебиржевого рынка доступен в [3], в котором приведены основные данные о рециркуляции отработанного тепла. На данный момент существует 1073 установки Органического Цикла Ренкина (ORC), что общим образом соответствует 376 МВт установленной мощности [3]. На рисунке 1 показаны различные производители, из которых лидерство занимает компания Format. Кроме того, 65% от всей установленной мощности используется для рециркуляции тепла от дизельных или газовых двигателей и турбин [3]. Одним из главных ограничений коммерциализации ОРК является долгосрочная окупаемость. Органический цикл Ренкина представляет собой устойчивое и инновационное решение в области использования тепловой энергии. Несмотря на некоторые ограничения в коммерциализации, его потенциал в сокращении выбросов и повышении энергоэффективности делает его важным элементом в современной энергетике. Необходимо продолжить исследования, чтобы сделать эту технологию более конкурентоспособной и широко применимой в различных отраслях промышленности.

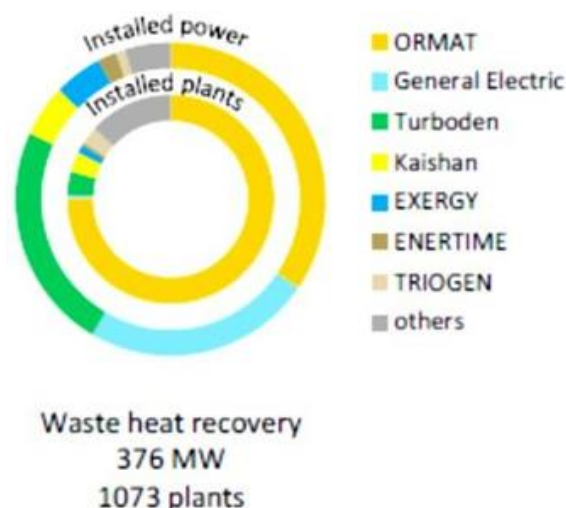


Рисунок 1 – Доля рынка в расчете на одного производителя [3]

В контексте исследований и разработок, основными проблемами сегодняшнего дня являются выбор оптимальной архитектуры [11] и рабочей жидкости [12], а также создание эффективного расширителя и оптимальное управление условиями эксплуатации. Научная литература в этой области обширна и разнообразна. В недавней статье была предложена стратегия, которая предполагает одновременный поиск оптимальной архитектуры ORC и условий ее эксплуатации (включая выбор рабочей жидкости) для рекуперации тепла в контексте утилизации отработанного тепла в промышленных процессах [13]. Исследования, ориентированные на улучшение архитектуры и условий эксплуатации ORC, а также разработку более эффективных рабочих жидкостей, принципиально важны для прогресса в области утилизации отработанного тепла. Предложенные стратегии и анализ сравнительной эффективности важны для выявления оптимальных параметров работы установок ORC.

Сравнение различных установок ORC на основе экспериментальных данных представлено в [14], показывая увеличение эффективности ORC с ростом мощности и температуры нагрева. Технология Турбозоль представляет интересный подход к преобразованию тепловой энергии, и ее потенциал для эффективного использования отходящего тепла для производства электроэнергии выглядит многообещающим. Сравнение с системами ORC позволяет оценить различия в эффективности и экономической целесообразности различных подходов к утилизации тепла.

Турбозоль - это технология, разработанная французской компанией Neveatech, которая представляет собой преобразователь тепловой энергии в электрическую [15]. Этот двигатель выполнен по принципу идеального цикла двигателя Карно и использует квазиизотермическое расширение рабочей жидкости для приведения в действие гидравлической турбины через специальное сопло. Прототип разрабатывается в помещениях Neveatech, и основной трудностью исследований является характеристика двухфазного сопла [16].

В отличие от ORC, Турбозоль работает при низком давлении, низкой скорости вращения и имеет короткий срок окупаемости. Это позволяет эффективно использовать отходящее тепло для производства электроэнергии, в качестве рабочей жидкости используя воду.

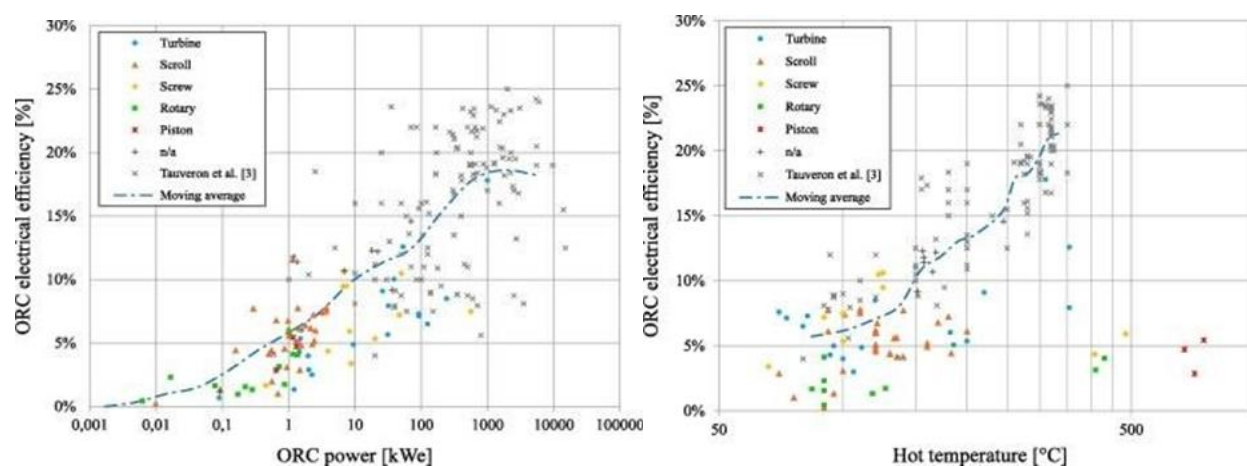


Рисунок 2 – Изменение электрической эффективности ORC в зависимости от (а) мощности ORC и (б) температуры нагрева [14]

Текущий спектр энергии составляет 20 до кВт, и ближайшем ожидается увеличение 500 кВт для носителей теп среднего высокого уровня температуры.

Это улучшение также рассматривается в установках ORC [17]. Анализ органического двигателя с расширением, наполненным жидкостью, представлен в [17]. Исследователи демонстрируют, что характеристики цикла лучше, чем у традиционного органического двигателя. Они также отмечают, что “пожелательней применять расширители с высоким объемным коэффициентом, такие как винтовые, чтобы получить преимущество от наличия большого количества смазочного масла в рабочей камере”. Однако экспериментальное исследование с винтовым расширителем показывает, что эффективность турбин ORC снижается с увеличением доли жидкости [12]. Для приближения к изотермическому расширению, доля жидкости должна быть высокой, поэтому два эффекта являются противоположными. Этот недостаток отсутствует как в случае гидравлической турбины, так и в случае Турбозоля. Развитие органических двигателей с расширением и технологий с нагретым воздухом обещает увеличить эффективность использования тепловой энергии, представляя устойчивые решения для повышения производительности и снижения потребления ресурсов. Дальнейшие исследования в этой области помогут преодолеть препятствия, связанные с эффективностью и конкурентоспособностью этих технологий на энергетическом рынке.

Двигатели с нагретым воздухом.

В ходе теоретического цикла Стирлинга рабочая жидкость последовательно:

1. Нагревается при постоянном объеме.
2. Расширяется при постоянной температуре.

3. Охлаждается при постоянном объеме.
4. Сжимается при постоянной температуре.

В процессе охлаждения при постоянном объеме тепло, выделяемое рабочей жидкостью, поглощается регенератором и накапливается в нем. При последующем нагревании рабочей жидкости это тепло передается ей из регенератора, что повышает эффективность цикла. Накопленное тепло возвращается рабочей жидкости при нагреве при постоянном объеме. Коэффициент полезного действия цикла Стирлинга при полной тепловой регенерации эквивалентен эффективности автомобиля без цикла.

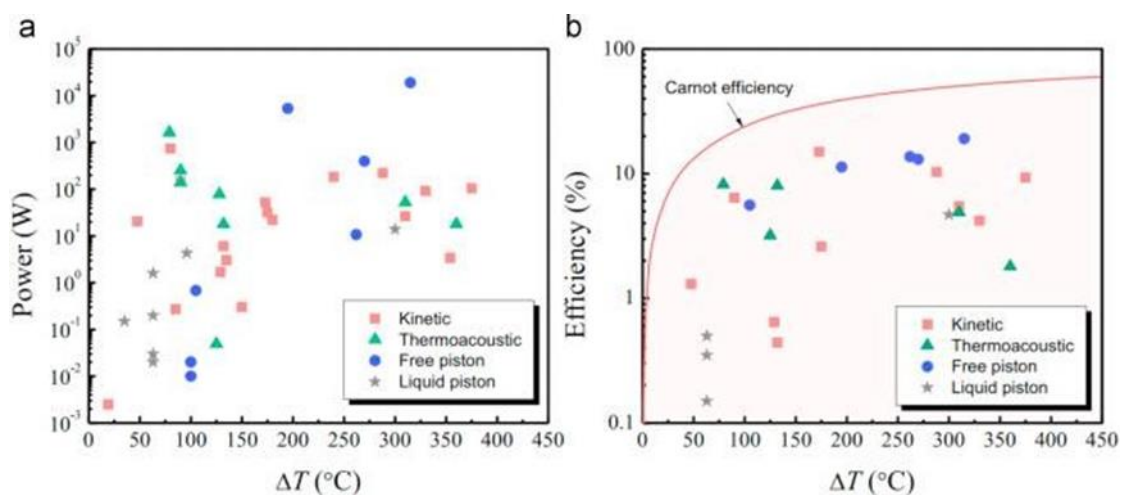


Рисунок 3 – Доступные экспериментальные результаты (а) мощности и (б) тепловой эффективности разработанных двигателей цикла Стирлинга [12].

Плодотворность цикла Стирлинга, основное преимущество, значительна в теории. Разновидности двигателей по данному циклу включают кинетические, термоакустические, свободнопоршневые и жидкостно-поршневые. Обзор, выполненный Kai Wand и соавторами в [12], предоставляет информацию о двигателях цикла Стирлинга, предназначенных для восстановления низких и умеренных температур. Экспериментальные результаты представлены на рисунке 3. Как отмечается, кинетический цикл Стирлинга эффективен для рекуперации тепла при низких и средних температурах. Гамма-конфигурация показывает хорошие результаты при низком температурном перепаде, а чаще всего используется воздух при атмосферном давлении.

По мнению авторов статьи [12], следует сосредоточиться на снижении издержек производства для двигателей с низким давлением и кинетических двигателей большой мощности, предназначенных для использования низкосортного тепла. Исследования в области двигателей по циклу Стирлинга представляют огромный потенциал для эффективного использования низкосортных источников тепла. В частности, различные разновидности таких двигателей – кинетические, термоакустические, свободнопоршневые и жидкостно-поршневые – предоставляют широкий спектр возможностей для применения в различных областях, начиная от альтернативных источников энергии до отопительных систем.

Также важным является акцент на разработке и снижении издержек производства для кинетических двигателей Стирлинга, так как они могут оказаться значительным шагом вперед в области энергосбережения и возобновляемых источников. В целом, перспективы использования двигателей по циклу Стирлинга представляют большой интерес, и дальнейшие исследования в этой области могут привести к значительным технологическим прорывам. Они также рекомендуют разработку кинетического двигателя Стирлинга для температур диапазоном от 250 до 450°C, с целью достижения компромисса

между эффективностью и экономической целесообразностью. Эксперименты по разработке термоакустического двигателя Стирлинга только начинаются. Из-за простоты конструкции, надежности и невысоких издержек, эта конфигурация обладает потенциалом для использования в низкотемпературном отводе тепла, которое обычно находится ниже 100 °С, обеспечивая при этом значительную масштабируемую мощность. Свободнопоршневой двигатель Стирлинга на данный момент оценивается как слишком дорогостоящий и сложный в производстве. Жидкостно-поршневой двигатель ограничен по мощности и характеризуется низким КПД [12].

Одной из основных проблем, с которой сталкивается двигатель по циклу Стирлинга, является необходимость находить компромисс между большой площадью и небольшим объемом теплообменника [11, 12]. В двигателе Стирлинга объем теплообменника считается неэффективным. В двигателе Эрикссона процессы нагрева и охлаждения происходят на обычных теплообменниках. Соответственно, “камеры сжатия и расширения, во время работы, изолированы от теплообменников” [13]. В процессе цикла Эрикссона теоретические преобразования включают в себя 2 изотермических процесса и 2 изобарических. Однако в обратимом случае теплопередача происходит при постоянном давлении, а сжатие и расширение - при постоянной энтропии, что соответствует циклу Джоуля.

Преимуществом двигателя Эрикссона с циклом Джоуля является соответствующее разделение переходов цикла Карно на составляющие. Однако клапаны разделяют различные компоненты и увеличивают сложность двигателя [13]. В настоящее время основная проблема двигателя Эрикссона с циклом Джоуля заключается в разработке стационарных [14] и динамических моделей [12] с оптимизацией [15] и созданием прототипа [13]. На данный момент его применение ориентировано на системы микро-ТЭЦ. Рекуперация отработанного тепла clearly не активна.

Термоэлектрический эффект

Система преобразования тепловой энергии в электрическую называется термоэлектрическим генератором (ТЭГ). Термоэлектрические материалы генерируют электрическое поле при градиенте температуры с использованием эффекта Зеебека. Термоэлектрический материал должен обладать низкой теплопроводностью, высокой электропроводностью, большим коэффициентом Зеебека и приемлемой стоимостью. Основной сложностью здесь является обеспечение всех этих свойств для одного и того же материала [16]. В некоторых недавних исследованиях изучалась возможность выработки термоэлектрической энергии через рекуперацию отработанного тепла [17-9]. Рабочий диапазон термоэлектрического генератора, описанного в этой статье, варьируется от Вт до кВт, и его характеристики невелики. Применения термоэлектрических генераторов рассмотрены в [3]. Автор приходит к выводу, что до настоящего времени “разработка TEGs ограничивалась пространственными параметрами” и “доказала свою высокую надежность”. Рекуперация отработанного тепла сильно отличается от этих применений, поскольку “источники тепла существенно не различаются, и поэтому материалы не подвергаются высокому термическому воздействию” [3]. Поэтому расширение возможностей рекуперации отработанного тепла не является прямым и требует дополнительных исследований и разработок.

Термомагнитный эффект

Термомагнитная генерация энергии (ТГЭ) основана на воздействии тепла на магнитные свойства ферромагнитных материалов вблизи температуры Кюри. Обзор структуры и характеристик термомагнитных устройств проведен в [11]. “Быстрое изменение намагниченности при определенной температуре может быть использовано для разработки устройства, преобразующего тепловую энергию в электрическую, прямо или через механическую энергию” [11]. Автор представляет два метода преобразования

тепловой энергии в электрическую. Первый метод основан на прямом преобразовании энергии с использованием активных термомагнитных устройств. Это технология, известная как магнитный генератор [12]. Второй метод основан на косвенном преобразовании энергии через механическую энергию с использованием пассивных термомагнитных устройств [13]. Эта технология известна как термомагнитный двигатель или двигатель Кюри. Автор показывает, что магнитные генераторы обладают более высокой эффективностью по сравнению с пассивными термомагнитными устройствами. Существуют ограничения, указанные в Центре прикладной термодинамики, для исследования возможности преобразования магнитокалорической энергии. Основная мысль автора заключается в том, что развитие ТГЭ зависит от появления магнитокалорических материалов с температурой Кюри выше 100°C [15]. Другая проблема заключается в разработке определенных прототипов [16].

Результаты.

Оценка технологий. Модель неперевсивного двигателя Карно.

Для преобразования отходящего тепла в электрическую энергию используется неперевсивная модель двигателя Карно. Это помогает определить верхний предел. Система внутри среды изображена на иллюстрации 4. Теплоносители и охлаждающие жидкости обычно выбрасываются в окружающую среду после прохождения через систему. Этот контекст рассматривается в данном случае.

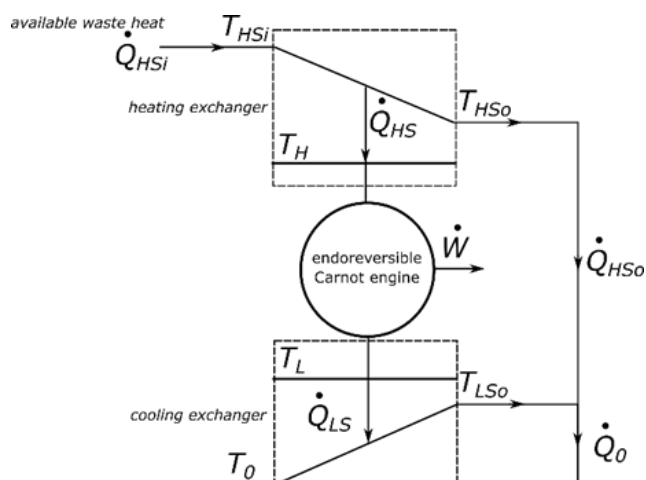


Рисунок 4 – Схема двигателя Карно в окружающей среде

Доступная тепловая мощность системы в окружающей среде может быть представлена следующим образом:

$$Q_{HSi} = \dot{m}_{HS} c_{pHS} (T_{HSi} - T_0).$$

Выходная тепловая мощность системы в окружающей среде может быть записана следующим образом:

$$Q_0 = Q_{HS0} + Q_{LS} = \dot{m}_{HS} c_{pHS} (T_0 - T_{HS0}) + \dot{m}_{LS} c_{pLS} (T_0 - T_{LS0}).$$

Входная тепловая мощность преобразователя составляет:

$$Q_{HS} = Q_{HSi} + Q_{HS0} = \dot{m}_{HS} c_{pHS} (T_{HSi} - T_{HS0}) = \dot{m}_{HS} c_{pHS} \varepsilon_H (T_{HSi} - T_H),$$

где ε_H - эффективность теплообменника с горячей стороны.г. из предположений о том, что эффективность теплообменника не зависит от переменных оптимизации и что

внешние жидкости ограничивают теплопередачу, можно утверждать, что выходная тепловая мощность охлаждающего теплообменника равна:

$$Q_{LS} = \dot{m}_{LS} c_{p_{LS}} (T_0 - T_{LSo}) = \dot{m}_{LS} c_{p_{LS}} \varepsilon_L (T_0 - T_L).$$

Теплотворные способности определяются следующим образом $\dot{C}_{LS} = \dot{m}_{LS} c_{p_{LS}}$ и $\dot{C}_{HS} = \dot{m}_{HS} c_{p_{HS}}$, при условии постоянной удельной теплоемкости $c_{p_{HS}}$ и $c_{p_{LS}}$, какой бы ни была температура.

Существуют оптимальные значения T_H^* , T_L^* , ε_H^* и ε_L^* которые максимизируют чистую выходную мощность [17]. Оптимальными температурами и эффективностью являются:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_H = \sqrt{\frac{\sqrt{\dot{C}_{HS} T_{HSi} + \sqrt{\dot{C}_{LS} T_0}}}{\sqrt{\dot{C}_{HS} + \sqrt{\dot{C}_{LS}}}}}, \\ T_L = \sqrt{T_0 \frac{\sqrt{\dot{C}_{HS} T_{HSi} + \sqrt{\dot{C}_{LS} T_0}}}{\sqrt{\dot{C}_{HS} + \sqrt{\dot{C}_{LS}}}}}, \\ \varepsilon_H = \varepsilon_T \frac{\sqrt{\dot{C}_{LS}}}{\sqrt{\dot{C}_{HS} + \sqrt{\dot{C}_{LS}}}}, \\ \varepsilon_L = \varepsilon_T \frac{\sqrt{\dot{C}_{HS}}}{\sqrt{\dot{C}_{HS} + \sqrt{\dot{C}_{LS}}}}, \end{array} \right.$$

где ε_T - общая эффективность, доступная для распределения между горячей и холодной сторонами в соответствии с ограничением конечного физического размера $\varepsilon_H + \varepsilon_L + \varepsilon_T = 0$ удовлетворено.

Самая высокая соответствующая выходная мощность равна:

$$-W^* = \varepsilon_T \frac{(\sqrt{T_{HSi}} - \sqrt{T_0})^2}{(\frac{1}{\dot{C}_{LS}} + \frac{1}{\dot{C}_{HS}})}.$$

Этот результат представляется собой верхней границей высокой выпускающей мощности. Случае предпочтительной раздача всей теплотворной способности \dot{C}_T между нагревательной и охлаждающей жидкостями приводит к равному распределению ($\dot{C}_{HS} = \dot{C}_{LS} = \dot{C}_T/2$). В данной ситуации необходимо выбрать общую теплотворную способность, связанную с массовым расходом охлаждающей жидкости, учитывая теплотворные свойства нагревательной жидкости.

Для реверсивного двигателя Карно при максимальной выходной мощности коэффициент полезного действия по первому закону соответствует радикалу Ниццы. Некоторые классические и современные критерии определены и изложены для двигателя Карно с максимальной выходной мощностью в таблице 1. Следующим стандартам

считается коэффициент погашение тепла, который количественно определяет полезную теплоту по отношению к доступной теплоте. Для реверсивного двигателя Карно эндоревсивного типа при максимальной выходной мощности коэффициент полезного действия по первому закону основан на учете полезных эффектов, связанных с затратами на их получение, и является широко используемым классическим критерием. Затем отношение отходящего тепла к мощности количественно определяет производимую мощность относительно доступного тепла. В предложенной модели коэффициент рекуперации тепла зависит от общей эффективности теплообменника, теплотворной способности нагревательной и охлаждающей жидкостей, температуры отходящего тепла и температуры окружающей среды. Также рассматривается эффективность использования эксергии, которая учитывает качество преобразования тепла в энергию. Приводится также коэффициент извлечения эксергии, который позволяет количественно оценить производимую эксергию относительно доступной эксергии.

Анализ чувствительности к температуре отходящего тепла.

При предположении о равномерном распределении тепловых мощностей, $C_{HS} = C_{LS}$. Изменения критериев при температуре отходящего тепла T_{HSi} представлены на фото. Эффективность первого закона термодинамики η_I и эффективность Карно η_C значительно увеличиваются с температурой. Однако эффективность эксергии η_{ex} , коэффициент восстановления тепла r и коэффициент восстановления эксергии f_{ex} практически не чувствительны к температуре отходящего тепла. Отношение отходящего тепла к мощности f слегка увеличивается с увеличением температуры отходящего тепла. Критерии восстановления отходящего тепла (r , f и f_{ex}) обычно ниже, чем классические критерии (η_C , η_I и η_{ex}).

Таблица 1 – Определение и выражение различных критериев

	Определение	Выражение для термомеханического преобразования	Выражение для необратимого двигателя Карно при максимальной выходной мощности
Эффективность первого закона η_I	$\frac{useful\ effects}{energy\ costs}$	$\frac{-\dot{W}}{\dot{Q}_{HS}}$	$\eta_I = 1 - \sqrt{\frac{T_0}{T_{HSi}}}$
Коэффициент рекуперации тепла r	$\frac{valued\ heat}{available\ heat\ rate}$	$\frac{\dot{Q}_{HS}}{\dot{Q}_{HSi}}$	$\varepsilon_T = \frac{\dot{C}_{LS}}{(\sqrt{\dot{C}_{HS}} + \sqrt{\dot{C}_{LS}})^2} \sqrt{\frac{T_{HSi}}{T_{HSi} + T_0}}$
Отношение отходящего тепла к мощности f	$\frac{mechanical\ power}{available\ heat\ rate}$	$\frac{-\dot{W}}{\dot{Q}_{HSi}}$	$r\eta_I$
Энергоэффективность η_{ex}	$\frac{useful\ exergy}{exergy\ cost}$	$\frac{-\dot{W}}{\dot{Q}_{HS}(1 - \sqrt{\frac{T_0}{T_{HSi}}})} with \bar{T}_{HS} = \frac{(T_{HS0} - T_{HSi})}{\ln(T_{HS0}/T_{HSi})}$	$\frac{f\eta_C}{\eta_C + \frac{T_0}{T_{HSi}} \ln(1 - r\eta_C)} with \eta_C = 1 - \frac{T_0}{T_{HSi}}$
Коэффициент рекуперации энергии f_{ex}	$\frac{useful\ exergy}{available\ exergy}$	$\frac{-\dot{W}}{\dot{Q}_{HSi}(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{HSi}})}$	$r\eta_{ex}$

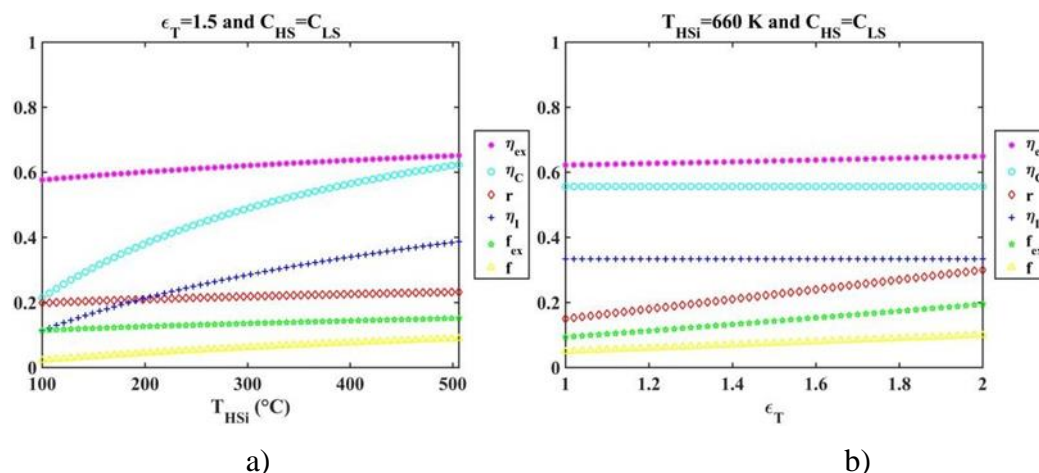


Рисунок 5 – (а) Изменение критериев в зависимости от температуры отходящего тепла; (б) изменение критериев в зависимости от общей эффективности теплообменника

Вариация критерия с полной эффективностью теплообменника ϵ_T представлена на верхних фото. Коэффициент восстановления тепла (r), коэффициент восстановления эксергии (f_{ex}) и отношение отходящего тепла к мощности (f) слегка увеличиваются с увеличением полной эффективности теплообменника. Однако коэффициент эффективности эксергии (η_{ex}), коэффициент эффективности первого закона термодинамики (η_I) и эффективность Карно (η_C) не значительно зависят от температуры отходящего тепла.

Обсуждение.

В диапазоне мощности от 1 Вт до 20 МВт паровая турбина не эффективна из-за условий, когда источник тепла имеет температуру менее 500°C. Для использования отходящего тепла с низкой температурой различные технологии разрабатываются, включая двигатель цикла Органического Рэнкина (ORC).

ORC - коммерциализированная технология, но стоит перед вызовом сделать их прибыльными в этом диапазоне мощности. Новый концепт, Турбозоль, работает при низком давлении, низкой скорости и обеспечивает краткосрочную окупаемость.

Другие кандидаты включают двигатели горячего воздуха, среди которых двигатель Стирлинга является самым продвинутым и подходит для средних температур.

Также разрабатываются множество прототипов, включая термоэлектрические генераторы для различных приложений, включая космические.

В случае отходящего тепла материалы подвергаются высоким термическим напряжениям, усложняя процесс восстановления. Также проводятся исследования по магнито-колебательным материалам с температурой Кюри выше 100°C для повышения эффективности и эффективного использования отходящего тепла.

В качестве перспективы предлагается упрощенная модель для экономических соображений. Преобразование отходов в энергию представляет собой затраты. Стоимость инвестиций предполагается линейно возрастающей с произведенной мощностью \dot{W} . Пропорциональный коэффициент - v_{invest} . Рабочие расходы предполагаются линейно возрастающими с общей произведенной энергией в течение времени службы Δt_l . Пропорциональный коэффициент - v_{oper} . Таким образом, стоимость конвертера может быть выражена следующим образом:

$$C_{conv} = v_{invest} |\dot{W}| + v_{op} |\dot{W}| \Delta t_l > 0.$$

Производство электроэнергии позволяет приносить пользу:

$$B_{conv} = v_{power} |\dot{W}| \Delta t_l > 0.$$

Учитывая предложение использовать энергетическую точку зрения для определения мгновенной стоимости утилизируемого тепла, предлагается ввести налог на утилизируемое тепло, чтобы стимулировать эффективное использование данного тепла. Такой подход поможет повысить ценность утилизируемого тепла, поскольку он будет облагаться налогом и будет рассматриваться как ресурс, который имеет свою стоимость для окружающей среды. Мгновенная стоимость утилизируемого тепла может быть определена с использованием энергетической точки зрения, основанной на его качестве и количестве. Подобный налог может стать поощрением для предприятий и организаций, стимулирующим улучшение технологий и методов рециркуляции тепла, что, в свою очередь, способствует снижению выбросов парниковых газов и энергопотребления.

$$C_{waste} = v_{waste} \left(1 - \frac{T_0}{T_{waste}}\right) |Q_{waste}| > 0,$$

где v_{waste} - коэффициент, который необходимо определить. T_{waste} - температура отходящего тепла, а \dot{Q}_{waste} - количество отходящего тепла. Без восстановления отходящего тепла $T_{waste} = T_{HSi}$ и $\dot{Q}_{waste} = \dot{Q}_{HSi}$.

Стоимость преобразования отходящего тепла в электроэнергию на протяжении всей жизни системы определяется следующим образом:

$$C_{val} = |\dot{W}| \left[v_{invest} + \Delta t_{life} (v_{op} - v_{power}) \right] + v_{waste} \Delta t_{life} \left[\left(1 - \frac{T_0}{T_{HS0}}\right) |Q_{HS0}| + \left(1 - \frac{T_0}{T_{LS0}}\right) |Q_{LS}| \right].$$

Срок окупаемости должен удовлетворять следующему соотношению:

$$C_{val} (\Delta t_{life} = \Delta t_r) = v_{waste} \left(1 - \frac{T_0}{T_{HSi}}\right) Q_{HSi} \Delta t_r.$$

После некоторых расчетов время окупаемости составляет:

$$\Delta t_r = \frac{v_{invest}}{v_{op} - v_{power} + v_{waste} Z}$$

из

$$Z = \left[\left(1 - \frac{T_0}{T_{HS0}}\right) \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{\eta}\right) + \left(1 - \frac{T_0}{T_{LS0}}\right) \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) - \frac{1}{f} \left(1 - \frac{T_0}{T_{HSi}}\right) \right].$$

Соответствует основной ситуации, когда выходное тепло не облагается налогом $v_{waste} = 0$ Температуры на выходе будут:

$$\begin{cases} T_{HS0} = T_{HSi} - r(T_{HSi} - T_0) \\ T_{LS0} = T_0 + (r - f) \frac{c_{HS}}{c_{LS}} (T_{HSi} - T_0) \end{cases}$$

Заклучение.

Для стимулирования повышения ценности отходящего тепла одним из эффективных методов является введение налога на такие тепловые ресурсы. Согласно предлагаемому закону об обложении налогами, время окупаемости системы преобразования отработанного тепла в электроэнергию зависит от нескольких факторов, включая эффективность системы согласно первому закону термодинамики, коэффициент рекуперации тепла, отношение отходящего тепла к мощности, температура источника тепла, массовый расход, температура окружающей среды, расход охлаждающей жидкости и другие. Данное исследование направлено на сравнительный анализ различных технологий с точки зрения срока окупаемости в контексте введения налога на отходящее тепло. Сравнение будет проведено между двумя случаями: с учетом налогообложения отходящего тепла и без него. Работа сосредоточена на простых системах передачи отработанного тепла в энергетику, однако необходимо учитывать возможность применения каскадных систем, централизованного теплоснабжения и полигенерацию для получения более полного представления о перспективах использования отходящего тепла.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ADEME, Chaleur Fatale, 26 09 2017 [Online]. Available: <http://www.ademe.fr/chaleur-fatale>. (accessed Febr 7, 2018). N.P. Sokolov, V.A. Eliseev. Raschet po avtomatizirovannomu ehlektroprivodu [in Russian: Calculation of an automated electric drive]. Moscow, МЕНИ Publ., 1974, VII, 84 p.
- [2] M. Pluiose, Conversion d'énergie par turbomachines. Eoliënne, turbines à gaz, cogénération, cycles combinés gaz-vapeur... (avec exercices résolus). Paris: Ellipses collection Technosup, 2005.
- [3] T. Tartière, M. Astolfi, "A world Overview of the Organic Rankine Cycle Market," Energy Procedia, 129, 2-9, 2017
- [4] S. Broberg Viklund, M. Johansson, "Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO2 emission reduction," Energy Conversion and Management, 77, 369-379, 2014.
- [5] S. Iglesias Garcia, R. Ferreira Garcia, J. Carbia Carril, D. Iglesias Garcia, "A review of thermodynamic cycles used in low temperature recovery systems over the last two years," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 760-767, 2018.
- [6] M. Pavlas, M. Tous, "Efficient waste-to-energy system as a contribution to clean technologies," Clean Techn Environ Policy, 11, DOI 10.1007/s10098-008- 0173-4, 19-29, 2009.
- [7] A. B. Little, S. Garimella, "Comparative assessment of alternative cycles for waste heat recovery and upgrade," Energy, 36, 4492-4504, 2011.
- [8] S.-Y. Wu, H. Yang, L. Xiao, C. Li, "Comparative Investigation on Thermo-economic Performance between ORC and LiBr Absorption Refrigerating Cycle in Waste Heat Recovery," in The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016, Beijing, 2017.
- [9] C. Zhang, C. Liu, S. Wang, X. Xu, Q. Li, "Thermoeconomic comparison of subcritical organic Rankine cycle based on different heat exchanger configurations," Energy, 123, 728-741, 2017.
- [10] M.-H. Yang, R.-H. Yeh, T.-C. Hung, "Thermoeconomic analysis of the transcritical organic Rankine cycle using R1234yf/R32 mixtures as the working fluids for lower-grade waste heat recovery," Energy, 140, 818- 836, 2017.
- [11] S. Lecompte, H. Huisseune, M. van den Broek, B. Vanslambrouck, M. De Paepe, "Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 448-461, 2015.
- [12] J. Bao, L. Zhao, "A review of working and expander selections for Organic Rankine Cycle," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 325-342, 2013.

[13] M. Kermani, A. S. Wallerand, I. D. Kantor, F. Maréchal, "Generic superstructure synthesis of organic Rankine cycles for waste heat recovery in industrial processes," *Applied Energy*, 212, 1203-1125, 2018.

[14] A. Landelle, N. Tauvernon, P. Haberschill, R. Revellin, S. Colasson, "Organic Rankine cycle design and performance comparison based on experimental database," *Applied Energy*, 204, 1172-1187, 2017.

[15] M. Blaise, M. Feidt, D. Maillet, "Optimisation thermodynamique d'un nouveau convertisseur de chaleur en électricité "Turbosol"," in *Colloque FRancophone en Energie, Environnement, Economie et Thermodynamique*, , Bucarest, 2016.

[16] Mathes, R. (1992). *Convertisseur de Faraday à métal/gaz : optimisation thermodynamique de cycles combinés et modélisation de l'accélérateur*, (Doctoral Dissertation), Université J.Fourier, Grenoble, France.

[17] B. Woodland, J. Braun, E. A. Groll, W. Horton, *Publications of the Ray W. Herrick Laboratories*, 06 02 2010. [Online]. Available: <https://docs.lib.purdue.edu/herrick/5/>. (accessed Jan, 30, 2018)

Турарбек Шарипов, докторнат, С. Сейфуллин атындағы қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана Қ., Қазақстан, turarbek.sharipov@mail.ru

Галина Таткеева, т.ғ.д., С. Сейфуллин атындағы қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан, tatkeeva@mail.ru

Али Мехтиев, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, С. Сейфуллин атындағы қазақ Агротехникалық Зерттеу Университеті, Астана, Қазақстан, barton.kz@mail.ru

Бексултан Қалбаев, магистр, Алматы мемлекеттік энергетика және электрондық технологиялар колледжі, Алматы, Қазақстан, kalbayev_bk@mail.ru

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ЖЫЛУДЫ КӘДЕГЕ ЖАРАТУ ЖӘНЕ ОНЫ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНА АЙНАЛДЫРУ

Аңдатпа. Негізгі энергия тұтынатын секторлар тұрғын үй, өнеркәсіп және көлік болып табылады. Олардың барлығында тұтынылатын энергияның бір бөлігі пайдаланылмайды және, әдетте, жылу түрінде қоршаған ортаға бөлінеді. Бұл қалдық жылу деп аталады. Біріншіден, негізгі жол - отын шығынын азайту үшін процесті оңтайландыру. Сонда қалдық жылу болса, құн қосудың жолы сол жылуды электр энергиясына айналдыру болып табылады. Кейбір технологиялар әзірленуде. Негізгі технология органикалық Rankine цикл қозғалтқышы болып табылады. Содан кейін инжектордағы су мен май қоспасының квазиизотермиялық кеңеюіне негізделген Турбозол деп аталатын жаңа тұжырымдама пайда болды. Сондай-ақ Stirling, Ericsson және Joule циклдеріне негізделген кейбір поршенді қозғалтқыштар әзірленуде. Бұл технологиялардың барлығы сыртқы жылытылатын қозғалтқыштар деп аталады. Кейбір басқа ғылыми зерттеулер термоэлектрлік эффект пен термомагниттік әсерге қатысты. Бұл мақалада осы технологиялар бойынша сипаттамалар мен түсініктемелер бар ішінара тізім ұсынылады. Мақсат - олардың әлеуетін бағалау және ағымдағы шектеулерді анықтау. Бірінші заң бойынша әртүрлі технологияларды тиімділік тұрғысынан салыстыру жеткіліксіз. Кейбір жаңа критерийлер ұсынылды. Бірінші мәселе жылу энергиясын тұтынуды қолда бар жылу энергиясын тұтынуға қатысты бағалау болып табылады. Қалдықтың жылуды энергияға түрлендіру сапасын бағалау үшін қуат шығысын қолда бар жылу ағынына бөлу арқылы бағалау орынды. Содан кейін екінші заңға байланысты эксергияны қалпына келтіру коэффициентін бағалау орынды. Бұл жаңа жылуды кетіру критерийлері әртүрлі

жағдайларда тиімділіктің классикалық бірінші заңымен салыстырылады. Ендігі басты міндет – табысты болу үшін жеткілікті электр энергиясын өндіру. Кейбір термoeкономикалық ойлар, соның ішінде жылу қалдықтарына салық салудың әсері ұсынылады.

Түйінді сөздер. Термодинамика, энергия, жабдық, энергия, тұрақтылық.

Turarbek Sharipov, doctoral student, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, turarbek.sharipov@mail.ru

Galina Tatkeyeva, doctor of technical sciences, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, tatkeeva@mail.ru

Ali Mekhtiev, candidate of technical sciences, associate professor, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, barton.kz@mail.ru

Bexultan Kalbayev, master, Industrial Training Almaty State College of Energy and Electronic Technologies, Almaty, Kazakhstan, kalbayev_bk@mail.ru

RECYCLING WASTE HEAT AND CONVERTING IT INTO ELECTRICITY

Abstract. The primary energy consumption sectors include housing industry, and transportation in each of these, a portion of energy consumed is often utilized and is typically released into the environment in the form of heat, known as waste. Initially, the approach involves optimizing processes reduce fuel consumption. Subsequently if residual waste heat remains, the focus shifts towards converting this heat into electricity to increase efficiency. Several technologies are under development for this purpose, such as the organic Rankine cycle engine and the Turbosol concept, there are piston engines under development based on the Stirling, Ericsson and Joule cycles. In addition, research is underway on engines using quasi-isothermal expansion of a mixture of water and oil in the nozzle, collectively known as externally heated engines. Scientific research also encompasses the thermoelectric and thermomagnetic effects. This article presents an incomplete list of these technologies, along with descriptions and comments, aiming to evaluate their potential and identify current limitations. The assessment of various technologies in terms of efficiency, according to the first law, is found to be insufficient, leading to the proposal of new criteria. These new criteria include estimating the thermal energy consumption relative to the available thermal energy. Furthermore, to evaluate the quality of waste heat conversion into energy, it is suggested to estimate the output power divided by the available heat consumption. Additionally, it is proposed to estimate the coefficient of exergy recovery based on the second law. These new criteria for heat dissipation are compared with the classical first law of efficiency in different scenarios. Currently, a significant challenge is to generate sufficient electricity to ensure profitability. Some thermo-economic considerations are put forth, including the potential impact of waste heat taxation.

Keywords. Thermodynamics, energy, equipartition, exergy, sustainability.
