

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 62-144.3

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-2-172-186

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА СИНТЕЗ-ГАЗЕ, ПУТЕМ ДОВОДКИ РАБОЧЕГО ЦИКЛА

Плотников Л.В., Красильников Д.Н., Давыдов Д.А., Рыжков А.Ф., Шурупов В.А.

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, leonplot@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ** исследования обусловлена тем, что улучшение эффективных, экономических и экологических показателей поршневых двигателей (ДВС), работающих на альтернативных газообразных топливах, остается важной задачей для развития машиностроения и энергетики. Поэтому создание математических моделей рабочего цикла ДВС, работающих на разных газах, и повышение их энергоэффективности является актуальным для науки, техники и технологий. **ЦЕЛЬ** исследования состояла в повышении КПД и энергоэффективности электрогенератора на базе ДВС путем оптимизации параметров его рабочего цикла после замены базового топлива (пропан-бутана) на синтез-газ на основе численного моделирования. **МЕТОДЫ.** Объектом исследования был электрогенератор мощностью 1 кВт на базе одноцилиндрового ДВС с внешним смесеобразованием. В статье описываются основные подходы к созданию математической модели рабочего цикла двигателя, физико-химические свойства базового топлива (пропан-бутан) и нового лабораторного синтез-газа. Результаты моделирования верифицируются посредством экспериментальных исследований. Отличия между моделированием и опытами для ключевых параметров (мощность, КПД, расход воздуха и топлива) не превышали 4,0 %. КПД ДВС был выбран в качестве ключевого критерия оптимизации рабочего цикла. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Получены данные об эксплуатационных показателях ДВС, работающего на пропан-бутане и синтез-газе, для разных показателей рабочего цикла (степень сжатия, коэффициент избытка воздуха, угол опережения зажигания, сопротивление системы газообмена) на основе математического моделирования. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показано, что замена топлива с пропан-бутана на синтез-газ вызывает снижение КПД двигателя до 33 % (КПД двигателя составлял 0,179 и 0,119 для ДВС, работающих на пропан-бутане и синтез-газе, соответственно, при мощности электрогенератора равной 0,59 кВт). После оптимизации КПД двигателя на синтез-газе стало выше на 6,1 % по сравнению с ДВС, работающим на пропан-бутане, а падение мощности не превышало 8 %. Таким образом, оптимизация параметров рабочего цикла способствует достижению значений КПД и энергоэффективности двигателя на синтез-газе, сравнимых с эффективностью ДВС, функционирующих на традиционных видах топлива.

Ключевые слова: электрогенератор; двигатель; КПД и энергоэффективность; пропан-бутан; синтез-газ; оптимизация; математическое моделирование.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Плотников Л.В., Красильников Д.Н., Давыдов Д.А., Рыжков А.Ф., Шурупов В.А. Повышение энергоэффективности поршневого двигателя, работающего на синтез-газе, путем доводки рабочего цикла // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 2. С. 172-186. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-172-186.

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A PISTON ENGINE POWERED BY SYNTHESIS GAS BY FINE-TUNING THE OPERATING CYCLE

Plotnikov L.V., Krasilnikov D.N., Davydov D.A., Ryzhkov A.F., Shurupov V.A.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, leonplot@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE* of the study is since improving the efficient, economic and environmental performance of reciprocating engines (ICE) powered by alternative gaseous fuels remains an important task for the development of mechanical engineering and energy. Therefore, the creation of mathematical models of the working cycle of ICEs operating on different gases and improving their energy efficiency is relevant for science, technology and technology. The **PURPOSE** of the study was to increase the efficiency and energy efficiency of an ICE-based electric generator by optimizing its operating cycle parameters after replacing the base fuel (propane-butane) with synthesis gas based on numerical modeling. **METHODS.** The object of the study was a 1 kW electric generator based on a single-cylinder ICE with external mixing. The article describes the main approaches to creating a mathematical model of the engine operating cycle, the physicochemical properties of the base fuel (propane-butane) and a new laboratory synthesis gas. The simulation results are verified through experimental studies. The differences between simulation and the experiments for the key parameters (power, efficiency, air and fuel consumption) did not exceed 4.0%. The efficiency of the ICE was chosen as a key criterion for optimizing the operating cycle. **RESULTS.** Data on the performance of an ICE powered by propane-butane and synthesis gas for different operating cycle parameters (compression ratio, excess air ratio, ignition timing angle, gas exchange system resistance) were obtained based on mathematical modeling. **CONCLUSION.** It is shown that replacing propane-butane fuel with synthesis gas causes a decrease in engine efficiency of up to 33% (the efficiency of the basic ICE was 0.179 versus an efficiency equal to 0.119 for the efficiency of the converted ICE for a power of 0.59 kW). As a result of optimization, the efficiency of the converted syngas engine was 6.1% higher than that of the base propane-butane ICE, and the power drop did not exceed 8%. Thus, careful refinement of the operating cycle parameters makes it possible to increase the energy efficiency of a synthesis gas engine to the level of an ICE running on traditional fuels.

Keywords: *electric generator, engine, efficiency and energy effectiveness, propane-butane, syngas, optimization, numerical modeling.*

Acknowledgments: *The research funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Ural Federal University Program of Development within the Priority-2030 Program) is gratefully acknowledged.*

For citation: Plotnikov L.V., Krasilnikov D.N., Davydov D.A., Ryzhkov A.F., Shurupov V.A. Improving the energy efficiency of a piston engine powered by synthesis gas by fine-tuning the operating cycle. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (2): 172-186. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-172-186.

Введение (Introduction)

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) является одним из самых распространенных преобразователей энергии, который находит применение в самых различных сферах жизнедеятельности человека. ДВС используется в повседневной жизни (бензиновые инструменты, моторные лодки, мопеды, автомобили и т.д.) и в высокотехнологичных отраслях (авиация, судостроение, энергетика и др.). Поэтому улучшение удельных, технических, экономических и экологических характеристик двигателей остается актуальной задачей для науки, техники и технологий.

Эффективное использование альтернативных (возобновляемых) топлив в ДВС является перспективной задачей для обеспечения устойчивого развития энергетической отрасли [1]. Сегодня ученые активно внедряют применение различных топлив в ДВС: как метан [2], пропан-бутан (П-Б) [3], водород [4], аммиак [5], метанол [6], синтез-газ (С-Г) [7], биотопливо [8] и смеси различных компонентов [9]. Каждое альтернативное топливо имеет свои плюсы и минусы применительно к использованию в двигателе. Поэтому параметры рабочего цикла ДВС необходимо настраивать под конкретное топливо с учетом его физико-химических свойств. Только в этом случае существует возможность получить конкурентно способные характеристики двигателя, работающего на альтернативном топливе.

Синтез-газ, получаемый из угля или древесины, рассматривается как один из наиболее многообещающих и экологически чистых видов топлива для ДВС [10]. В своем составе синтез-газ преимущественно представляет собой газообразное топливо, состоящее из водорода (H_2), метана (CH_4) и угарного газа (CO). Этот газ может быть получен из различных сырьевых материалов, таких как уголь, древесина, сельскохозяйственные отходы, отходы пищевой промышленности, морские водоросли, трава, солома, жом, осадок сточных вод, а также колесные покрышки посредством процессов газификации, пиролиза или риформинга [11]. Синтез-газ является возобновляемым топливом, поскольку он может быть произведен из древесины или отходов деревоперерабатывающих предприятий.

Современные результаты исследований двигателей, работающих на С-Г, представлены далее. Традиционные исследования заключаются в получении технико-экономических характеристик ДВС на синтез-газе, который был получен разными способами и из разных веществ [12, 13]. Так, Kandasamy V.K. и др. исследовали работу ДВС на С-Г, полученном из глицерина [12]. Показано, что мощность двигателя при использовании синтез-газа повышается на 3,15% и происходит снижение выбросов оксидов азота (NO_x) на 21,22% по сравнению с ДВС, работающими на дизельном топливе. Zhou Y. и др. проводили подобные исследования для синтез-газа, получаемого из разных летучих органических соединений [13]. Установлено, что существует экономический эффект от выработки электроэнергии на данном синтез-газе.

Также существует много исследований по сравнению технико-экономических характеристик ДВС, работающих на разных видах топлива, включая синтез-газ [14-16]. Так, Farkhondeh S.A. и др. сравнивали характеристики ДВС с внутренним смесеобразованием, работающего на биогазе, С-Г и дизельном топливе [14]. Максимальный положительный эффект от применения синтез-газа заключается в снижении выбросов (CO) на 71 %, (NO_x) на 25 % и росте мощности на 6 % в сравнении с дизельным топливом. Dhairiyasamy R. и др. изучали работу двухтопливного двигателя, работающего на биодизеле с различными добавками синтез-газа [15]. Добавление синтез-газа позволило снизить удельный расход топлива на 6,5 %, выбросы (CO) упали на 30 %, а выбросы (CH) сократились на 25 %, однако, выбросы NO_x поднялись на 2,1 %. Исследование Kantaroglu E. посвящено анализу характеристик ДВС с искровым зажиганием, работающего на С-Г, водороде и аммиаке [16]. В ходе исследования установлено, что синтез-газ представляет собой конкурентоспособное и экологически чистое топливо, обладающее потенциалом для применения в ДВС с нулевыми выбросами.

Для достижения оптимальных технико-экологических показателей при работе ДВС на С-Г необходимо провести оптимизацию параметров его рабочего цикла [17, 18]. Wei L. и др. осуществляли настройку параметров рабочего цикла двигателя с искровым зажиганием с целью максимального снижения выбросов вредных веществ и сохранении выходной мощности на основе численного моделирования [17]. Ученым удалось достигнуть заметного снижения выбросов (CO), (CH) и (NO_x) при сохранении мощности в сравнении с работой двигателя на бензине. Также существуют исследования по применению алгоритмов

искусственного интеллекта для оптимизации параметров ДВС для работы на С-Г из разного сырья [18]. Показано, что данный подход является целесообразным, действенным и приводит к существенному улучшению эксплуатационных характеристик ДВС.

Отдельным направлением исследований является изучение влияния состава синтез-газа на эксплуатационные показатели ДВС [19, 20]. Jamsran N. и др. наглядно показали наличие существенного влияния состава синтез-газа и его физико-химических свойств на технические и экологические показатели двигателя с воспламенением от сжатия [19]. Epomoto H. получил аналогичные данные для двигателя с внешним смесеобразованием [20].

Важным направлением исследований также является изучение влияния синтез-газа на процесс сгорания в разных ДВС [21, 22]. Ran Z. исследовали процесс сгорания синтез-газа в экстремально обедненной смеси для двигателя искровым зажиганием [21]. Основная цель заключалась в получении стабильного процесса сгорания и уменьшении выбросов вредных веществ. Oleksandr M. и др. улучшали процесс сгорания синтез-газа применительно к двигателю с внешним смесеобразованием [22]. Имеются другие аналогичные исследования, но для двигателя с воспламенением от сжатия. Показано, что переход на синтез-газ требует тщательной настройки параметров двигателя для достижения устойчивого и качественного сгорания рабочего тела.

Цель исследования состояла в повышении КПД и энергоэффективности электрогенератора на базе ДВС путем оптимизации параметров его рабочего цикла после замены базового топлива (пропан-бутана) на синтез-газ на основе численного моделирования. Результаты моделирования верифицировались путем стендовых испытаний ДВС, работающего на П-Б и С-Г.

Научная ценность работы состоит в том, что созданы верифицированные математические модели для расчета рабочего цикла ДВС, работающего на П-Б и С-Г, а также оптимизированы параметры двигателя для работы на газообразном топливе с целью улучшения КПД и энергоэффективности.

Практическая значимость исследования заключается в получении количественных значений параметров рабочего цикла двигателя, работающего на С-Г, с целью достижения высоких эксплуатационных показателей, а также формулировке рекомендаций по эффективному использованию синтез-газа в ДВС.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектом исследований был выбран электрический генератор Huter HT1000L (Китай) на базе четырехтактного, одноцилиндрового поршневого ДВС, работающего на пропан-бутане. Основные технические характеристики генератора: мощность $N_e = 1,0$ кВт; частота вращения на номинальной мощности $n_n = 3000$ мин⁻¹; максимальный крутящий момент $M_{\max} = 4$ Н·м; расход топлива на номинальном режиме $g_n = 450$ г/(кВт·ч); диаметр цилиндра 52 мм; ход поршня 38 мм; степень сжатия $\varepsilon = 7,7$. Данные параметры служили основополагающими при разработке используемой математической модели, а также при осуществлении экспериментальных исследований. Эти параметры являлись базовыми для создаваемой математической модели и для проведения стендовых испытаний ДВС.

Моделирование рабочего процесса рассматриваемого ДВС было выполнено с использованием программы «Дизель-РК», разработанного Московским государственным техническим университетом имени Н.Э. Баумана (г. Москва). Определение параметров газовой среды в цилиндре двигателя и системе газообмена осуществлялось путём численного решения системы дифференциальных уравнений, отражающих законы сохранения энергии и массы, а также уравнение состояния. Данные уравнения были сформулированы для открытых термодинамических систем. Расчеты процессов газообмена учитывают зависимость свойств рабочей среды (рабочего тела) от ее химического состава и температуры. Математическая модель, описывающая эти процессы, базируется на учете неустановившегося течения газа в трубопроводных системах. Для моделирования процесса сгорания в двигателях с искровым зажиганием применяется многозонная модель. Расчет скорости тепловыделения в цилиндре осуществляется методом Вибе. Для определения температурных режимов применяется зонная методика, разработанная профессором Звоновым В.А. Расчет теплообмена в элементах и агрегатах двигателя, осуществляется по отдельности для каждой поверхности. Определение температур этих поверхностей производится путем решения задач теплопроводности. Коэффициент теплоотдачи от газообразного вещества к внутренней поверхности цилиндрической конструкции

вычисляется с использованием формулы Вошни. Более подробное описание математического аппарата программы «Дизель-РК» и пример его использования можно найти в [23].

Базовым топливом для использования в исследуемом электрогенераторе являлся пропан-бутан. В математической модели задавался следующий химический состав П-Б: C_3H_8 – 98,7 %; H_2 – 1,0 %; CO_2 – 0,1 %; N_2 – 0,2 %. Также задавались следующие основные физико-химические свойства пропан-бутана: низшая теплота сгорания $H_u = 46,47$ МДж/кг; молекулярная масса $M = 44,09$ г/моль; плотность $\rho = 1,967$ кг/м³. Данные свойства топлива полностью соответствовали таковым для П-Б, применяемого в стендовых испытаниях.

Альтернативным топливом являлся синтез-газ, который был получен из древесного опила с влажностью 10 % посредством поточной газификации в лаборатории «Новые энергетические технологии» Уральского федерального университета (Екатеринбург). Химический состав лабораторного синтез-газа был следующим: CH_4 – 3,5 %; CO_2 – 14,3 %; H_2 – 8,6 %; N_2 – 55,9 %; CO – 17,7 %. Лабораторный синтез-газ имел следующие физико-химические свойства: низшая теплота сгорания $H_u = 3,58$ МДж/кг; плотность $\rho = 1,214$ кг/м³. Эти данные задавались в математической модели для моделирования рабочего цикла ДВС, работающего на С-Г. Данные свойства топлива полностью соответствовали таковым для синтез-газа, используемого в стендовых испытаниях.

Для верификации математических моделей была создана экспериментальная установка на базе электрического генератора с ДВС с внешним смесеобразованием, технические характеристики которой представлены выше (рис. 1).



Рис. 1. Фотография экспериментального стенда для верификации результатов моделирования:

1 – электрогенератор на базе ДВС; 2 – электрическое нагрузочное устройство; 3 – баллон с пропан-бутаном; 4 – газовый ротаметр; 5 – счетчик расхода воздуха

Fig. 1. Photo of an experimental stand for verifying simulation results: 1 – an electric generator based on an internal combustion engine; 2 – an electric load device; 3 – a propane-butane cylinder; 4 – a gas rotameter; 5 – an air flow meter

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Двигатель мог работать на пропан-бутане и синтез-газе. В ходе проведения опытов была возможность получать (измерять) параметры ДВС (расход топлива и воздуха, КПД, состав отработавших газов) в зависимости от мощности (нагрузки). Испытания проводились на постоянной частоте вращения коленвала $n = 3000$ мин⁻¹ для разной нагрузки (от холостого хода до 0,9 кВт). Воспроизводимость режимов и результатов измерений подтверждалась неоднократным повторением опытов при одинаковых условиях.

Расход газа (пропан-бутана или синтез-газа) определялся посредством газового ротаметра РМС от российской компании «Прибор-М» (г. Москва). В ходе проведения опытов фиксировался аналоговый сигнал на табло прибора. Относительная неопределенность определения расхода газа составляла 2,5 %. Расход воздуха через двигатель определялся посредством расходомера-счетчика Мета-215 также от российской компании «Эмис» (г. Челябинск). Значения расхода воздуха также показывались на панели прибора. Относительная неопределенность определения расхода воздуха составляла 1,5 %.

Нагрузочный стенд для проведения стендовых испытаний был изготовлен самостоятельно. Он представлял собой электрическое нагрузочное устройство на базе

ламп накаливания. Таким образом нагрузка (сопротивление) для электрического генератора задавалась посредством последовательного включения/выключения ламп накаливания мощностью от 50 до 100 Вт. Относительная неопределенность определения мощности ДВС составляла 5,5 %. Серия опытов проводилась минимум 2-3 раза для подтверждения воспроизводимости результатов.

Условия подачи синтез-газа в двигатель были следующими:

- С-Г охлаждался и фильтровался после выхода из газификатора; температура синтез-газа в системе впуска ДВС составляла 46 ± 1 °С;

- С-Г и воздух смешивались в подающей магистрали перед системой впуска двигателя; давление в конце процесса впуска составляло приблизительно 0,11 МПа;

- химический состав и количество синтез-газа, производимого газификатором, оставались стабильными более 1 часа (это условие выполнялось при равномерной подаче опилок в газификатор, стабильном количестве подаваемого воздуха и равномерной температуре в газификаторе); содержание метана в синтез-газе составляло приблизительно 3,6% (изменения в ходе испытаний находились в диапазоне 3,1-3,7%), теплотворная способность С-Г составляла приблизительно 3,77 МДж/кг (изменения в ходе экспериментов находились в пределах $\pm 10\%$); постоянство параметров лабораторного С-Г было достаточным для проведения стендовых испытаний;

- стабильность подачи С-Г в электрогенератор поддерживалась в течение как минимум 40 минут (этого времени достаточно для проведения серии испытаний); подача С-Г в ДВС прекращалась, когда фиксировалось загрязнение фильтра и снижения его производительности (это явление контролировалось путем измерения разницы давлений до и после фильтра); испытания также останавливались в случае перебоев в подаче газа ДВС (перед продолжением испытаний выполнялось техническое обслуживание фильтра).

Верификация результатов моделирования посредством экспериментальных исследований для двигателей, работающих на пропан-бутане и синтез-газе, представлена ниже. Сравнение значений КПД двигателя, работающего на П-Б, для математической модели и испытаний показано на рисунке 2.

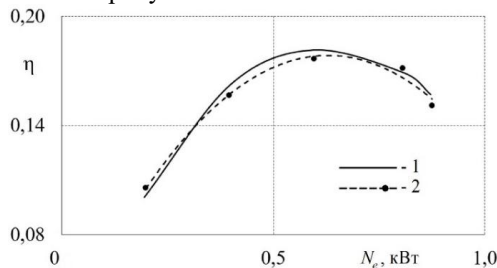


Рис. 2. Расчетно-экспериментальные зависимости КПД η от эффективной мощности N_e для ДВС, работающего на пропан-бутане:

1 – моделирование; 2 – эксперимент

Fig. 2. Computational and experimental dependences of efficiency η on effective power N_e for an internal combustion engine running on propane-butane: 1 - modeling; 2 – experiment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Вид зависимости $\eta = f(N_e)$ является идентичным для моделирования и экспериментов. В частности, функция $\eta = f(N_e)$ является параболической и имеет максимум в районе мощности равной 0,6 кВт. Отличия в значениях КПД двигателя для моделирования и испытаний не превышают 4,1 %. Наименьшая разница получилась в значениях эффективной мощности – не более 0,3 %. Сравнение других показателей ДВС (работа на П-Б) для нагрузки в 0,875 кВт сведены в таблице 1. Аналогичные данные получены также для всех режимов работы электрогенератора (других значений нагрузки).

На основании рисунка 2 и данных в таблице 1 можно заключить, что математическая модель достоверно имитирует и прогнозирует основные показатели рабочего цикла электрогенератора на базе ДВС, работающего на П-Б. Отдельно проводились экспериментальные исследования ДВС, работающего на С-Г, для верификации математической модели. В математической модели и действующем двигателе изменялось только применяемое топливо (П-Б заменялся синтез-газом). Все остальные эксплуатационные параметры (ϵ , ϕ , α и т.д.) и режимы работы ДВС оставались неизменными.

Таблица 1

Table 1

Сравнение показателей ДВС (П-Б) для нагрузки 0,875 кВт, полученных в ходе испытаний и моделирования

Comparison of internal combustion engine parameters (N-B) for a load of 0.875 kW obtained during tests and simulations

Параметр	Испытания	Моделирование	Изменение, %
Эффективная мощность N_e , кВт	0,875	0,872	- 0,3
Расход топлива G_f , кг/ч	0,429	0,416	- 3,0
Удельный расход топлива g , г/(кВт·ч)	490,2	477,2	- 2,7
Расход воздуха G_b , кг/ч	7,00	6,74	- 3,7
КПД η	0,151	0,157	+ 4,1

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сравнение значений КПД двигателя на С-Г для математической модели и испытаний показано на рисунке 3. Данные получены для идентичных условий работы электрогенератора (свойства газа, мощность, частота вращения и т.д.).

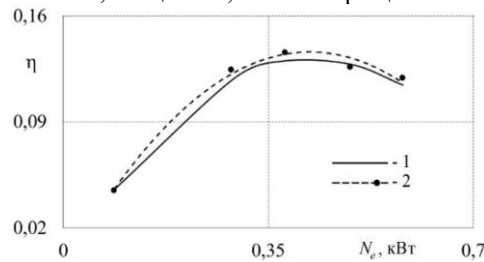


Рис. 3. Расчетно-экспериментальные зависимости КПД η от эффективной мощности N_e для ДВС, работающего на синтез-газе: 1 – моделирование; 2 – эксперимент

Fig. 3. Computational and experimental dependences of efficiency η on effective power N_e for an internal combustion engine powered by synthesis gas: 1 - modeling; 2 – experiment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Вид зависимости $\eta = f(N_e)$ является также параболическим и идентичным для моделирования и экспериментов. Максимальная мощность, развиваемая ДВС, снизилась с 0,9 кВт до 0,6 кВт из-за замены газообразного топлива. В данном случае (синтез-газ), максимум функции $\eta = f(N_e)$ находится в районе 0,4 кВт. Отличия в значениях КПД двигателя для моделирования и испытаний также не превышают 4,0 %. Разница в значениях эффективной мощности ДВС, полученных в ходе опытов и моделирования, сведена к нулю. Сравнение других показателей ДВС (работа на синтез-газа) для нагрузки в 0,58 кВт сведены в табл. 2. Подобные данные получены также для других значений электрической нагрузки (отличия не более 4,0 %).

Таблица 2

Table 2

Сравнение показателей ДВС (синтез-газ) для нагрузки 0,58 кВт, полученных в ходе испытаний и моделирования

Comparison of internal combustion engine (synthesis gas) parameters for a load of 0.58 kW obtained during tests and simulations

Параметр	Испытания	Моделирование	Изменение, %
Эффективная мощность N_e , кВт	0,58	0,58	0
Расход топлива G_f , кг/ч	5,471	5,704	+ 4,3
Удельный расход топлива g , г/(кВт·ч)	9659,6	9834,2	+ 1,8
Расход воздуха G_b , кг/ч	5,2	5,02	- 3,4
КПД η	0,119	0,114	- 4,0

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Закономерности изменения расхода воздуха G_b через систему впуска ДВС, функционирующего на П-Б и С-Г, полученные на основе моделирования и испытаний показаны на рис. 4. Значения G_b находятся в диапазоне от 1,55 до 7,32 кг/ч для ДВС, работающего на П-Б (рис. 4а) и от 1,55 до 5,41 кг/ч для ДВС на С-Г (рис. 4б). Разница в расходных характеристиках объясняется максимально достижимой мощностью ДВС, работающего на П-Б или С-Г. Функция $G_b = f(N_e)$ имеет параболический вид для обоих исследуемых случаев. Различия по данным моделирования и испытаний при работе ДВС на П-Б и С-Г в величинах G_b не превышают 4 %. Созданная математическая модель достаточно точно прогнозирует основные показатели ДВС, работающего на П-Б и С-Г.

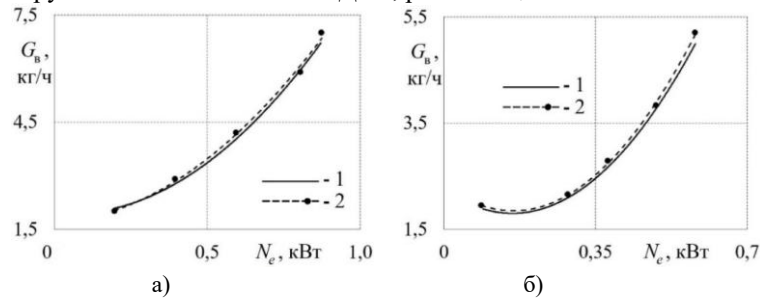


Рис. 4. Расчетно-экспериментальные зависимости массового расхода воздуха G_b от мощности N_e для ДВС, работающего на пропан-бутане (а) и синтез-газа (б): 1 – моделирование; 2 – эксперимент

Fig. 4. Computational and experimental dependences of the mass air flow G_b on the power N_e for an internal combustion engine running on propane-butane (a) and synthesis gas (b): 1 – modeling; 2 – experiment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следует подчеркнуть, что разработанные математические модели с высокой точностью воспроизводят рабочие процессы ДВС, функционирующего на П-Б и С-Г. В связи с этим, данные модели могут быть эффективно использованы для оптимизации и прогнозирования параметров исследуемого электрогенератора на базе ДВС.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

По предварительным результатам моделирования и экспериментальных исследований установлено, что ДВС, работающие на синтез-газе, демонстрируют меньшую эффективность по сравнению с ДВС, использующими П-Б в качестве топлива. Например, КПД падает на 32,8 % при мощности 0,59 кВт. КПД базового двигателя составлял 0,177, а КПД конвертированного ДВС стал 0,119. Это различие обусловлено как энергетическими характеристиками применяемого топлива, так и особенностями протекания рабочих процессов в ДВС. Следовательно, возникает необходимость в оптимизации параметров ДВС, конвертированного для работы на С-Г. Цель данной оптимизации – максимально приблизить показатели двигателя (КПД и энергоэффективность) при работе на С-Г к таковым, достижимым при функционировании на П-Б.

Известно, что технико-экономические показатели ДВС зависят от энергетической ценности топлива [24]. Так же важную роль играет процесс горения, протекающий внутри цилиндра. В частности, одним из важных факторов является скорость горения различных типов газообразного топлива при нормальной работе ДВС. В бедных горючих смесях, к каковым относится пропан-бутан и синтез-газ, процесс горения сильно затягивается [25]. Поэтому для улучшения эксплуатационных и экологических показателей ДВС необходимо проводить оптимизацию рабочего цикла двигателя при изменении свойств применяемого газообразного топлива.

В данном исследовании основным критерием оптимизации являлся КПД ДВС. Необходимо повысить КПД двигателя, конвертированного для работы на синтез-газ, до уровня КПД на базовом топливе (пропан-бутане). Вспомогательным (дополнительным) критерием была мощность ДВС, т.е. необходимо сохранить мощность конвертированного ДВС. Оптимизацию двигателя проводили по следующим параметрам: угол опережения зажигания ϕ ; коэффициент избытка воздуха α ; степень сжатия ϵ ; сопротивление впускной системы p_{in} ; сопротивление выпускной системы p_{ex} .

Оптимизация показателей поршневого ДВС выполнялась на основе верифицированной математической модели, описанной в предыдущем разделе. Результаты оптимизации рабочего цикла ДВС по указанным параметрам показаны на рис. 5-9.

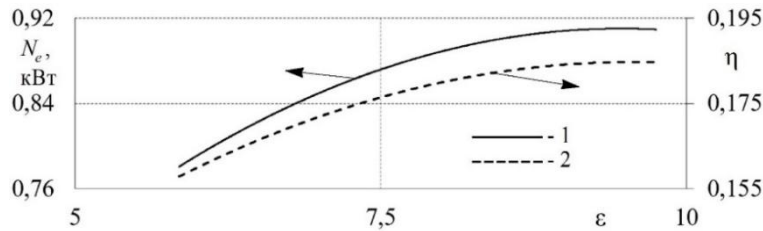


Рис. 5. Расчетные зависимости мощности N_e (1) и КПД η (2) от степени сжатия ϵ для ДВС, работающего на синтез-газе
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 5 видно, что увеличение степени сжатия ϵ (с 6,5 до 9,5) вызывает монотонный подъем мощности на 14,4 % и КПД на (с 0,157 до 0,181) для исследуемого двигателя. Это объясняется расширением температурных границ и улучшением процесса горения газообразного топлива в камере сгорания ДВС. Соответственно, целесообразно повысить ϵ до максимально возможного значения, с учетом отсутствия детонации для обеспечения стабильной работы ДВС на синтез-газе.

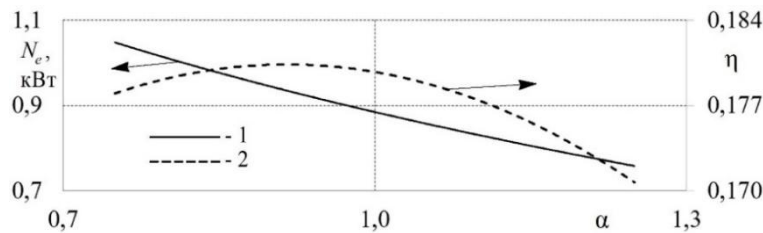


Рис. 6. Расчетные зависимости мощности N_e (1) и КПД η (2) от коэффициента избытка воздуха α для ДВС, работающего на синтез-газе
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Установлена прямо пропорциональная зависимость между ростом α и уменьшением мощности ДВС, функционирующего на С-Г. Данная закономерность представлена на рисунке 6 в виде линейного снижения мощности. Так, падение мощности составляет 25 % при росте α от 0,8 до 1,2. При этом, функция $\eta = f(\alpha)$ не является линейной и имеет максимум (0,181) при $\alpha = 0,8$. Такая величина α является оптимальной для достижения максимальной энергоэффективности ДВС, но недопустимой с экологической точки зрения.

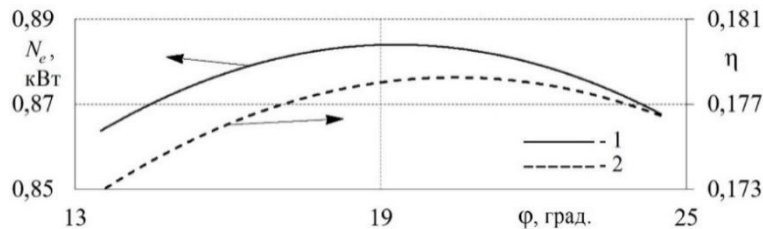


Рис. 7. Расчетные зависимости мощности N_e (1) и КПД η (2) от угла опережения зажигания ϕ для ДВС, работающего на синтез-газе
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 7 видно, что угол опережения зажигания ϕ (исследовалось изменение ϕ от 14 до 24 град.) оказывает существенное влияние на изменение КПД и мощности

двигателя. При этом, функции $\eta = f(\varphi)$ и $N_e = f(\varphi)$ имеют ярко выраженный максимум ($\eta = 0,179$ и $N_e = 0,886$ кВт). Угол φ влияет на время и качество подготовки рабочего тела к сгоранию. Например, для достижения максимального КПД ДВС на С-Г необходимо использовать $\varphi = 16$ град. поворота коленчатого вала.

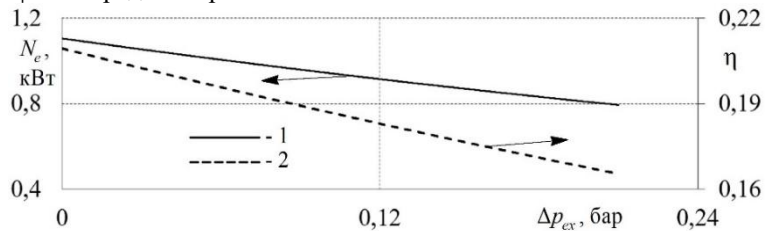


Рис. 8. Расчетные зависимости мощности N_e (1) и КПД η (2) от сопротивления в выпускной системе p_{ex} для ДВС, работающего на синтез-газе

Fig. 8. Calculated dependences of power N_e (1) and efficiency η (2) on the resistance in the exhaust system of the p_{ex} for an internal combustion engine running on synthesis gas

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Установлено также линейное снижение мощности и КПД ДВС на С-Г с ростом сопротивления выпускной системы (рис. 8). Падение мощности достигает 22 %, а КПД ДВС снижается на 21,4 % (с 0,21 до 0,165) при увеличении Δp_{ex} с 0 до 0,22 бар. Это объясняется значительным ухудшением очистки цилиндра от отработавших газов и последующим уменьшением количества нового рабочего тела, попадающего в цилиндр ДВС в процессе впуска.

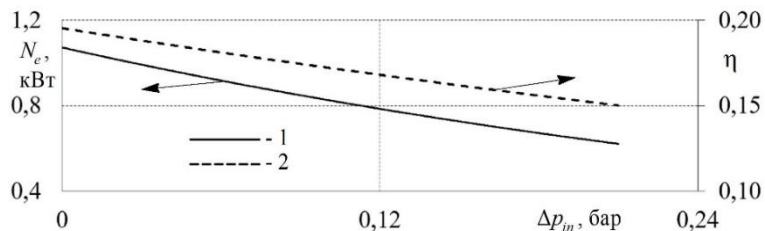


Рис. 9. Расчетные зависимости мощности N_e (1) и КПД η (2) от сопротивления во впускной системе Δp_{in} для ДВС, работающего на синтез-газе

Fig. 9. Calculated dependences of power N_e (1) and efficiency η (2) on the resistance in the intake system of the Δp_{in} for an internal combustion engine running on synthesis gas

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Выявлено линейное снижение мощности и КПД ДВС на С-Г с ростом сопротивления впускной системы (рис. 9). Падение мощности достигает 40 %, КПД ДВС снижается на 24,2 % (с 0,198 до 0,15) при увеличении Δp_{in} с 0 до 0,22 бар. Это связано с существенным снижением качества заполнения цилиндра рабочим телом (воздухом с синтез-газом).

Полученные зависимости позволили выбрать новые параметры ДВС для работы на С-Г для достижения максимального значения КПД:

- необходимо изменить угол опережения зажигания φ с 21,5 до 16 град.;
- необходимо уменьшить коэффициент избытка воздуха α с 1,0 до 0,8;
- необходимо увеличить степень сжатия ϵ с 7,7 до 9,6;
- необходимо уменьшить сопротивление впускной системы двигателя с 0,08 до 0,02 бар;
- необходимо снизить сопротивление выпускной системы 0,14 до 0,02 бар.

Большинство предлагаемых изменений могут быть реализованы посредством настройки (регулировки) системы зажигания и топливной системы, т.е. без существенного изменения конструкции ДВС. Наиболее сложное и трудоемкое изменение является повышение степени сжатия. Оно потребует модификации либо головки цилиндра (удаление материала), либо изменения конструкции коленвала, либо доводки геометрии поршня.

На основании полученных результатов была создана математическая модель нового (оптимизированного) ДВС на синтез-газе с параметрами, указанными выше. Технико-экономические параметры оптимизированного двигателя сравнивались с таковыми для

базового ДВС, работающего на П-Б (параметры оставались неизменными). Сравнение мощности и КПД этих поршневых ДВС в зависимости от частоты вращения коленчатого вала представлены на рис. 10.

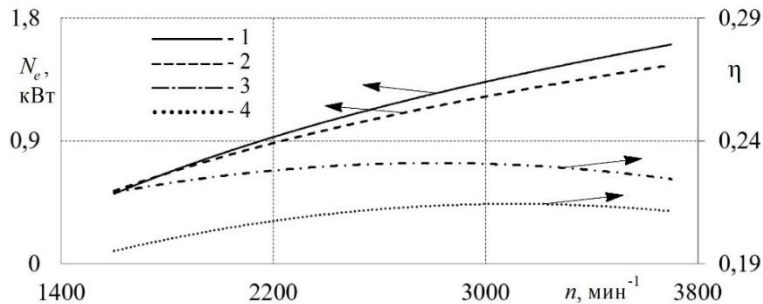


Рис. 10. Расчетные зависимости мощности N и КПД η от частоты вращения коленвала n для двигателя, работающего на разных видах топлива: 1 – пропан-бутан (N); 2 – синтез-газ (N); 3 – пропан-бутан (η); 4 – синтез-газ (η)

Fig.10. Calculated dependences of power N and efficiency η on the speed of rotation of the crankshaft n for an engine running on different types of fuel: 1 – propane-butane (N); 2 – synthesis gas (N); 3 – propane-butane (η); 4 – synthesis gas (η)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 10 видно, что КПД оптимизированного ДВС на С-Г стало выше на 6-9 % в сравнении с базовым двигателем, работающем на П-Б. Мощность оптимизированного ДВС на синтез-газе оказалась ниже на 0-8 % по сравнению с двигателем, работающем на пропан-бутане. Таким образом, можно констатировать, что результаты исследования были достигнуты. Соответственно, настройка параметров рабочего цикла является действенным способом улучшения энергоэффективности для ДВС, работающих на С-Г.

Следует отметить, что полученные результаты имеют естественные ограничения. Они применимы только к небольшим ДВС с внешним смесеобразованием и мощностью не более 1 кВт. Состав и свойства С-Г оказывают существенное влияние на КПД и энергоэффективность ДВС. Поэтому результаты применимы только к газообразным топливам с физико-химическими свойствами, указанными в статье. Вариации мощности и размерности ДВС, а также свойств газообразных топлив требуют дальнейших исследований.

Выводы

Основные выводы исследования состоят в следующем:

1. Разработаны математические модели рабочего цикла поршневого ДВС, работающего на пропан-бутане и синтез-газе;
2. Создан экспериментальный стенд с нагрузочным устройством и измерительной системой для верификации результатов моделирования;
3. Отличия результатов моделирования и экспериментальных данных составили не более 4,0 %; соответственно, созданные математические модели достоверно имитирует рабочий цикл ДВС, работающего на газообразном топливе (пропан-бутане и синтез-газе);
4. Установлено, что замена топлива с П-Б на синтез-газ вызывает снижение КПД ДВС вплоть до 32,8 %; соответственно, необходимо оптимизировать эксплуатационные параметры ДВС для работы на новом газообразном топливе (С-Г);
5. Оптимизация показателей ДВС проводилась по следующим параметрам: угол опережения зажигания; коэффициент избытка воздуха; степень сжатия; сопротивление впускной и выпускной систем; основной критерий оптимизации был КПД двигателя (дополнительны – мощность ДВС);
6. КПД оптимизированного двигателя на С-Г стал выше на 6,1 % по сравнению с базовым ДВС, работающем на П-Б; падение эффективной мощности не превышало 8,0 %;
7. Синтез-газ может рассматриваться в качестве альтернативного вида топлива для поршневых ДВС.

Полученные данные уточняют теорию поршневых ДВС при использовании альтернативных (возобновляемых) топлив и могут использоваться для модернизации и создания газовых ДВС. Направление дальнейших исследований может быть связано с

экспериментальными испытаниями ДВС с оптимизированными параметрами и изучением двигателей другой размерности и мощности.

Литература

1. Longwic R. Diesel Engine Operations with Alternative Fuels. USA: CRC Press. 2024. 86 p.
2. de Oliveira Gonçalves F., Savioli Lopes M., Savioli Lopes E., Maciel Filho R. Techno-economic and environmental analysis of decarbonization pathways for road freight transportation in Brazil // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 222. Article number 115991.
3. Gonca G., Genc I. Effects of ternary mixtures of propane-butane-hydrogen and different liquid fuels on the performance specifications of a spark ignition engine // *Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects*. 2022. Vol. 44(4). P. 8890-8907.
4. Plotnikov L.V., Ulman N.V. Computational and analytical evaluation of the efficiency of using hydrogen as a fuel in an internal combustion engine // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 723. Article number 052018.
5. Zhou X., Li T., Wang N., Wang X., Wu Z., Li Z., Guo X., Chen R., Huang S., Yi P., Li S. Scaled model experiments for ammonia engines under the high-pressure direct-injection mode // *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 277. Article number 127170.
6. Rao X., Yuan C., Guo Z., Xu Y., Sheng C. Methanol as an alternative fuel for marine engines: A comprehensive review of current state, opportunities, and challenges // *Renewable Energy*. 2025. Vol. 252. Article number 123562.
7. Enomoto H. Gas component effect on energy loss of reciprocated engine operated by bio-syngas from wood gasifier // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. Vol. 15(7). P. 11027-11043.
8. Abebe F.F., Nallamothu R.B., Ancha V.R., Teklehaimanot H., Tefera N.T. Optimized biodiesel production from *Maesa lanceolata* seeds and its emission analysis: A sustainable non-edible feedstock for renewable energy // *Biomass and Bioenergy*. 2025. Vol. 200. Article number 108045.
9. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И., Петров Т.И. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. Т. 22. № 1. С. 38-48.
10. Christopher Selvam D., Devarajan Y., Nagappan B., Arora A., Madhan Kumar G., Pradhan D. Sustainable fuel solutions: a comprehensive review of syngas in internal combustion engines // *Chemical Papers*. 2025. Vol. 79(7). P. 4019-4027.
11. Morrone B., Bracciano P., Cirillo D., La Villetta M., Caputo C. Exergy and economic analysis of a micro-cogeneration system coupled with a biomass gasifier // *Renewable Energy*. 2025. Vol. 244. Article number 122574.
12. Kandasamy V.K., Munimathan A., Rajendran S., Dhairiyasamy R. Syngas production from aqueous phase reforming of glycerol–water mixture for compression ignition engine // *Energy and Environment*. 2024. Vol. 35(7). P. 3803-3832.
13. Zhou Y., Ma X., Chen Z., Gong H., Chen L., Yu H. Study on the feasibility of converting the recovered volatile organic compounds to syngas via catalytic steam reforming for gas-fueled power generation // *Energy*. 2023. Vol. 263. Article number 125761.
14. Farkhondeh S.A., Abbaspour-Fard M.H., Zareei J. Investigation of the effects of syngas-biogas blends on RCCI engine with direct diesel injection: a computational study of performance, knock, and emissions // *Energy Conversion and Management*. 2025. Vol. 26. Article number 101021.
15. Dhairiyasamy R., Dixit S., Varshney D., Gabiriel D. Renewable syngas and biodiesel dual fuel applications for enhanced engine performance and emission control // *Industrial Crops and Products*. 2025. Vol. 225. Article number 120509.
16. Kantaroğlu E. CFD-Based Analysis of Performance and Emissions in an i-DSI Engine Using Various E-Fuels and Syngas // *Flow Turbulence and Combustion*. 2025. DOI: 10.1007/s10494-025-00660-9

17. Wei L., Li X., Yang W., Dai Y., Wang C.-H. Optimization of operation strategies of a syngas-fueled engine in a distributed gasifier-generator system driven by horticulture waste // Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 208. Article number 112580.

18. Das S., Tamang S.K. Multi-objective optimization of a dual fuel CI engine powered with syngas and pilot diesel using TLBO algorithm: A metaheuristic approach // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1372(1). Article number 012097.

19. Jamsran N., Park H., Lee J., Oh S., Kim C., Lee Y., Kang K. Syngas composition for improving thermal efficiency in boosted homogeneous charge compression ignition engines // Fuel. 2022. Vol. 321. Article number 124130.

20. Enomoto H. Gas component effect on energy loss of reciprocated engine operated by bio-syngas from wood gasifier // Biomass Conversion and Biorefinery. 2025. Vol. 15(7). P. 11027-11043.

21. Ran Z., Hariharan D., Lawler B., Mamalis S. Experimental study of lean spark ignition combustion using gasoline, ethanol, natural gas, and syngas // Fuel. 2019. Vol. 235. P. 530-537.

22. Oleksandr M., Arkadii P., Wei K. Analysis of Syngas Combustion Process in Piston Engines // Problems of the Regional Energetics. 2024. Vol. 4. P. 118-126.

23. Plotnikov L.V. Preparation and Analysis of Experimental Findings on the Thermal and Mechanical Characteristics of Pulsating Gas Flows in the Intake System of a Piston Engine for Modelling and Machine Learning // Mathematics. 2023. Vol. 11(8). Article number 1967.

24. Hafis M., Balaji K., Tamilarasan N., Senthilkumar D., Sakthivel R. A review on alternative fuels: Spray characteristics, engine performance and emissions effect // Sustainable Futures. 2025. Vol. 9. Article number 100456.

25. Enomoto H. Gas component effect on energy loss of reciprocated engine operated by bio-syngas from wood gasifier // Biomass Conversion and Biorefinery. 2025. Vol. 15(7). P. 11027-11043.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: leonplot@mail.ru.

Красильников Дмитрий Николаевич – магистрант кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: dima_krasilnikov_2017@mail.ru.

Давыдов Данил Алексеевич – аспирант кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: dda_2003@bk.ru.

Рыжков Александр Филиппович – д-р техн. наук, заведующий лабораторией новых энергетических технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: a.f.ryzhkov@urfu.ru.

Шурупов Владислав Александрович – аспирант кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: shurupov.vladislav@yandex.ru.

References

1. Longwic R. Diesel Engine Operations with Alternative Fuels. USA: CRC Press. 2024. 86 p.

2. de Oliveira Gonçalves F., Savioli Lopes M., Savioli Lopes E., Maciel Filho R. Techno-economic and environmental analysis of decarbonization pathways for road freight transportation in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025;222:115991.

3. Gonca G., Genc I. Effects of ternary mixtures of propane-butane-hydrogen and different liquid fuels on the performance specifications of a spark ignition engine. Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects, 2022;44(4):8890-8907.

4. Plotnikov L.V., Ulman N.V. Computational and analytical evaluation of the efficiency of using hydrogen as a fuel in an internal combustion engine. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021;723:052018.
5. Zhou X., Li T., Wang N., Wang X., Wu Z., Li Z., Guo X., Chen R., Huang S., Yi P., Li S. Scaled model experiments for ammonia engines under the high-pressure direct-injection mode. *Applied Thermal Engineering*, 2025;277:127170.
6. Rao X., Yuan C., Guo Z., Xu Y., Sheng C. Methanol as an alternative fuel for marine engines: A comprehensive review of current state, opportunities, and challenges. *Renewable Energy*, 2025;252:123562.
7. Enomoto H. Gas component effect on energy loss of reciprocated engine operated by bio-syngas from wood gasifier. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2025;15(7):11027-11043.
8. Abebe F.F., Nallamothu R.B., Ancha V.R., Teklehaimanot H., Tefera N.T. Optimized biodiesel production from *Maesa lanceolata* seeds and its emission analysis: A sustainable non-edible feedstock for renewable energy. *Biomass and Bioenergy*, 2025;200:108045.
9. Safin AR, Ivshin IV, Gracheva EI, Petrov TI. Development of a mathematical model of an autonomous power supply source with a free piston motor on the basis of a synchronous electric returning machine with a permanent magnets. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):38-48.
10. Christopher Selvam D., Devarajan Y., Nagappan B., Arora A., Madhan Kumar G., Pradhan D. Sustainable fuel solutions: a comprehensive review of syngas in internal combustion engines. *Chemical Papers*, 2025;79(7):4019-4027.
11. Morrone B., Bracciano P., Cirillo D., La Villetta M., Caputo C. Exergy and economic analysis of a micro-cogeneration system coupled with a biomass gasifier. *Renewable Energy*, 2025;244:122574.
12. Kandasamy V.K., Munimathan A., Rajendran S., Dhairiyasamy R. Syngas production from aqueous phase reforming of glycerol–water mixture for compression ignition engine. *Energy and Environment*, 2024;35(7):3803-3832.
13. Zhou Y., Ma X., Chen Z., Gong H., Chen L., Yu H. Study on the feasibility of converting the recovered volatile organic compounds to syngas via catalytic steam reforming for gas-fueled power generation. *Energy*, 2023;263:125761.
14. Farkhondeh S.A., Abbaspour-Fard M.H., Zareei J. Investigation of the effects of syngas-biogas blends on RCCI engine with direct diesel injection: a computational study of performance, knock, and emissions. *Energy Conversion and Management*, 2025;26:101021.
15. Dhairiyasamy R., Dixit S., Varshney D., Gabriel D. Renewable syngas and biodiesel dual fuel applications for enhanced engine performance and emission control. *Industrial Crops and Products*, 2025;225:120509.
16. Kantaroğlu E. CFD-Based Analysis of Performance and Emissions in an i-DSI Engine Using Various E-Fuels and Syngas. *Flow Turbulence and Combustion*, 2025. DOI: 10.1007/s10494-025-00660-9
17. Wei L., Li X., Yang W., Dai Y., Wang C.-H. Optimization of operation strategies of a syngas-fueled engine in a distributed gasifier-generator system driven by horticulture waste. *Energy Conversion and Management*, 2020;208:112580.
18. Das S., Tamang S.K. Multi-objective optimization of a dual fuel CI engine powered with syngas and pilot diesel using TLBO algorithm: A metaheuristic approach. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2024;1372(1):012097.
19. Jamsran N., Park H., Lee J., Oh S., Kim C., Lee Y., Kang K. Syngas composition for improving thermal efficiency in boosted homogeneous charge compression ignition engines. *Fuel*, 2022;321:124130.
20. Enomoto H. Gas component effect on energy loss of reciprocated engine operated by bio-syngas from wood gasifier. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2025;15(7):11027-11043.
21. Ran Z., Hariharan D., Lawler B., Mamalis S. Experimental study of lean spark ignition combustion using gasoline, ethanol, natural gas, and syngas. *Fuel*, 2019;235:530-537.
22. Oleksandr M., Arkadii P., Wei K. Analysis of Syngas Combustion Process in Piston Engines. *Problems of the Regional Energetics*, 2024;4:118-126.
23. Plotnikov L.V. Preparation and Analysis of Experimental Findings on the Thermal and Mechanical Characteristics of Pulsating Gas Flows in the Intake System of a Piston Engine for Modelling and Machine Learning. *Mathematics*, 2023;11(8):1967.

24. Hafis M., Balaji K., Tamilarasan N., Senthilkumar D., Sakthivel R. A review on alternative fuels: Spray characteristics, engine performance and emissions effect. *Sustainable Futures*, 2025;9:100456.

25. Enomoto H. Gas component effect on energy loss of reciprocated engine operated by bio-syngas from wood gasifier. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2025;15(7):11027-11043.

Authors of the publication

Leonid V. Plotnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Dmitry N. Krasilnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Danil A. Davydov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Alexander F. Ryzhkov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Vladislav A. Shurupov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **02.02.2026 г.**

Отредактировано **10.03.2026 г.**

Принято **17.03.2026 г.**