



АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ВЫБРОСОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

А.Г. Клименко, А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеевко

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: kag1958776@gmail.com

Показана роль двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в технологиях эффективной энергетики. Дан анализ существующих и освоенных промышленностью технологий повышения эффективности использования тепловых выбросов в ДВС, включая когенерацию, а также определение перспективных направлений, требующих дальнейшего научного исследования и обоснования. Проанализированы составляющие энергии выпускных газов, получаемых при сгорании топлив и их термодинамические характеристики в общем тепловом балансе ДВС. Показаны наиболее известные в технике способы рекуперации (использования) тепловой энергии выпускных газов, их эффективность в зависимости от режимов работы ДВС, а также достоинства и недостатки. Наиболее предпочтительными системами утилизации представляются системы, не требующие усложнения самой конструкции ДВС, а интегрированные как дополнительные модули, подключаемые в систему газовыхлопа ДВС. Предложены новые способы использования энергии выпускных газов с использованием турбокомпрессорного утилизатора, а также возможности его использования в совокупности с комбинацией известных способов утилизации теплоты в ДВС.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, тепловая энергия, тепловой баланс, тепловые выбросы, рекуперация тепла, турбокомпрессорный утилизатор.

Поступила в редакцию: 29.02.2024. После доработки: 20.03.2024. Принята к печати: 22.03.2024

Введение. Развитие технологий устойчивой энергетики является ключевой частью глобальной научной повестки и одной из актуальных задач, стоящих сегодня перед инженерами и конструкторами.

В современном мире двигатели внутреннего сгорания являются и остаются наиболее распространенным источником энергии для машин, используемых в сфере энергетики и транспорта, строительной и сельскохозяйственной индустрии. В работе [1] показано, что основные статьи по вредным выбросам занимают такие сектора, как электроэнергетика и транспорт в совокупности, а если сюда добавить взаимосвязанные с предыдущими сферы строительства и сельского хозяйства, то задача снижения теплового и углеродного следа в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) приобретает особую актуальность. Кроме того, спрос на транспортные средства по-прежнему не убывает.

Несмотря на развитие технологий использования топливных элементов и активного ввода в эксплуатацию электромобилей, значительная часть транспортного парка в ближайшем будущем по-прежнему будет оснащаться ДВС.

По данным [2] «почти все развитые страны в мире активно поддерживают транспорт на электротяге и вот-вот окончательно откажутся от машин с ДВС. По крайней мере, именно такое впечатление складывается, если следить за новостями об автомобилях последних лет. О скором запрете машин с двигателем внутреннего сгорания на правительственном уровне уже объявили 14 стран. И это не только крошечный Сингапур или состоятельная Норвегия, но и Шри-Ланка, Словения, Бельгия, Великобритания, Египет и даже Индия с её миллиардным населением». В этом же источнике говорится о том, какие на этом пути существуют препятствия, которые не могут быть преодолены в кратчайшие (декларируемые) сроки.

В связи с этим, эффективное использование ДВС на транспорте остается одной из ключевых проблем, связанных с энергосбережением и экологической устойчивостью.

При проведении анализа тепловой эффективности ДВС важную роль играет его энергетический баланс, оценка которого позволит наметить пути снижения потерь тепловой энергии, выделяемой при сгорании топлива.

Исследования теплового баланса ДВС [3–5] показывают, что количество тепла, уходящего с выхлопными газами, образующимися в процессе сгорания, может достигать 30–48%, в то время, как только 12–45% энергии сгорания топлива преобразуется в полезную работу в зависимости от режима работы, при этом наиболее эффективный режим работы – это номинальный или его еще называют расчетным.

Одной из причин потерь тепловой энергии сгорания топлива в конструкции ДВС является то, что повышение степени сжатия, которая влияет на мощность и КПД, ограничивается детонационными свойствами топлива и возможности ее повышения для ДВС на сегодняшний день практически исчерпаны. Кроме того, выхлопные газы, образуемые при сгорании топлива, на такте расширения «недодают» мощность в связи с необходимостью более раннего открытия выпускных клапанов для обеспечения необходимого качества очистки цилиндров ДВС, и эта «недостающая» мощность «остается» в виде тепловой энергии в выхлопных газах. Если быть более кратким, то эффективность работы ДВС очень сильно зависит от соотношения таких параметров, как степень сжатия и степень расширения рабочего тела.

Некоторыми авторами недостаточно аргументирована энергия выхлопных газов: она признается малоэффективной из-за ее высокой температуры и низкого давления [6], что будет показано ниже.

Целью настоящего исследования был анализ существующих и освоенных промышленностью технологий повышения эффективности использования тепловых выбросов в ДВС, включая когене-

рацию, а также определение перспективных направлений, требующих дальнейшего научного исследования и обоснования.

Основные составляющие энергии выпускных газов ДВС. В общем случае, следуя закону сохранения энергии, суммарная энергия выпускных газов ДВС W_{Σ} может быть определена как сумма кинетической W_k , потенциальной W_n , внутренней энергии рабочего тела $W_{вн}$, или

$$W_{\Sigma} = W_k + W_n + W_{вн}.$$

Однако, согласно постулатам технической термодинамики, такое толкование возможно при наличии процессов диссоциации, ионизации рабочего тела, а также воздействия на него силовых полей [7].

Абстрагируясь от остальных видов энергии (поступательного и вращательного движения молекул, энергии внутримолекулярных колебаний, потенциальной энергии, внутриатомной и др.), которые составляют небольшую долю от полной энергии (порядка 0,6%) [8], с точки зрения термодинамики, принято полагать, что в макросистеме в условиях, когда рабочее тело не находится в состоянии диссоциации или ионизации основной энергетической составляющей является внутренняя энергия, напрямую связанная с температурой выхлопных газов.

При сгорании топлива основной составляющей энергией является тепловая энергия ($W=U$). Теплота Q , подведенная к телу, расходуется на изменение его внутренней энергии U и совершение внешней работы L , тогда

$$dQ = dU + dL.$$

Общее уравнение абсолютного внешнего теплового баланса ДВС имеет вид [3]

$$Q_p = Q_e + Q_c + Q_{охл} + Q_{н.б.},$$

где Q_p – располагаемое количество теплоты топлива; Q_e – количество теплоты, эквивалентное эффективной работе за

час; Q_2 – количество теплоты, отводимое с выпускными газами; $Q_{охл}$ – количество теплоты, отводимое системой охлаждения (значение $Q_{охл}$ складывается из количества теплоты, затрачиваемой на охлаждение воды, смазочного масла, системы газовыхлопа и наддувочного воздуха); $Q_{н.б}$ – невязка баланса (потери на трение, привод вспомогательных механизмов, неполноту сгорания топлива и др.).

С другой стороны

$$Q_p = H_u \cdot B_{ч} ,$$

где H_u – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; $B_{ч}$ – часовой расход топлива ДВС, кг/ч.

Выше было показано, что из составляющих теплового баланса наиболее значимым слагаемым является Q_2 , соразмеримое по величине с Q_e . Именно эта составляющая и является предметом настоящего исследования, по оценке эффективности технологий и способов ее утилизации.

Технологии повышения эффективности использования тепловых выбросов ДВС. Ниже представляется обзор современных технологий систем рекуперации отработанного тепла ДВС. В соответствии с тепловой характеристикой выхлопных газов ДВС, системы утилизации отработанного тепла можно условно разделить на технологии непрямой (или косвенной) рекуперации и технологии прямой рекуперации [3].

К технологиям непрямой рекуперации можно отнести существующие и активно развивающиеся системы использования теплоты выхлопных газов (плюс теплоты охлаждаемых компонентов ДВС) в качестве промежуточного источника. Для совмещения промежуточного источника использования тепла с основным циклом ДВС, возможно использование систем с жидкостным охлаждением, в которых рабочая жидкость «поглощает» тепло выхлопных газов в теплообменном аппарате. В подобных циклах рабочее давление в промежуточном источнике отделено от противодавления выхлопных газов двигателя

за счет передачи тепла в теплообменном аппарате. Поэтому его производительность существенно влияет на эффективность рекуперации тепла выхлопных газов. В свою очередь, эта самая производительность будет влиять на массогабаритные показатели теплообменного аппарата. Именно эти технологии сегодня широко распространены в когенерационных установках.

Исходя из физических характеристик рабочего тела, существуют две основные формы рабочей среды – жидкая и газообразная. Преимущество жидкого рабочего тела состоит в том, что его давление можно значительно повысить при относительно небольшой работе сжатия. Кроме того, процесс фазового перехода жидкости является очень эффективным способом хранения и высвобождения энергии. Однако процесс фазового перехода может повлиять на увеличение объема жидкой рабочей среды, что может создать проблемы при проектировании проточной части, например, потребует установки турбины и теплообменного аппарата большого диаметра. С другой стороны, использование газообразного рабочего тела упрощает конструкцию, поскольку в процессе теплообмена не происходит фазового перехода. Более того, такой цикл может быть реализован как открытый цикл, т.е. исключает необходимость установки конденсатора.

В работе [4] дается анализ использования систем рекуперации выхлопных газов в когенерационных установках и приведен перечень систем преобразования отработавших газов, к которым авторы относят следующие (рис. 1):

1. Преобразование тепловой энергии в механическую работу (двигатель Стирлинга и машины, работающие по циклу Ренкина);
2. Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую;
3. Прямое преобразование кинетической энергии отработавших газов (применение систем турбонаддува, применение силовых турбин, применение электрических машин в системах турбонаддува и применение электрических турбогенераторов).

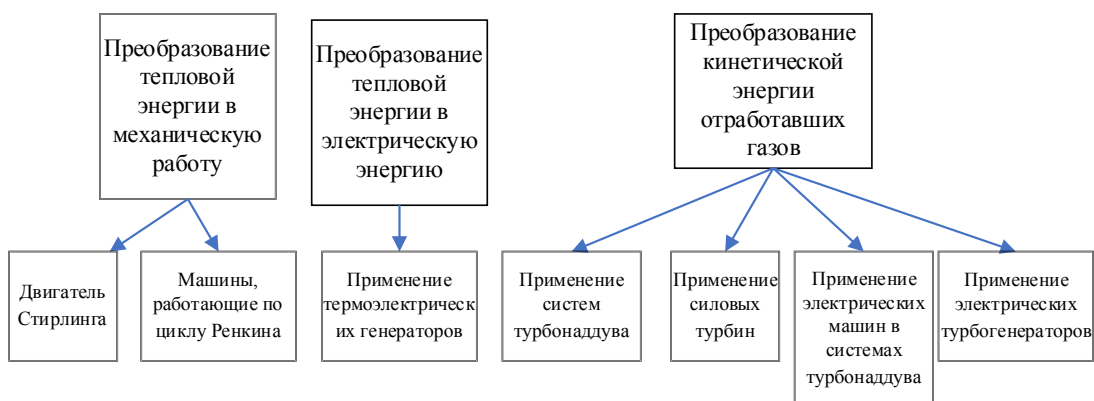


Рис. 1. Основные направления развития систем рекуперации отработанных газов когенерационных установок

Fig. 1. Main directions of development of cogeneration plants exhaust gas recovery systems

Двигатели Стирлинга относятся к двигателям внешнего сгорания, поэтому в данной работе их анализ не рассматривается.

Что касается ДВС, то указанное исследование применимо по п.п. 2 и 3. По п. 2 основной проблемой в реализации данного преобразования энергии является очень низкий КПД и необходимость увеличения габаритов установки, что ограничивает их применение на автотранспорте [9].

Дополнительно к приведенному анализу известны экспериментальные установки и опыты ведущих автоконцернов (в основном японских) по созданию систем регенерации тепловой энергии в системе выпуска отработавших газов в виде термоэлектрических генераторов, в основу которых положен эффект Зеебека (Seebeck Effect), однако, ввиду сложности и низкого КПД они также не получили широкого распространения. Кроме того, самими авторами [10] отмечается, что «хотя комбинация холодильника и генератора представляет собой весьма простой прибор, однако общий коэффициент полезного действия очень низок. Коэффициент полезного действия самого холодильника должен быть умножен на КПД генератора, который обычно не превышает 10%. Поэтому полагают, что такая система находит применение толь-

ко тогда, когда не важен коэффициент полезного действия».

По п. 3 авторами отмечается, что применение силовых турбин (так называемые турбокомпаундные двигатели) позволяет преобразовывать энергию отработавших газов в механическую, которая посредством редуктора или гидравлической передачи передается на коленчатый вал двигателя (рис. 2). Подобные системы применяют на своих двигателях фирмы Scania, Volvo, Cummins и др. В большинстве случаев силовые турбины устанавливаются на двигателях с турбонаддувом второй ступенью после колеса турбины [11, 12]. Передача крутящего момента обеспечивается с помощью редуктора посредством жесткой связи с коленчатым валом или применяется гидравлическая передача мощности (например, гидромуфта). Применение силовой турбины позволяет преобразовать около 20% тепловой энергии в механическую в среднем. Производитель Volvo заявляет об увеличении мощности двигателя до 10% и увеличении эффективности на 5%, а также снижении расхода топлива [4]. По данным Scania, применение силовых турбин позволяет снизить расход топлива до 5–10% в зависимости от режима работы двигателя.

Основными недостатками данной системы являются: необходимость услож-

нения конструкции двигателя силовой турбиной, системой передачи мощности на коленчатый вал, системой синхронизации оборотов двигателя и турбо-

компаунд. Все это наряду с повышением эффективности способствует также значительному повышению расходов на изготовление и эксплуатацию.

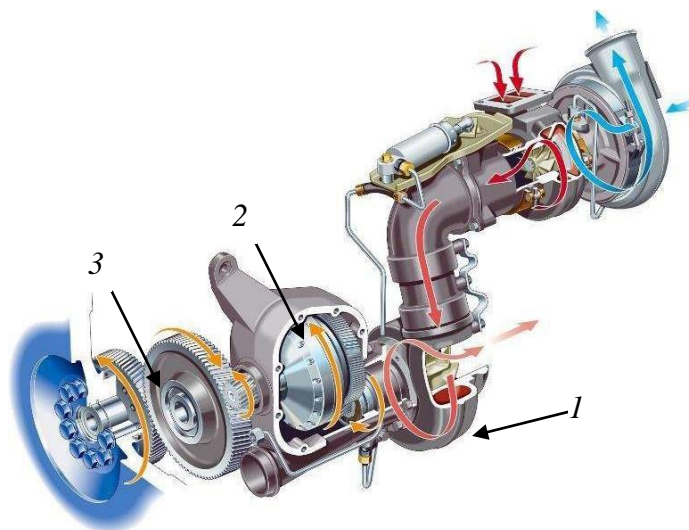


Рис. 2. Общий вид турбокомпаунда: 1 – силовая турбина; 2 – гидромуфта; 3 – передача мощности

Fig. 2. General view of the turbocompound: 1 – power turbine; 2 – hydraulic coupling; 3 – power transmission

Согласно [4] применение электрических машин в системе турбонаддува ДВС ограничивается тем, что они могут эффективно работать лишь в ограниченных промежуточных режимах работы ДВС, т.е. не являются всережимными, а не некоторых режимах, напротив, создают дополнительную «инерционную нагрузку».

Тот же источник [4] рекомендует использовать как эффективное средство использования энергии выхлопных газов электрические турбогенераторы, как дополнительный источник электроэнергии.

Проведенный анализ, а также если учесть исследование [11–15], показывает, что возможности использования «бросового тепла» ДВС далеко не исчерпаны перечисленными системами, что вызывает необходимость проведения дальнейших исследований по эффективному использованию тепловой энергии выпускных газов.

Ранее было показано, что выхлопные

газы не в полной степени расширяются в рабочем цилиндре. По этой причине дополнительные расширительные устройства, такие как силовая турбина, дополнительная расширительная камера и т.д., могут повысить эффективность процесса расширения. Однако дополнительные устройства, напрямую подключенные к газовойпускной системе ДВС могут повлиять на уровень давления на выпуске, что повлечет за собой дополнительные насосные потери ДВС на такте расширения. Таким образом, основной технической сложностью становится согласование дополнительных расширительных устройств с характеристиками рабочего цилиндра ДВС.

По мнению авторов, наличие турбокомпрессорного утилизатора [13] позволит осуществить повышение степени расширения газов без вмешательства в рабочий цикл и конструкцию самого ДВС, т.е. без дополнительной конструктивной доработки двигателя (рис. 3).

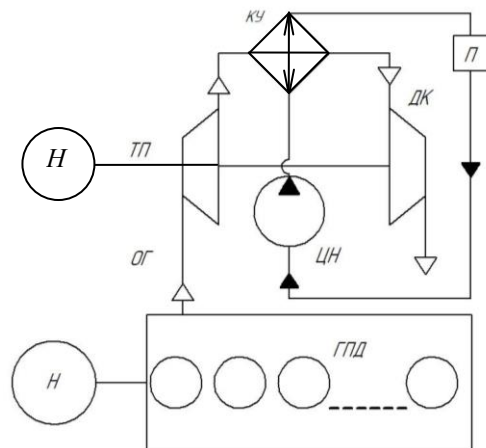


Рис. 3. Схема когенерационной установки ГПД с турбокомпрессорным утилизатором:

Н – нагрузка; ГПД – газопоршневой двигатель; ОГ – отработавшие газы;
 ТП – турбина перерасширения; КУ – котел-утилизатор; П – потребитель;
 ДК – дожимающий компрессор; ЦН – циркуляционный насос

Fig. 3. Diagram of GPE cogeneration plant with a turbocharger utilize:

Н – load; ГПД – gas piston engine; ОГ – exhaust gases; ТП – overexpansion turbine;
 КУ – steam boiler; П – heat consumer; ДК – booster compressor; ЦН – circulation pump

Учитывая тот факт, применение турбокомпрессорного утилизатора (ТКУ) впервые было осуществлено на газовых турбинах [16]. Далее это направление совершенствовалось с комбинацией ТКУ с регенератором, применением промежуточного перегрева и т.д. Расчеты показали эффективность использования ТКУ по сравнению с базовым вариантом.

Именно это направление взято за основу для его использования в ДВС с дальнейшим исследованием ТКУ с интегрированными системами регенерации, промежуточного перегрева.

Выводы. Приведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что исследование методов повышения эффективности использования тепловых выбросов в ДВС могут идти по многим направлениям. Предполагается, что наиболее предпочтительными являются те, которые не связаны с усложнением конструкции самого ДВС, и могут использоваться в качестве дополнительных модулей, включенных в систему газовыхлопа ДВС. Именно такой системой и является предложенная система интегрированного в систему газовыхлопа ДВС турбокомпрессорного утилизатора.

Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких комбинированных установок с интегрированными возобновляемыми источниками энергии и использованием местных ресурсов холода (FFMM-2024-0018)» (№ госрегистрации 124020100121-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко А.Г., Очеретяный В.А. Правовые, экологические аспекты и особенности декарбонизации энергетики и транспорта в Российской Федерации // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 2 (48). С. 61–72.
2. Погорельский А. Нет, мир не перейдет на электромобили: 5 главных препятствий // Электронный журнал Auto.ru. <https://auto.ru/mag/article/whynotonleyelectro/>
3. Сайданов В.О., Случанинов Н.Н. Разработка вариантов схемных решений системы утилизации теплоты двигателя 6 ч 13/14 для электростанций железнодорожных войск // Специальная техника и технологии транспорта. 2023. № 17. С. 336–344.
4. Gopal N.K., Pandiyarajan V., Velraj R., Rayapati S. Thermodynamic analysis of

a diesel engine integrated with a pcm based energy storage system. International journal of thermodynamics. 2010. No. 13 (1). P. 15–21.

5. Хрунач Н.А., Татарников А.П. Анализ систем преобразования энергии отработавших газов для когенерационных энергоустановок // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 29.

6. Liu J.P., Fu J., Feng K., Wang S.Q. Characteristics of engine exhaust gas energy flow. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011. V. 42. No. 11. P. 3370–3376

7. Сивухин Д. В. Общий курс физики: Учеб. пособие: для вузов. В 5 т. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. 5-е изд. испр. М.: Физматлит. 2005. С. 544.

8. Özkan M., Özkan D.B., Özener O., Yılmaz H. Experimental study on energy and exergy analyses of a diesel engine performed with multiple injection strategies: Effect of pre-injection timing. Applied Thermal Engineering. 2013. V. 53. No. 1. P. 21–30.

9. Овсянников Е.М., Клюкин П.Н., Кецарис А.А., Акимов А.В. Альтернативный источник электрической энергии на автомобиле: использование энергии отработавших газов // Известия МГТУ МАМИ. 2014. Т. 1. № 1 (19). С. 45–50.

10. Куликов В.А., Шарыпов А.В., Меньщиков Г.Н. [и др.] Рекуперация тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС), используя эффекты Зеебека и Пельтье с применением модулей не классического типа из материалов на основе теллуридов висмута и сурьмы, полученных нанотехнологией, включающей высокочастотный нагрев, порошковую металлургию и экструзию // Зауральский

научный вестник. 2013. № 2 (4). С. 67–77.

11. Барышников С.И., Зеленцов А.А., Костюченков А.Н. Оценка перспектив использования турбокомпаундных ДВС в авиации // Двигатель 2017. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 110-летию специальности “Поршневые двигатели”. МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: ООО "Лучший сервис". 2017. С. 10.

12. Калашиников Б.А., Кузнецов В.И., Яковлев А.Б. Выхлопные устройства наземных энергетических установок с закруткой газового потока // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 19–24.

13. Клименко А.Г., Дологлонян А.В., Матвеев В.Т. Анализ схемных решений когенерационных установок на базе двигателей внутреннего сгорания и их влияние на эффективные и экологические характеристики // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 3 (49). С. 62–68.

14. Подзноев Г.П., Абдулгазис У.А., Дроботюк Н.И. Термодинамическая возможность использования в поршневых двигателях теплоты отработавших газов для каталитического риформинга эмульгированных водой моторных топлив // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2014. № 43. С. 4–11.

15. Мельник Г.В. Технологии и оборудование для снижения вредных выбросов двигателей (по материалам специализированных журналов) // Двигательстроение. 2012. № 4 (250). С. 45–53.

16. Матвеев В.Т., Очеретяный В.А., Андриец А.Г. Перспективы повышения эффективности ГТД с регенерацией теплоты усложнением цикла // Вестник СевНТУ: сб. науч. трудов. Севастополь. 2010. Вып. 106. С. 120–123.

ANALYSIS OF MODERN TECHNOLOGIES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF HEAT EMISSIONS FROM INTERNAL COMBUSTION ENGINES

A.G. Klimenko, A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The role of internal combustion engines (ICE) in efficient energy technologies is shown. Analysis of existing and industry-developed technologies for increasing the efficiency of using thermal emissions in internal combustion engines, including cogeneration, as well as the identification of promising areas that

require further scientific research and justification is given. The components of the energy of exhaust gases obtained during the combustion of fuels and their thermodynamic components in the overall heat balance of the internal combustion engine are analyzed. The most well-known methods in technology for the recovery (use) of thermal energy of exhaust gases, their effectiveness depending on the operating modes of the internal combustion engine, as well as advantages and disadvantages are analyzed. The most preferable recycling systems are systems that do not require complicating design of the internal combustion engine itself, but are integrated as additional modules connected to the gas exhaust system of the internal combustion engine. New methods of using the energy of exhaust gases using a turbocompressor heat exchanger, as well as the possibility of using it in conjunction with a combination of known methods of heat recovery in an internal combustion engine are proposed.

Keywords: internal combustion engine, thermal energy, thermal balance, thermal emissions, heat recovery, turbocompressor heat exchanger.

REFERENCES

1. *Klimenko A.G. and Ocheretjanyj V.A.* Pravovye, ekologicheskie aspekty i osobennosti dekarbonizacii energetiki i transporta v Rossijskoj Federacii (Legal, environmental aspects and features of decarbonization of energy and transport in the Russian Federation). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2022, No. 2 (48), pp. 61–72.
2. <https://auto.ru/mag/article/whynotonlyelectro/>
3. *Sajdanov V.O. and Sluchaninov N.N.* Razrabotka variantov skhemnyh reshenij sistemy utilizacii teploty dvigatelya 6ch 13/14 dlya elektrostancij zheleznodorozhnyh vojsk (Development of options for circuit solutions of the engine heat utilization system 6ch 13/14 for railway troops power plants). *Special'naya tehnika i tehnologii transporta*, 2023, No. 17, pp. 336–344.
4. *Gopal N.K., Pandiyarajan V., Velraj R., and Rayapati S.* Thermodynamic analysis of a diesel engine integrated with a pcm based energy storage system. *International journal of thermodynamics*, 2010, No. 13 (1), pp. 15–21.
5. *Hripach N.A. and Tatarnikov A.P.* Analiz sistem preobrazovaniya energii otrabotavshih gazov dlja kogeneracionnyh energoustanovok (Analysis of waste gas energy conversion systems for cogeneration power plants). *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, No. 5, 29 p.
6. *Liu J.P., Fu J., Feng K., and Wang S.Q.* Characteristics of engine exhaust gas energy flow. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, Vol. 42, No. 11, pp. 3370–3376.
7. *Sivuhin D.V.* Obshhij kurs fiziki. T. II. Termodinamika i molekularnaja fizika (General physics course. Vol. 2: thermodynamics and molecular physics). Moscow: Fizmatlit, 2005, 544 p.
8. *Özkan M., Özkan D.B., Özener O., and Yılmaz H.* Experimental study on energy and exergy analyses of a diesel engine performed with multiple injection strategies: Effect of pre-injection timing. *Applied Thermal Engineering*, 2013, Vol. 53, No. 1, pp. 21–30.
9. *Ovsjannikov E.M., Kljukin P.N., Kecaris A.A., and Akimov A.V.* Al'ternativnyj istochnik elektricheskoy energii na avtomobile: ispol'zovanie energii otrabotavshih gazov (An alternative source of electrical energy in a car: using exhaust gas energy). *Izvestija MGTU MAMI*, 2014, Vol. 1, No. 1 (19), pp. 45–50.
10. *Kulikov V.A., Sharypov A.V., and Men'shnikov G.N.* et al. Rekuperacija tepla vyhlopnih gazov dvigatelej vnutrennego sgoraniya (DVS), ispol'zuja jeffekty Zeebeka i Pel'te s primeneniem modulej ne klassicheskogo tipa iz materialov na osnove telluridov vismuta i sur'my, poluchennyh nanotehnologiej, vključajushhej vysokochastotnyj nagrev, poroshkovuju metallurgiju i ekstruziju (Heat recovery from exhaust gases of internal combustion engines (ICE) using the Seebeck and Peltier effects using non-classical type modules made of materials based on bismuth and antimony tellurides, obtained by nanotechnology, including high-frequency heating, powder metallurgy and extrusion). *Zaural'skij nauchnyj vestnik*, 2013, No. 2 (4), pp. 67–77.
11. *Baryshnikov S.I., Zelencov A.A., and Kostjuchenkov A.N.* Ocenka perspektiv ispol'zovaniya turbokompaundnyh DVS v aviacii (Assessment of the prospects for the use of turbocharged internal combustion engines in aviation). *Dvigatel 2017. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, posvyashchennoj 110-letiyu special'nosti "Porshnevye dvigateli"*. MGTU im. N.E. Bauman. Moscow: OOO "Luchshij servis", 2017, 10 p.
12. *Kalashnikov B.A., Kuznecov V.I., and Jakovlev A.B.* Vyhlopnye ustrojstva nazemnyh jenergeticheskij ustanovok s zakrutkoj gazovogo potoka (Exhaust devices of ground-based power plants with gas flow swirling). *Omskij nauchnyj vestnik*, 2018, No. 5 (161), pp. 19–24.

13. *Klimenko A.G., Dologlonjan A.V., and Matveenko V.T.* Analiz shemnyh reshenij kogeneracionnyh ustanovok na baze dvigatelej vnutrennego sgoraniya i ih vlijanie na effektivnye i ekologicheskie harakteristiki (Analysis of circuit solutions of cogeneration plants based on internal combustion engines and their influence on efficient and environmental characteristics). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2022, No. 3 (49), pp. 62–68.

14. *Podznoev G.P., Abdulgazis U.A., and Drobotjuk N.I.* Termodinamicheskaja vozmozhnost' ispol'zovaniya v porshnevnyh dvigateljah teploty otrabotavshih gazov dlja kataliticheskogo riforminga jemul'girovannyh vodoj motornyh topliv (Thermodynamic possibility of using exhaust gas heat in reciprocating engines for catalytic reforming of water emulsified motor fuels). *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*, 2014, No. 43, pp. 4–11.

15. *Mel'nik G.V.* Tehnologii i oborudovanie dlja snizhenija vrednyh vybrosov dvigatelej (Technologies and equipment to reduce harmful engine emissions). *Dvigatelsestroenie*, 2012, No. 4 (250), pp. 45–53.

16. *Matveenko V.T., Ocheretjanyj V.A., and Andriec A.G.* Perspektivy povysheniya effektivnosti GTD s regeneraciej teploty uslozhnieniem cikla (Prospects for improving the efficiency of gas turbine engines with heat recovery by complicating the cycle). *Vestnik SevNTU*, Collection of scientific works, Sevastopol, 2010, Vol. 106, pp. 120–123.