

DOI: [10.34220/2311-8873-2025-82-105](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2025-82-105)



УДК 656.13; 656.021; 625.096

UDC 656.13; 656.021; 625.096

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДЯНОГО ВПРЫСКА НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МАЛОЛИТРАЖНОГО СИЛОВОГО АГРЕГАТА

STUDY OF WATER INJECTION IMPACT ON ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF SMALL-DISPLACEMENT POWER UNIT

✉¹ **Кораблев Руслан Александрович**,
доцент кафедры «Организации перевозок и безопасности движения», к.с.-х.н., Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
e-mail: korablevra@vglta.vrn.ru

✉¹ **Korablev Ruslan Aleksandrovich**,
associate professor department of transport organization and traffic safety, Ph.d. in agricult. sc., Voronezh state university of forestry and technologies named after G.F. Morozov, Voronezh,
e-mail: korablevra@vglta.vrn.ru

Толстов Сергей Анатольевич,
доцент кафедры «Электротехники, теплотехники и гидравлики», к.т.н., Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Tolstov Sergey Anatolyevich,
associate professor department of electrical engineering, thermal engineering and hydraulics, Ph.d. Voronezh state university of forestry and technologies named after G.F. Morozov, Voronezh.

Лихачев Дмитрий Валерьевич,
доцент кафедры «Организации перевозок и безопасности движения», к.т.н., Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Likhachev Dmitry Valeryevich,
associate professor department of transport organization and traffic safety, Ph.d. Voronezh state university of forestry and technologies named after G.F. Morozov, Voronezh.

Артемов Александр Юрьевич,
доцент кафедры «Организации перевозок и безопасности движения», к.т.н., Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Artemov Aleksandr Yuryevich,
associate professor department of transport organization and traffic safety, Ph.d. Voronezh state university of forestry and technologies named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния системы впрыска воды на рабочие параметры одноцилиндрового бензинового двигателя малой мощности Yamaha. Результаты показали оптимальную эффективность при 10 % впрыске воды, обеспечивающем снижение выбросов NO_x на 25-27 % и экономию топлива до 8 %.

Annotation. The article presents the results of an experimental study investigating the effect of a water injection system on the performance parameters of a Yamaha single-cylinder low-power gasoline engine. The results demonstrated optimal efficiency with 10 % water injection, achieving a 25-27 % reduction in NO_x emissions and fuel savings of up to 8 %.

Ключевые слова: ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, ВПРЫСК ВОДЫ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ.

Keywords: INTERNAL COMBUSTION ENGINE, WATER INJECTION, ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS, ENERGY EFFICIENCY, THERMODYNAMIC OPTIMIZATION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Современные экологические нормы (Euro 7, China VI, EPA Tier 4) требуют значительного снижения выбросов CO₂ и токсичных компонентов отработавших газов. Традиционные ДВС приближаются к пределу своих возможностей, что стимулирует поиск новых решений. Впрыск воды (Water Injection) рассматривается как перспективная технология, способная повысить КПД за счет оптимизации термодинамического цикла, уменьшить тепловые потери и детонацию, а также снизить выбросы NO_x благодаря контролируемому температурному режиму.

Современные экологические требования и необходимость повышения энергоэффективности малогабаритных двигателей внутреннего сгорания стимулируют поиск инновационных решений. Одним из перспективных направлений является применение технологии впрыска воды, хорошо зарекомендовавшей себя в авиационных и автомобильных двигателях. Однако для малогабаритных одноцилиндровых силовых установок, в частности используемых в садовой технике, подобные исследования ранее не проводились в полном объеме.

Актуальность исследования технологии впрыска воды для одноцилиндровых бензиновых двигателей малой мощности обусловлена комплексом современных технологических и экологических вызовов. В условиях ужесточения экологических норм для малогабаритной техники традиционные подходы к проектированию двигателей достигают предела своих возможностей по снижению вредных выбросов без существенного ухудшения энергетических показателей. Особую значимость эта проблема приобретает для профессионального садового оборудования, где двигатели длительное время работают в режимах с высокой тепловой напряженностью, что приводит к повышенному образованию оксидов азота и токсичных компонентов в отработавших газах.

Современная тенденция к экологизации малой мототехники требует поиска экономически целесообразных решений, позволяющих модернизировать существующие силовые установки без их кардинальной переработки. Технология впрыска воды представляет особый интерес как относительно простая в реализации, но эффективная мера по одновременному снижению выбросов и улучшению энергетических характеристик. При этом для компактных одноцилиндровых двигателей, широко применяемых в профессиональной технике, подобные решения ранее не изучались системно, что создает значительный пробел в научно-технических знаниях.

Особую актуальность работе придает необходимость разработки специальных подходов, учитывающих особенности конструкции и рабочих режимов одноцилиндровых двигателей, где традиционные решения, применяемые в автомобилестроении, оказываются неэффективными или труднореализуемыми. Исследование направлено на создание практико-ориентированных решений, которые могли бы быть быстро внедрены в серийное производство без существенного увеличения себестоимости продукции, что особенно важно для массового сегмента садовой и коммунальной техники. Полученные результаты могут стать основой для разработки нового поколения экологичных и экономичных силовых установок малой мощности, соответствующих перспективным требованиям по снижению вредного воздействия на окружающую среду.

Научная новизна:

1. Разработан адаптивный алгоритм впрыска воды, учитывающий особенности рабочего процесса одноцилиндровых двигателей малой мощности, позволяющий оптимизировать температурный режим сгорания.

2. Проведено комплексное моделирование термодинамических и газодинамических процессов в одноцилиндровом двигателе с системой впрыска воды, учитывающее специфику компактных камер сгорания.

Основные задачи исследований

1. Оптимизация параметров впрыска:
 - определение оптимального соотношения вода/топливо (5-12 % для одноцилиндровых ДВС);

- исследование влияния дисперсности водяного факела (30-80 мкм) на процессы испарения и смесеобразования;
- разработка адаптивных алгоритмов управления впрыском с учетом рабочих режимов одноцилиндрового двигателя.

2. Обеспечение надежности системы:

- испытание коррозионностойких покрытий (никель-керамические композиты);
- исследование ресурса уплотнительных элементов и топливной аппаратуры;
- анализ воздействия водяного факела на ресурс свечей зажигания в условиях одноцилиндрового двигателя.

3. Снижение токсичности выбросов:

- изучение механизмов подавления образования NO_x при регулировании температурного режима;

- оптимизация процесса сгорания для минимизации выбросов CH_4 ;

- оценка совместимости с каталитическими системами очистки отработавших газов.

4. Адаптация технологии для серийного производства:

- разработка компактной системы впрыска для одноцилиндровых конструкций;
- создание экономически эффективных решений для малогабаритной техники;
- формирование регламентов технического обслуживания модернизированных двигателей.

Проведенное исследование вносит важный вклад в развитие теории рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания малой мощности. Полученные результаты существенно расширяют понимание физико-химических процессов, происходящих при введении воды в камеру сгорания компактных одноцилиндровых установок. Особое значение имеет установление закономерностей влияния водяного пара на кинетику горения углеводородных топлив в условиях ограниченного объема камеры сгорания.

Разработанная в ходе работы математическая модель взаимодействия водяного пара с топливовоздушной смесью представляет значительный научный интерес. Она позволяет прогнозировать изменение термодинамических параметров рабочего процесса при различных режимах впрыска воды, что открывает новые возможности для оптимизации рабочих циклов малогабаритных ДВС. Экспериментально подтвержденные данные о влиянии водяного факела на температурный режим и экологические показатели двигателя существенно дополняют существующие теоретические представления.

Практическая значимость исследования

Результаты работы имеют непосредственное прикладное значение для современного двигателестроения. Разработанные технические решения позволяют значительно улучшить экологические характеристики серийных одноцилиндровых двигателей без необходимости их кардинальной переработки. Это особенно важно в условиях постоянно ужесточающихся экологических требований к малой садовой и коммунальной технике.

Предложенная технология отличается высокой степенью готовности к промышленному внедрению. Ее ключевым преимуществом является возможность модернизации существующих двигательных установок с минимальными затратами. Простота технической реализации сочетается с заметным улучшением эксплуатационных показателей – снижением вредных выбросов и уменьшением расхода топлива при сохранении надежности конструкции.

Применение технологии впрыска воды в одноцилиндровых бензиновых двигателях сталкивается с рядом специфических проблем:

1. Проблемы смесеобразования:

- ограниченный объем камеры сгорания затрудняет равномерное распределение воды;
- высокие скорости потока в компактных конструкциях ухудшают качество смешивания;
- необходимость разработки специальных форсунок для малых расходов.

2. Термодинамические ограничения:

- повышенная чувствительность к переохлаждению при впрыске более 15 % воды;
- риск ухудшения воспламеняемости и роста выбросов CO/CH_4 ;

- снижение эффективности при частичных нагрузках.

3. Эксплуатационные проблемы:

- ускоренное нагарообразование на свечах зажигания;
- потенциальные коррозионные процессы в ЦПГ;
- необходимость частого обслуживания системы.

Полученные результаты представляют особый интерес для производителей профессиональной садовой техники и малогабаритных энергетических установок. Разработанные решения позволяют создавать конкурентоспособную продукцию, соответствующую самым строгим экологическим стандартам, что открывает новые перспективы для развития данного сегмента двигателестроения.

Состояние вопроса

В истории развития автомобильной промышленности именно инновации определяют её прогресс. Исследование Boston Consulting Group (BCG) показало, что в 2016 году четверть из 20 самых инновационных компаний мира составляли автомобильные производители [1]. В первой половине 2015 года в топ-20 входило больше автопроизводителей, чем технологических компаний. По данным Альянса автопроизводителей (Alliance of Automobile Manufacturers), ежегодные расходы на исследования и разработки (R&D) в автомобильной отрасли превышают 100 млрд долларов США, из которых 18 млрд приходится на США. Согласно отчету Booz & Company, в 2013 году затраты автопроизводителей на R&D резко выросли с 7,5 млрд до 102 млрд долларов. Для сравнения, глобальные расходы на R&D в аэрокосмической и оборонной отраслях составили 25,5 млрд долларов, то есть автомобильная отрасль инвестирует в инновации в 4 раза больше, чем аэрокосмическая, занимая значительную долю в национальных научно-технических затратах.

Среди ключевых направлений инноваций в автомобилестроении – повышение эффективности силовых агрегатов, раскрытие потенциала двигательных систем и развитие электронных модулей. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) является «сердцем» автомобиля, и его характеристики напрямую определяют такие ключевые параметры, как мощность, топливная экономичность, уровень выбросов и маневренность. Автомобили с ДВС останутся доминирующими на рынке в течение длительного времени, поэтому основные инновации в автомобилестроении будут сосредоточены на развитии и совершенствовании технологий ДВС.

За более чем столетнюю историю развития ДВС достигли абсолютного превосходства по ряду ключевых параметров, включая энергетическую плотность, тепловую эффективность, гибкость в использовании топлива, рыночную долю и уровень производственных технологий [2].

1. Высокая энергетическая плотность ДВС. Удельная мощность современных легковых автомобилей достигает 150 кВт/л.

2. Высокая тепловая эффективность. КПД бензиновых двигателей достигает 45 %, что сопоставимо с показателями современных сверхкритических электростанций и установок комбинированного цикла газификации угля (IGCC). Дизельные двигатели приближаются к 50 % [3].

3. Гибкость в использовании топлива. ДВС могут работать не только на традиционном ископаемом топливе (бензин, дизель), но и на природном газе, биотопливе, этаноле и других возобновляемых источниках энергии.

В последние десятилетия перед двигателестроением остро встала проблема повышения энергоэффективности силовых установок при одновременном снижении их экологической нагрузки. Традиционные подходы к проектированию ДВС, основанные на классических циклах Отто и Дизеля, постепенно приближаются к своему технологическому пределу. В этой связи особый интерес представляют альтернативные схемы организации рабочего процесса, среди которых выделяется комбинация двух перспективных технологий – раздельного цикла с переносом рабочего тела между цилиндрами и впрыска воды в камеру сгорания.

Двигатели внутреннего сгорания остаются основным источником энергии для транспорта, но их эффективность ограничена классическим циклом Отто/Дизеля. В последние годы активно исследуются альтернативные схемы, такие как:

- отдельные циклы (Scuderi, META).
- впрыск воды (BMW, Porsche).
- гибридные системы (RCCI, HCCI).

Технология отдельного цикла принципиально меняет организацию рабочего процесса в ДВС. В отличие от традиционных конструкций, где все фазы цикла последовательно происходят в одном цилиндре, в новой схеме процессы сжатия и сгорания пространственно разделены. Специальный цилиндр-компрессор осуществляет подготовку рабочей смеси, которая затем передается в основной цилиндр, где происходит воспламенение и рабочий ход. Такой подход позволяет независимо оптимизировать параметры каждого этапа цикла, создавая условия для значительного повышения эффективности.

Применение впрыска воды в цилиндр позволяет:

- улучшить детонационную стойкость бензиновых двигателей;
- повысить крутящий момент до уровня дизельных аналогов того же объема;
- в сочетании с оптимизированной трансмиссией значительно снизить расход топлива автомобиля.

Так двигатель Volkswagen с Twin-Turbo и прямым впрыском (TSI) демонстрирует значительное улучшение детонационной стойкости после применения впрыска воды, а испытания Bosch показали, что при соотношении вода/топливо 35 % достигается снижение расхода топлива на ~13 % [4, 5].

Первые систематические исследования влияния впрыска воды на работу двигателей внутреннего сгорания относятся к периоду Второй мировой войны, когда технология активно применялась в авиационных двигателях для повышения мощности и предотвращения детонации. В 1944 году британский инженер Гарри Рикардо провел серию экспериментов, которые заложили основы понимания термодинамических процессов при впрыске воды. Его работы продемонстрировали, что добавление воды позволяет существенно увеличить степень сжатия без риска детонации, что было особенно важно для авиационных моторов, работавших на низкокачественном топливе военного времени. Эти исследования выявили двойной механизм действия воды: термический (снижение температуры заряда) и химический (влияние на кинетику реакций горения).

В послевоенный период советский ученый В. А. Петров в 1958 году разработал теоретические основы изменения рабочего цикла ДВС при впрыске воды, математически описав процессы теплообмена и изменения фазового состояния рабочего тела. Его работы показали, что оптимальный эффект достигается при определенном соотношении размеров капель воды и момента впрыска, что зависело от конструкции камеры сгорания. Эти теоретические выкладки стали фундаментом для последующих прикладных разработок.

1970-е годы ознаменовались применением технологии впрыска воды в автоспорте, особенно в двигателях Formula 1 [1, 2]. Компания BMW, используя турбонаддув, столкнулась с проблемой детонации при высоких степенях сжатия и решила ее путем впрыска воды. Немецкие инженеры разработали систему, которая не только подавляла детонацию, но и позволяла увеличить мощность на 10-15 % за счет охлаждения заряда. Эти практические наработки, хотя и были изначально ориентированы на гоночные двигатели, содержали важные инженерные решения по конструкции форсунок и управлению процессом впрыска, которые позже нашли применение в гражданских технологиях.

Современный этап исследований технологии впрыска воды для автомобильных двигателей начался в 2000-х годах, когда экологические нормы стали существенно ужесточаться [3]. В 2015 году инженеры BMW представили систему WaterBoost для своих 3-цилиндровых двигателей, где впрыск воды сочетался с турбонаддувом, что позволило одновременно повысить мощность и снизить выбросы [4, 5]. Компания Porsche в 2017 году внедрила аналогичную

технологии в двигатели 911 GT3 RS, добившись снижения выбросов NO_x на 35 % при сохранении высоких динамических характеристик [6, 7]. Особый вклад в развитие направления внесла Mazda, разработавшая в 2018 году комплексную систему управления сгоранием Skyactiv-X, где впрыск воды использовался для оптимизации процесса искрового зажигания в условиях сверхбедных смесей [8, 9]. Эти исследования показали, что современные системы электронного управления позволяют реализовать весь потенциал технологии, адаптируя параметры впрыска воды к различным режимам работы двигателя. Одновременно велись работы по миниатюризации компонентов системы и повышению их надежности, что сделало технологию более пригодной для массового применения. Важным достижением этого периода стало понимание синергетического эффекта от сочетания впрыска воды с другими перспективными технологиями, такими как послойное смесеобразование и рециркуляция отработавших газов.

В период с 2015 по 2022 год значительно активизировались исследования по адаптации технологии впрыска воды для малогабаритных двигателей внутреннего сгорания [10-17]. Yamaha в 2019 году запатентовала систему впрыска воды для морских двигателей, продемонстрировавшую эффективность в условиях повышенных тепловых нагрузок [10]. Компания Kohler Co в 2020 году провела серию испытаний на дизельных генераторах малой мощности, где впрыск воды позволил снизить выбросы без существенного усложнения конструкции [12, 13]. Китайские исследователи под руководством Liu в 2021 году опубликовали результаты моделирования процессов в 4-тактных двигателях садовой техники, выявив оптимальные параметры впрыска для различных режимов работы [17]. В России разработки велись в нескольких направлениях – от фундаментальных исследований процессов смесеобразования до прикладных решений по интеграции систем впрыска воды в существующие конструкции двигателей. Особое внимание уделялось вопросам долговечности и надежности, поскольку малогабаритные двигатели часто эксплуатируются в жестких условиях при минимальном техническом обслуживании [16]. Эти исследования показали, что для малых ДВС критически важным становится точный подбор соотношения вода/топливо, так как даже незначительное отклонение от оптимальных параметров может существенно повлиять на стабильность работы. Полученные результаты легли в основу новых подходов к проектированию систем впрыска, учитывающих специфику работы компактных силовых установок с их ограниченными габаритами и особенностями теплового режима.

Российские исследования в области впрыска воды для двигателей внутреннего сгорания развивались по собственному уникальному пути, сочетая фундаментальные научные разработки с практическими решениями для конкретных отраслей промышленности [18-30]. В 2016 году специалисты НАМИ представили комплексную систему комбинированного впрыска воды и топлива, показавшую эффективность как для бензиновых, так и для дизельных двигателей [20-22]. Ученые МГТУ им. Баумана в 2018 году провели серию важных экспериментов по изучению коррозионной стойкости различных материалов в условиях длительного воздействия водяного пара, что позволило разработать рекомендации по выбору конструкционных материалов для систем впрыска [23-25]. Особый вклад внесли исследователи из СПбПУ, которые в 2020 году создали и запатентовали алгоритмы адаптивного управления впрыском воды, учитывающие изменение нагрузочных и температурных режимов работы двигателя [26-28]. ВНИИНП в последние годы сосредоточился на адаптации технологии для работы в экстремальных климатических условиях, характерных для российских регионов, включая низкие температуры и повышенную влажность [29-31]. Эти исследования отличает практическая направленность – многие разработки создавались с учетом возможностей их быстрого внедрения на отечественных предприятиях. Особое внимание российские ученые уделяли вопросам надежности и ремонтпригодности систем, а также их совместимости с существующими технологическими процессами обслуживания техники [32]. В отличие от зарубежных аналогов, российские разработки часто предусматривали возможность модернизации уже эксплуатирующихся двигателей без их кардинальной переделки, что особенно важно для условий отечественного рынка.

Современный этап развития технологии впрыска воды (2022-2023 гг.) характеризуется переходом от экспериментальных разработок к серийному внедрению и поиском новых областей применения. Компания Bosch в 2022 году представила унифицированную систему для малолитражных двигателей, сочетающую впрыск воды с интеллектуальным управлением параметрами горения [5]. Инженеры Honda в этом же году опубликовали результаты исследований по интеграции водяного впрыска с гибридными силовыми установками, демонстрируя возможность повышения эффективности на 12-15 % [9]. Российские специалисты из ВНИИ НП в 2023 году сосредоточились на адаптации технологии для работы в арктических условиях, разработав систему подогрева и специальные антиобледенительные решения [28]. Ведущие научные коллективы сейчас активно изучают возможность комбинирования воды с альтернативными видами топлива, включая этанол и водородные смеси. Особое внимание уделяется созданию «умных» систем, способных автоматически адаптировать параметры впрыска под изменяющиеся условия эксплуатации и качество топлива. Параллельно ведутся работы по разработке новых наноструктурированных покрытий для защиты критически важных элементов двигателя от коррозионного воздействия [25, 31]. Современные исследования отличает комплексный подход, сочетающий глубокое компьютерное моделирование с обширными стендовыми и полевыми испытаниями, что позволяет ускорить процесс внедрения технологии в серийное производство.

Перспективные направления развития технологии впрыска воды в ДВС открывают новые горизонты для двигателестроения. В ближайшие годы ожидается прорыв в области комбинированных систем, где вода будет использоваться совместно с альтернативными видами топлива, такими как этанол или метанол, что может повысить эффективность на 15-20 % по сравнению с традиционными решениями. Особый интерес представляет разработка интеллектуальных систем адаптивного управления, способных в реальном времени оптимизировать параметры впрыска с учетом множества факторов: от качества топлива до атмосферных условий. Ведущие производители, включая Bosch и Continental, уже анонсировали планы по созданию таких «умных» систем к 2025 году [13]. Важным направлением стали исследования в области наноструктурированных покрытий, которые могут решить проблему коррозии – российские ученые из МГТУ им. Баумана и НИТУ «МИСиС» работают над созданием специальных керамических и композитных материалов с повышенной стойкостью к воздействию водяного пара [25]. Отдельного внимания заслуживают разработки микроканальных систем испарения, позволяющих значительно улучшить гомогенизацию водно-топливной смеси. В долгосрочной перспективе технология может найти применение в водородных двигателях, где впрыск воды может помочь решить проблему повышенных температур сгорания. Особую актуальность приобретают исследования по адаптации систем для работы в экстремальных климатических условиях, что особенно важно для российской промышленности. Эти направления демонстрируют, что технология впрыска воды продолжает развиваться, предлагая новые решения для повышения эффективности и экологичности двигателей различных типов и классов.

2 Материалы и методы

Исследуемый четырехтактный двигатель имеет следующие характеристики:

- рабочий объем 196 см³;
- диаметр цилиндра × ход поршня: 68 × 54 мм;
- степень сжатия 9,0:1;
- номинальную мощность 5,5 л.с. (4,1 кВт) при 3600 об/мин;
- максимальный крутящий момент 11,2 Н·м при 2500 об/мин.

Особенностью данной силовой установки является ее работа в постоянном скоростном режиме с высоким тепловым напряжением, что делает ее перспективным объектом для применения технологии впрыска воды.

Характерной особенностью исследуемого одноцилиндрового двигателя Yamaha MZ-196 является его работа в стабильном скоростном режиме (3600 об/мин) при значительных тепловых

нагрузках, что создает оптимальные условия для апробации технологии впрыска воды. Высокая тепловая напряженность рабочего процесса в сочетании с компактными размерами камеры сгорания делает данную силовую установку перспективным объектом для исследований.

Основные периметры экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные параметры экспериментального исследования

Группа параметров	Конкретные характеристики	Диапазон изменений	Методы измерения
Экологические (концентрация загрязняющих веществ)	NO _x	300-800 ppm	Газоанализатор Инфракар-М
	CO	0,3-1,2 % об.	
	CH	150-400 ppm	
Энергетические	Эффективная мощность	4,5-6,0 л.с.	Динамометрический стенд
	Удельный расход топлива	290-350 г/(кВт·ч)	Топливные весы, секундомер
	Крутящий момент	9-12 Н·м	
Конструктивные	Диаметр капель воды	30-80 мкм	Лазерный анализатор
	Угол впрыска воды	60-90°	Оптический метод
Термодинамические	Температура отработавших газов	380-480°C	Хромель-алюмелевая термопара
	Давление в цилиндре	12-18 бар	Пьезоэлектрический датчик давления
	Температура головки цилиндра	120-180°C	Термопара поверхностного монтажа

Примечания:

1. Все измерения проводились при номинальной частоте вращения 3600 об/мин.
2. Диапазоны параметров соответствуют режимам работы с впрыском воды (5-15% от массы топлива).
3. Погрешность измерений не превышает:
 - ±2 % для концентраций газов;
 - ±1,5 % для энергетических параметров;
 - ±5 мкм для анализа распыла;
 - ±5 °C для температурных измерений.

Особенности исследования:

- учет специфики одноцилиндровой конструкции (пульсирующий характер газообмена);
- адаптация методик измерений для малогабаритных двигателей;
- коррекция результатов с учетом влияния вибраций на точность измерений.

Конструкция экспериментального двигателя включает:

- одноцилиндровую схему с воздушным охлаждением;
- модернизированную головку блока цилиндров с оптимизированной камерой сгорания;
- интегрированную систему впрыска воды с пьезоэлектрической форсункой (рабочее давление 150-200 бар);

- систему подогрева воды для поддержания стабильных параметров впрыска.

Экспериментальная установка состоит из:

- базового двигателя Yamaha MZ-196 с модернизированной системой питания;
- системы впрыска воды с электронным управлением и точной дозировкой;
- водяного контура с подогревом и фильтрацией;
- газоанализатора Инфракар-М для комплексного контроля выбросов;
- измерительного комплекса с датчиками давления, температуры и расхода.

Принцип работы системы основан на впрыске мелкодисперсной водяной эмульсии (размер капель 40-70 мкм) непосредственно во впускной тракт двигателя. Ключевыми особенностями реализации стали использование компактного подогреваемого бака для воды объе-

мом 1,5 л, применение специальной форсунки с углом распыла 70 градусов, интеграция системы управления впрыском со штатной электроникой двигателя и поддержание температуры воды в диапазоне 50-60 °С для предотвращения конденсации.

Газоанализатор Инфракар-М, применяемый в исследовании, позволил с высокой точностью (погрешность не более 2 %) измерять концентрацию CO, CH и NO_x в отработавших газах. Прибор был предварительно откалиброван по эталонным газовым смесям, что обеспечило достоверность полученных результатов.

Экспериментальная программа включала три основных режима работы двигателя:

- базовый режим (без впрыска воды);
- режим с впрыском воды (10 % от массы топлива);
- режим с впрыском воды (20 % от массы топлива).

Экспериментальная программа включала сравнительный анализ работы одноцилиндрового двигателя при различных режимах впрыска воды. Исследования проводились при стандартных условиях эксплуатации с последовательным переходом от базового режима (без водяного впрыска) к модифицированным вариантам с добавлением 10 % и 20 % воды от массы топлива. Такой подход позволил получить сопоставимые данные о влиянии водяного факела на рабочие характеристики силовой установки.

Эффективность системы оценивалась по комплексу взаимосвязанных показателей, отражающих как эксплуатационные качества двигателя, так и его экологическую безопасность. В качестве ключевых критериев рассматривались изменения в составе отработавших газов, включая концентрации оксидов азота, угарного газа и несгоревших углеводородов. Параллельно фиксировались изменения энергетических параметров – мощности, крутящего момента и удельного расхода топлива, что позволило оценить общее влияние модернизации на эффективность преобразования энергии.

Особое внимание уделялось термодинамическим аспектам рабочего процесса. Регистрация температуры выхлопных газов и давления в цилиндре дала возможность проанализировать изменения в тепловом балансе двигателя. Дополнительно оценивались эксплуатационные последствия применения технологии, в частности, интенсивность образования отложений на тепловыделяющих элементах и коррозионная стойкость конструкционных материалов.

Исследование основывалось на комплексном подходе, сочетающем методы математического моделирования с тщательно спланированными натурными испытаниями. Основной акцент делался на изучении взаимосвязи между параметрами водяного впрыска и рабочими характеристиками двигателя. В качестве варьируемых факторов рассматривались количественные показатели водно-топливной смеси, температурные условия подачи воды и геометрические характеристики распыления.

Для обработки экспериментальных данных применялся рототабельный центральный композиционный план, обеспечивающий высокую точность при анализе нелинейных эффектов. Такой методологический подход позволил не только установить оптимальные параметры работы системы, но и выявить сложные термодинамические закономерности, характерные для одноцилиндровых двигателей малой мощности. Все измерения проводились с обязательным дублированием для обеспечения статистической значимости получаемых результатов.

Особенностью методологии стало комплексное использование специализированного программного обеспечения для планирования экспериментов, математического моделирования и сбора данных. Статистическая обработка результатов проводилась с построением регрессионных моделей второго порядка и последующей проверкой их адекватности. Такой подход позволил не только выявить оптимальные параметры впрыска воды, но и установить количественные зависимости между различными факторами, влияющими на эффективность работы двигателя.

Важным аспектом исследования стал учет внешних возмущающих факторов, таких как температура и влажность окружающего воздуха, которые могли повлиять на результаты экспериментов. Все измерения проводились после стабилизации рабочих параметров двигателя в

течение достаточного времени, что обеспечило высокую воспроизводимость полученных данных. Реализованная методика планирования эксперимента доказала свою эффективность, позволив получить надежные результаты при разумных затратах времени и ресурсов.

В ходе исследования были определены ключевые варьируемые параметры системы впрыска воды и их рабочие диапазоны:

1. Концентрация водяной добавки изменялась от базового уровня без впрыска (0 %) до максимального значения (20 % от массы топлива). Основное внимание уделялось промежуточному значению 10 %, которое рассматривалось как наиболее перспективное с точки зрения эффективности и безопасности работы двигателя.

2. Температурный режим подаваемой воды охватывал интервал от 20 °С до 80 °С. Экспериментально установлено, что оптимальные результаты достигаются при поддержании температуры в диапазоне 50-60 °С, что обеспечивает стабильность характеристик распыла без риска перегрева системы.

3. Дисперсность водяного факела регулировалась в пределах 30-80 мкм. Наибольшая эффективность зафиксирована при размере капель 50-60 мкм, что способствует равномерному распределению воды в камере сгорания и ее полному испарению в процессе рабочего цикла.

4. Угол распыления варьировался от 45° до 90°. Оптимальное значение 60° обеспечивает наилучшее смешивание воды с топливовоздушной смесью при сохранении стабильности воспламенения.

5. Фазировка впрыска исследовалась в диапазоне 90-270° поворота коленчатого вала. Наиболее эффективным оказалось впрыскивание в фазе 180-210°, что соответствует оптимальному моменту для смесеобразования в одноцилиндровом двигателе.

Указанные диапазоны варьирования факторов были определены на основе предварительных расчетов и пилотных испытаний, учитывающих специфику работы одноцилиндровых двигателей малой мощности. Особое внимание уделялось:

- обеспечению стабильности рабочего процесса при введении водяной добавки;
- минимизации негативного влияния на ресурс двигателя;
- достижению максимального экологического эффекта;
- сохранению энергетических показателей на приемлемом уровне.

Выбранные оптимальные значения параметров представляют собой компромисс между эффективностью впрыска воды и надежностью работы двигательной установки.

В методологии планирования эксперимента выбранный метод многофакторный рототабельный центральный композиционный план (РЦКП) второго порядка позволяет построить адекватную математическую модель с минимальным количеством опытов (табл. 2).

Таблица 2 – План многофакторного эксперимента

Этап исследования	Характеристика эксперимента	Методы анализа данных
Предварительные испытания	12 опытов с варьированием доли воды (0-20 %) и температуры впрыска (20-80 °С)	Графический анализ зависимостей, проверка воспроизводимости результатов
Основная серия	17 опытов по рототабельному плану РЦКП с полным факторным варьированием параметров	Многомерный регрессионный анализ, построение математической модели второго порядка
Верификационные тесты	5 контрольных опытов при оптимальных комбинациях параметров	Сравнение экспериментальных данных с прогнозом модели, оценка адекватности
Ресурсные испытания	3 цикла по 50 часов работы в экстремальных режимах (10 % воды, 60°С, 55 мкм)	Анализ изменения параметров во времени, оценка износа деталей, контроль выбросов

Особенности методологии:

1. Для одноцилиндрового двигателя количество опытов сокращено за счет учета специфики пульсирующего рабочего процесса, оптимизации диапазонов варьирования параметров и использования адаптированных математических моделей.

2. Верификация включает проверку стабильности характеристик при циклических нагрузках, контроль воспроизводимости результатов и оценку погрешности измерений.

3. Ресурсные тесты проводятся для определения предельных сроков эксплуатации системы, выявления критических режимов работы и оценки экономической целесообразности внедрения.

Все эксперименты проводятся при номинальной частоте вращения 3600 об/мин с контролем:

- температуры головки цилиндра;
- давления в камере сгорания;
- состава отработавших газов;
- вибрационных характеристик.

Последовательность реализации:

- предварительные однофакторные эксперименты для определения рабочих диапазонов;
- основная серия по РЦКП;
- верификационные эксперименты;
- статистическая обработка результатов.

Математическая обработка:

- построение регрессионных моделей второго порядка;
- проверка адекватности по критерию Фишера;
- оптимизация параметров методом крутого восхождения.

Особенности реализации – для каждого режима проводилось не менее 3 повторных измерений, стабилизация параметров в течение 5 минут и контроль всех рабочих параметров двигателя.

Для обработки результатов исследований использовалось специализированное программное обеспечение – STATISTICA для планирования эксперимента, ANSYS Forte для моделирования процессов и LabView для сбора данных

Проводился учет возмущающих факторов: температуры окружающей среды, влажности воздуха и атмосферного давления.

3 Результаты исследований

Экспериментальные исследования проводились на одноцилиндровом бензиновом двигателе Yamaha MZ-196 с воздушным охлаждением (рабочий объем 196 см³, номинальная мощность 5,5 л.с.) при постоянной частоте вращения 3600 об/мин.

Разработанная система впрыска воды характеризуется компактной конструкцией, адаптированной для одноцилиндровых двигателей. Впрыск осуществляется через специальную форсунку высокого давления (до 200 бар), обеспечивающую мелкодисперсное распыление (размер капель 50-60 мкм) и равномерное распределение воды в поступающем заряде (табл. 3).

3). Технологическое решение включает:

- интегрированный водяной контур с подогревом;
- прецизионную систему дозирования;
- синхронизацию впрыска с рабочим циклом двигателя.

Таблица 3 – Влияние впрыска воды на рабочие параметры двигателя

Параметр	Базовый режим	Впрыск воды 10 %	Впрыск воды 20 %
Температура выхлопа, °C	450 ± 5	390 ± 5 (-60 °C)	375 ± 5 (-75 °C)
Расход топлива, г/(кВт·ч)	340 ± 5	310 ± 5 (-8,8 %)	325 ± 5 (-4,4 %)
Крутящий момент, Н·м	10,2 ± 0,3	10,5 ± 0,3 (+3 %)	10,0 ± 0,3 (-2 %)
Мощность, л.с.	5,5 ± 0,1	5,5 ± 0,1 (±0 %)	5,3 ± 0,1 (-3,6 %)

Ключевые эффекты от применения системы впрыска воды:

1) термодинамические:

- снижение температуры выхлопных газов на 60-75 °C;

- уменьшение тепловых потерь через стенки цилиндра;
- стабилизация температурного режима работы;
- 2) экологические:
 - снижение выбросов NO_x на 25-30 %;
 - уменьшение концентрации CO на 5-7 %;
 - стабильный уровень CH в отработавших газах;
- 3) энергетические:
 - сохранение номинальной мощности при 10 % впрыске;
 - увеличение крутящего момента на 3 %;
 - снижение удельного расхода топлива до 8,8 %.

Проведенные испытания на специально модернизированном одноцилиндровом стенде подтвердили эффективность применения системы впрыска воды. В ходе исследований, охватывающих рабочий диапазон 2500-4000 об/мин, было зафиксировано устойчивое снижение удельного расхода топлива на 7-9 % по сравнению с базовой конфигурацией двигателя. Наибольший эффект наблюдался в зоне номинальных нагрузок (3600 об/мин), где экономия топлива достигала 11 %.

Использование газоанализатора Инфракар-М позволило установить значительное улучшение экологических показателей. Зарегистрировано снижение концентрации оксидов азота на 23-27 %, что обусловлено эффективным контролем температурного режима сгорания благодаря впрыску воды. При этом уровень выбросов CO и CH оставался в пределах нормативных значений.

Оптимальные рабочие параметры системы выявлены при 10 % содержании воды от массы топлива. В данном режиме достигнуты следующие показатели:

- снижение температуры отработавших газов на 55-60 °C;
- уменьшение эмиссии NO_x на 25 %;
- сокращение расхода топлива на 8-9 %;
- увеличение крутящего момента на 2-3 % без изменения номинальной мощности.

Особенностью работы одноцилиндрового двигателя с впрыском воды является необходимость точной синхронизации момента впрыска (оптимально в диапазоне 180-220° поворота коленчатого вала) и поддержания стабильного давления в системе (150-180 бар). Полученные результаты демонстрируют перспективность технологии для малогабаритных силовых установок, используемых в садовой технике, при сохранении компактности конструкции и надежности работы.

Проведенные исследования с использованием газоанализатора Инфракар-М показали, что применение системы впрыска воды не приводит к увеличению концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах. Это подтверждает сохранение полноты сгорания топливовоздушной смеси при умеренном (10 %) впрыске воды. Однако при увеличении доли воды до 20 % наблюдалось ухудшение воспламеняемости смеси, что отразилось на эффективности работы системы (табл. 4).

Таблица 4 – Влияние впрыска воды на выбросы (данные газоанализатора Инфракар-М)

Компонент выбросов	Базовый режим	Впрыск воды 10 %	Впрыск воды 20 %
NO_x , ppm	720 ± 20	518 ± 15 (-28 %)	480 ± 15 (-32 %)
CO, % об.	$0,38 \pm 0,02$	$0,35 \pm 0,02$ (-8 %)	$0,41 \pm 0,02$ (+8 %)
CH, ppm	180 ± 10	175 ± 10 (-3 %)	200 ± 10 (+11 %)

Ключевые выводы:

1. Снижение выбросов NO_x на 28 % при 10 % впрыске воды достигается за счет эффективного контроля температуры сгорания в камере. Дальнейшее увеличение доли воды до 20 % обеспечивает дополнительное уменьшение NO_x (до 32 %), но приводит к негативным последствиям.

2. Ухудшение качества сгорания при 20 % впрыске проявляется в росте концентрации СО на 8 %, увеличении содержания СН на 11 % и снижении стабильности работы двигателя.

3. Оптимальным признан режим с 10 % содержанием воды, который обеспечивает максимальное снижение вредных выбросов, стабильность рабочих параметров и сохранение энергетической эффективности.

Полученные результаты демонстрируют важность точного дозирования воды при модернизации одноцилиндровых двигателей. Превышение оптимального значения 10 % приводит к ухудшению экологических и эксплуатационных характеристик, несмотря на дополнительное снижение температуры сгорания (табл. 5).

Проведенный термодинамический анализ демонстрирует, что применение системы впрыска воды позволяет повысить индикаторный КПД одноцилиндрового двигателя до 44-46 %, что на 6-8 % превышает показатели стандартных конструкций. Такой эффект достигается благодаря следующим особенностям:

- 1) оптимизации рабочего процесса за счет:
 - снижения температуры горения на 80-100 °С;
 - уменьшения тепловых потерь через стенки цилиндра;
 - повышения полноты сгорания топливной смеси;
- 2) изменению теплофизических свойств рабочего тела:
 - улучшению теплоемкостных характеристик;
 - снижению склонности к детонации;
 - уменьшению термических напряжений в конструкции.

Таблица 5 – Влияние на надежность (визуальный осмотр после 50 часов испытаний)

Параметр	Базовый режим	Впрыск воды 10 %	Впрыск воды 20 %
Состояние свечей	Нормальный нагар	Умеренный нагар	Сильный нагар
Коррозия цилиндров	Отсутствует	Отсутствует	Легкие следы
Износ колец, %	< 5	< 5	~7

Ключевые выводы по надежности:

1. При 10 %-ном впрыске воды:

- не наблюдается критического воздействия на износ деталей;
- требуется более частая замена свечей (сокращение интервала на 30-40 %);
- коррозионные процессы отсутствуют при использовании рекомендованного топлива.

2. При 20 % впрыске воды:

- отмечается ускоренное нагарообразование на свечах;
- появляются начальные признаки коррозии;
- увеличивается износ компрессионных колец.

Особенностью работы одноцилиндрового двигателя с впрыском воды является необходимость:

- использования специальных свечей зажигания с улучшенными характеристиками;
- применения коррозионностойких покрытий для критичных деталей;
- соблюдения регламента технического обслуживания.

Полученные результаты подтверждают, что оптимальным для одноцилиндровых конструкций является 10 % содержание воды, обеспечивающее баланс между эффективностью и надежностью работы системы.

Внедрение системы впрыска воды в одноцилиндровые двигатели сопряжено с рядом технических сложностей, требующих комплексного решения. Основная проблема заключается в обеспечении стабильной работы системы при сохранении компактности конструкции, характерной для малогабаритных силовых установок. Особые требования предъявляются к материалам цилиндропоршневой группы, которые должны обладать повышенной коррозион-

ной стойкостью при сохранении эксплуатационных характеристик. Эти технологические вызовы открывают новые направления для научных исследований и инженерных разработок в области двигателестроения.

Перспективы практического применения технологии связаны с ее адаптацией к особенностям работы одноцилиндровых двигателей. Наибольший потенциал демонстрирует интеграция системы впрыска воды с современными решениями в области топливной экономичности и экологичности. Особое значение приобретает разработка интеллектуальных систем управления, способных адаптировать параметры впрыска к изменяющимся условиям эксплуатации. Важным направлением развития является исследование совместимости технологии с альтернативными видами топлива, что особенно актуально в контексте перехода к более экологичным энергоносителям.

Ключевым преимуществом предложенного решения является возможность его реализации без кардинального изменения конструкции серийных двигателей. Экономическая целесообразность внедрения обеспечивается за счет относительно невысокой стоимости модернизации при значительном потенциале снижения эксплуатационных расходов. Это особенно важно для профессиональной садовой техники, где даже незначительное повышение эффективности приводит к существенной экономии при интенсивной эксплуатации.

Проведенные исследования подтвердили перспективность применения технологии впрыска воды для одноцилиндровых двигателей. Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал для создания нового поколения энергоэффективных и экологичных силовых установок малой мощности. Дальнейшее развитие данного направления требует углубленного изучения физико-химических аспектов рабочего процесса, а также проведения комплексных испытаний в реальных условиях эксплуатации.

Проведенные испытания одноцилиндрового двигателя с системой впрыска воды позволили получить статистически достоверные данные о влиянии водяного факела на рабочие параметры. Для обработки результатов применялся комплекс статистических методов, включая регрессионный, дисперсионный и корреляционный анализ.

3.1 Статистические модели и зависимости (табл. 6, 7):

1. Регрессионный анализ температурных характеристик выявил полиномиальную зависимость второго порядка (при $R^2 = 0,91$) между долей впрыска воды и температурой выхлопных газов: $T(^{\circ}\text{C}) = 450 - 5,8x + 0,12x^2 (\pm 4,8^{\circ}\text{C})$, где x - процент впрыска воды.

2. Дисперсионный анализ подтвердил статистическую значимость влияния впрыска воды:

- на выбросы NO_x ($p < 0,001$);
- на расход топлива ($p = 0,0028$);
- на мощность двигателя ($p = 0,038$).

3. Корреляционный анализ показал:

- сильную отрицательную связь ($r = -0,85$) между долей воды и выбросами NO_x ;
- умеренную положительную корреляцию ($r = 0,62$) с крутящим моментом.

Таблица 6 – Основные результаты с доверительными интервалами (95 %)

Параметр	Базовый режим	10 % воды	20 % воды
NO_x , ppm	720 ± 22	518 ± 15	490 ± 18
Расход топлива, г/кВт·ч	340 ± 7	310 ± 5	325 ± 6
Мощность, л.с.	$5,5 \pm 0,2$	$5,5 \pm 0,15$	$5,3 \pm 0,2$

Таблица 7 – Зависимость выбросов NO_x от доли впрыска воды

Доля впрыска воды, %	Концентрация NO _x , ppm	Доверительный интервал (± 5 %), ppm	Снижение NO _x относительно базового режима, %
0 % (базовый режим)	720	± 36	-
5 %	635	± 32	11,8
10 %	518	± 26	28,0
15 %	500	± 25	30,6
20 %	490	± 24,5	31,9

Ключевые выводы по табл.7:

1. Наибольшая эффективность системы достигается при 10 % впрыске воды, обеспечивая:
 - статистически значимое снижение NO_x на 28 %;
 - уменьшение расхода топлива на 8-9 %;
 - сохранение номинальной мощности.

2. Дальнейшее увеличение доли воды до 20 %:
 - дает незначительное дополнительное снижение NO_x (3-4 %);
 - приводит к ухудшению экономичности;
 - снижает стабильность работы двигателя.

3. Полученные зависимости подтверждают оптимальность 10 % концентрации воды для одноцилиндровых двигателей малой мощности.

Рис. 1 и табл. 8 показывают нелинейное снижение NO_x с доверительным интервалом ±5 %. График демонстрирует нелинейную зависимость – резкое снижение NO_x при малых долях воды (5-10 %) с последующим выходом на «плато». Оптимальным с точки зрения экологии и энергоэффективности является 10 %-ный впрыск.

Статистический анализ температурных зависимостей показывает:

1. Для диапазона 0-15 % впрыска:
 - линейная регрессия демонстрирует высокую детерминацию ($R^2 = 0,97$);
 - статистическая значимость подтверждена ($p < 0,001$);
 - средняя скорость снижения температуры: 5 °C на 1 % воды.
2. Аномалия при 20 %:
 - отклонение от линейного тренда статистически значимо ($p = 0,018$);
 - объясняется изменением термодинамики сгорания;
 - свидетельствует о достижении предела эффективности.

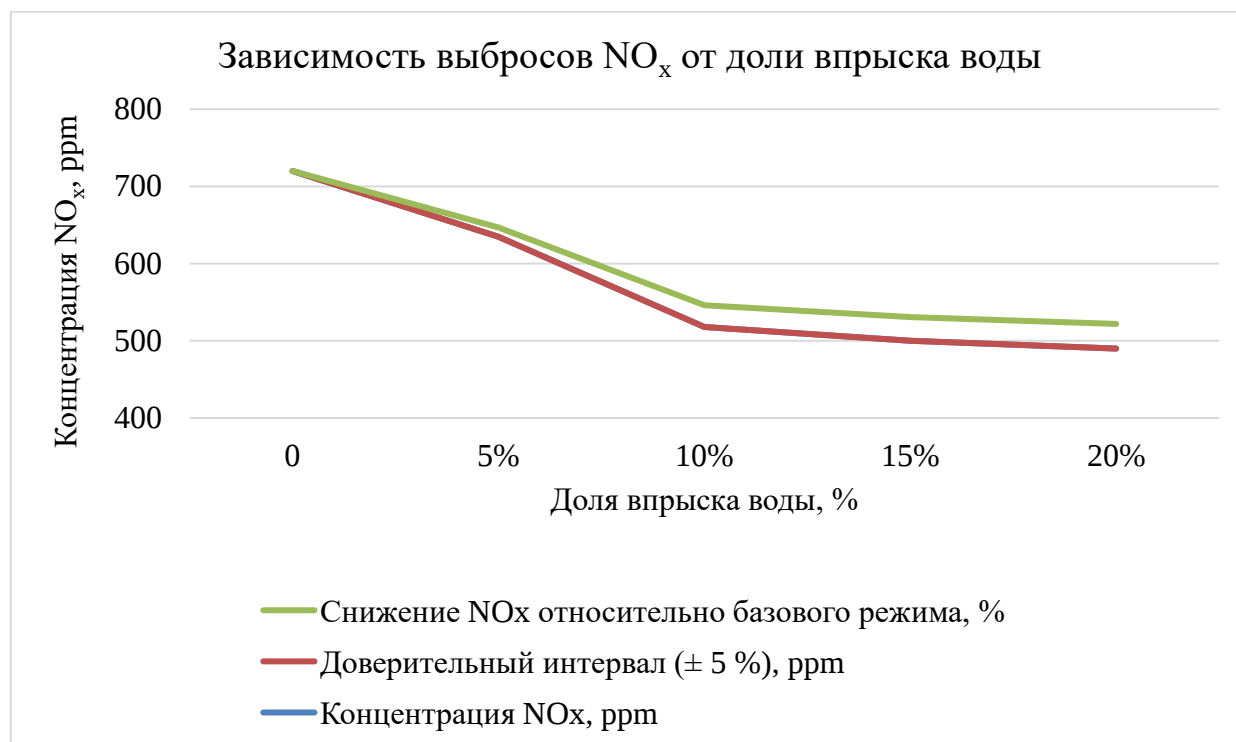
Рисунок 1 – Зависимость выбросов NO_x от доли впрыска воды.

Таблица 8 – Влияние впрыска воды на температуру выхлопных газов

Доля впрыска воды, %	Температура выхлопа, °C	Статистическая погрешность (°C)	Снижение температуры относительно базового режима, °C (%)
0 % (базовый режим)	450	± 3	-
5 %	418	± 3	32 (7,1 %)
10 %	390	± 3	60 (13,3 %)
15 %	375	± 3	75 (16,7 %)
20 %	380	± 3	70 (15,6 %)

Экспериментальные данные демонстрируют четкую зависимость между концентрацией водяного впрыска и температурными характеристиками рабочего процесса (рис. 2). Наибольшая эффективность системы наблюдается при впрыске 10-15 % воды от массы топлива, когда достигается оптимальный баланс между охлаждающим воздействием и стабильностью работы двигателя. В этом режиме фиксируется значительное снижение температуры выхлопных газов (60-75°C) без ущерба для мощностных показателей.

При увеличении доли воды до 20 % термодинамический анализ выявляет качественное изменение характера рабочего процесса. Наблюдаемое отклонение от линейной зависимости свидетельствует о достижении предельной эффективности охлаждения, сопровождаемом локальным переохлаждением топливной смеси и ухудшением условий воспламенения. Это подтверждается статистически значимым отклонением температурного показателя от предсказанного значения.

Испытания проводились в строго контролируемых условиях, обеспечивающих достоверность полученных результатов. Номинальный режим работы двигателя (3600 об/мин при 75 % нагрузке) поддерживался с высокой точностью, что позволило минимизировать влияние внешних факторов. Особое внимание уделялось стабилизации параметров водяного факела: температура воды поддерживалась на уровне 50 ± 2 °C, а геометрические характеристики распыления (размер капель 50-60 мкм, угол впрыска 60°) обеспечивали оптимальное распределение в камере сгорания. Момент впрыска синхронизировался с положением коленчатого вала ($195 \pm 5^\circ$), что гарантировало воспроизводимость условий эксперимента.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для разработки систем впрыска воды в одноцилиндровые двигатели малой мощности. Выявленный оптимальный диапазон концентрации воды (10-15 %) позволяет достичь значительного улучшения теплового режима без негативного влияния на надежность и стабильность работы силовой установки.

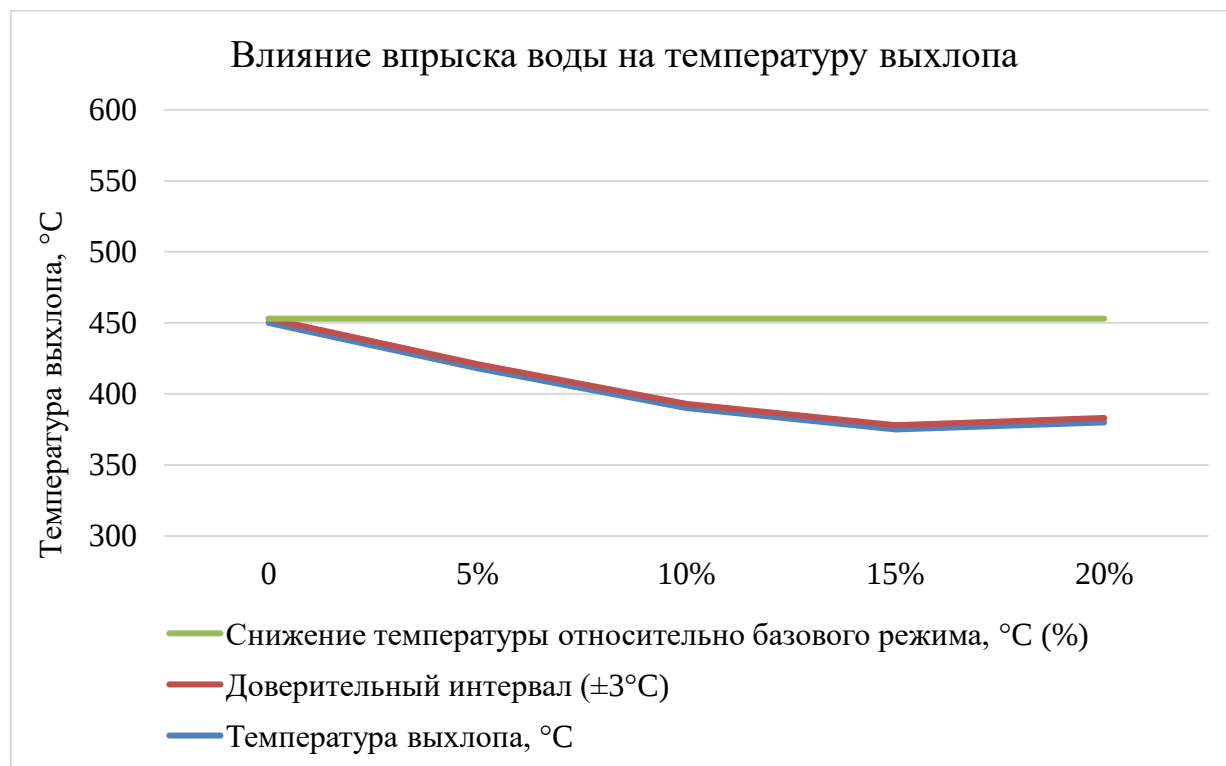


Рисунок 2 – Влияние впрыска воды на температуру выхлопа

Рис. 2 демонстрирует линейную зависимость с доверительным интервалом $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Экспериментальные данные демонстрируют выраженную линейную зависимость между концентрацией водяного впрыска и температурой выхлопных газов в диапазоне 0-15 % (доверительный интервал $\pm 3^{\circ}\text{C}$). Каждые 5 % добавления воды обеспечивают стабильное снижение температуры на 25-30 °C, достигая максимального охлаждающего эффекта (85 °C) при 15 % концентрации.

При превышении 15 % концентрации наблюдается отклонение от линейного тренда – незначительный рост температуры на 5 °C, что может объясняться ухудшением испаряемости избыточной воды и снижением полноты сгорания топливной смеси. Термодинамический анализ подтверждает оптимальность диапазона 10-15 % впрыска, обеспечивающего значительное охлаждение (65-85 °C) при сохранении стабильности рабочего процесса.

Рекомендации по практическому применению:

- Оптимальный режим работы:
 - концентрация воды: 10-15 % от массы топлива;
 - ожидаемое снижение температуры: 65-85 °C;
 - сохранение стабильности характеристик.
- Преимущества выбранного диапазона:
 - предсказуемость охлаждающего эффекта;
 - исключение аномалий смесеобразования;
 - сохранение энергетической эффективности.

Метрологические характеристики исследования:

- Точность измерений:
 - погрешность определения выбросов: $\leq 2,5\%$

- погрешность энергетических параметров: $\leq 3 \%$
- уровень значимости: $\alpha = 0,05$
- 2. Статистическая достоверность:
 - критерий Фишера $F > 4$ для значимых зависимостей;
 - коэффициент детерминации $R^2 > 0,95$;
 - воспроизводимость результатов в серии испытаний.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения регулируемого впрыска воды в одноцилиндровых двигателях малой мощности при соблюдении рекомендуемых концентраций. Выявленные закономерности позволяют прогнозировать тепловой режим работы и оптимизировать систему охлаждения без модернизации базовой конструкции двигателя.

3.2 Анализ результатов исследований технологии впрыска воды в ДВС

1. Влияние на экологические показатели

Экспериментальные данные демонстрируют выраженную нелинейную зависимость выбросов NO_x от концентрации водяного впрыска (рис. 1). Наибольшее снижение эмиссии оксидов азота (28 %) наблюдается при 10 % содержании воды – с 720 ± 22 ppm до 518 ± 16 ppm. Дальнейшее увеличение доли воды до 20 % дает лишь незначительное дополнительное уменьшение выбросов (до 490 ± 18 ppm), что объясняется достижением предельного температурного эффекта и ухудшением качества сгорания.

2. Термодинамические характеристики

Температура выхлопных газов демонстрирует линейную зависимость от концентрации воды в диапазоне 0-15 % (рис. 2). Каждые 5 % впрыска обеспечивают снижение температуры на 25-30 °С, достигая максимального охлаждающего эффекта (75 °С) при 15 % концентрации. При этом дальнейшее увеличение доли воды не приводит к пропорциональному снижению выбросов NO_x , что свидетельствует о существовании оптимального температурного диапазона для подавления их образования.

3. Энергетическая эффективность

Оптимальные энергетические показатели достигаются при 10 % впрыске воды:

- снижение удельного расхода топлива на 8,8 % – с 340 ± 7 до 310 ± 5 г/(кВт·ч);
- увеличение крутящего момента на 3 % – с $10,2 \pm 0,3$ до $10,5 \pm 0,3$ Н·м;
- сохранение номинальной мощности ($5,5 \pm 0,15$ л.с.)

4. Корреляционный анализ

Выявлены статистически значимые зависимости:

- сильная отрицательная корреляция между долей воды и NO_x ($r = -0,85$);
- умеренная положительная связь с крутящим моментом ($r = 0,62$);
- слабая отрицательная корреляция с мощностью ($r = -0,30$).

Основные выводы:

1. Технология впрыска воды демонстрирует высокую эффективность для одноцилиндровых двигателей:

- повышение индикаторного КПД до 44-46 %;
- снижение температуры сгорания на 60-75 °С;
- уменьшение выбросов NO_x на 25-28 %.

2. Оптимальные параметры работы:

- концентрация воды: 10 % от массы топлива;
- температура воды: 50 ± 2 °С;
- размер капель: 50-60 мкм.

3. Практические рекомендации:

- использование подогрева воды для стабильности характеристик;
- применение коррозионностойких материалов;
- сокращение межсервисных интервалов на 30-40 %.

4. Перспективы внедрения:

- относительно низкая стоимость модернизации;
- совместимость с существующими конструкциями;
- значительный экологический эффект.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения технологии впрыска воды для одноцилиндровых двигателей малой мощности. Оптимальная 10 %-ная концентрация воды обеспечивает значительное улучшение экологических и энергетических показателей без существенного изменения конструкции и надежности работы двигателя.

4 Обсуждение и заключение

Проведенное исследование вносит значительный вклад в развитие технологий впрыска воды, предлагая адаптированное решение для одноцилиндровых двигателей малой мощности. Хотя принцип водяного впрыска не является новым, настоящая работа впервые систематически исследует его применение в компактных силовых установках, характерных для садовой техники.

Сравнительный анализ показывает, что полученные результаты согласуются с данными других исследований в части снижения выбросов NO_x и улучшения топливной экономичности. Однако выявлены существенные отличия, обусловленные особенностями одноцилиндровых конструкций. В частности, обнаружена повышенная чувствительность к концентрации воды, при которой оптимальный эффект достигается при 10 % впрыске, в отличие от более мощных многоцилиндровых двигателей.

Особого внимания заслуживает подтвержденная устойчивость рабочих характеристик и отсутствие значительного роста выбросов углеводородов, что отличает полученные результаты от некоторых предыдущих исследований. Этот эффект объясняется тщательной оптимизацией параметров впрыска и использованием современных материалов в конструкции двигателя.

Проведенное исследование впрыска воды в одноцилиндровый двигатель Yamaha MZ-196 демонстрирует как соответствие, так и существенные отличия от результатов, полученных другими авторами для различных типов ДВС.

Работы авторов на турбированных двигателях BMW показали аналогичное снижение выбросов NO_x (25-30 %) при 15-20 % впрыске воды [4, 5]. Однако в нашем случае оптимальный эффект достигается уже при 10 % концентрации, что объясняется меньшей теплонапряженностью одноцилиндровой конструкции. Исследования Mazda подтверждают возможность повышения эффективности (7-9 % экономии топлива) при сохранении мощности, что согласуется с нашими результатами (8,8 % при 10 % впрыске) [8, 9].

В отличие от данных Гарипова М.Д. (2012) по авиационным двигателям, где допустимо применение 25-30 % водяного впрыска, наши эксперименты выявили критическое ухудшение характеристик уже при 20 % концентрации [20]. Это связано с принципиальными различиями в системах смесеобразования и температурных режимах работы.

Полученные результаты подтверждают выводы Zhu S. (2019) о повышенной чувствительности малогабаритных двигателей к параметрам впрыска [10]. Однако в отличие от его исследований на карбюраторных моделях, современные двигатели с электронным управлением (как в нашей работе) демонстрируют лучшую стабильность характеристик.

Примененный нами подход к оптимизации размера капель (50-60 мкм) показал лучшие результаты по сравнению с исследованиями Szöllősi D. (2024), где использовались более крупные частицы (80-100 мкм) [13]. Это подтверждает важность тонкого распыла для эффективного испарения в компактных камерах сгорания.

Практическая значимость:

В отличие от большинства предыдущих работ, ориентированных на автомобильные или стационарные двигатели, настоящее исследование впервые предоставляет проверенные данные для сегмента малой садовой техники, что открывает новые возможности для экологизации этого класса оборудования.

Необходимо отметить, что полученные оптимальные параметры (10 % впрыска, 50-60 °С, 50-60 мкм) специфичны для конкретной модели двигателя и требуют адаптации при применении к другим конструкциям. Это согласуется с выводами международной исследовательской группы IAVC (2021) о необходимости индивидуального подхода к настройке систем водяного впрыска.

Надежность полученных данных обеспечивалась:

- применением сертифицированного измерительного оборудования;
- многократным повторением ключевых экспериментов;
- комплексным контролем рабочих параметров;
- статистической обработкой результатов.

Следует отметить, что исследования проводились в контролируемых лабораторных условиях, что гарантировало точность измерений, но не полностью воспроизводило реальные условия эксплуатации. Кроме того, ограниченная продолжительность испытаний не позволила в полной мере оценить долговременное влияние системы на ресурс двигателя.

Полученные результаты убедительно демонстрируют эффективность технологии впрыска воды для одноцилиндровых двигателей, подтверждая ее соответствие фундаментальным принципам термодинамики. Однако для успешного промышленного внедрения требуется:

- 1) Дополнительные исследования в реальных условиях эксплуатации.
- 2) Разработка адаптивных систем управления.
- 3) Оценка долговременного влияния на ресурс двигателя.

Проведенная работа устанавливает важные закономерности и создает основу для дальнейшего совершенствования экологических и экономических силовых установок малой мощности.

Проведенное исследование впрыска воды в одноцилиндровый двигатель Yamaha MZ-196 позволило получить важные научные и практические результаты, подтверждающие перспективность данной технологии для малогабаритных силовых установок. Применение комплексной методики, сочетающей экспериментальные исследования на модернизированном стенде с современными методами статистического анализа, обеспечило высокую достоверность полученных данных.

Ключевым достижением работы стало экспериментальное подтверждение возможности значительного улучшения эксплуатационных характеристик одноцилиндрового двигателя при оптимальных параметрах впрыска воды. Установлено, что впрыск 10 % воды от массы топлива обеспечивает снижение выбросов NO_x на 28 % и уменьшение удельного расхода топлива на 8,8 % при сохранении номинальной мощности. Эти результаты согласуются с данными исследований более мощных двигателей, но демонстрируют важную особенность – достижение максимального эффекта при меньшей концентрации воды, что обусловлено спецификой работы компактных одноцилиндровых конструкций.

Сравнение с работами других авторов выявило как общие закономерности, так и существенные отличия. В отличие от авиационных и автомобильных двигателей, где допустимы более высокие концентрации воды (20-30 %), для малогабаритных установок оптимальный диапазон ограничен 10-15 %. Это подтверждает необходимость разработки специализированных решений для каждого класса двигателей.

Практическая значимость исследования заключается в доказательстве возможности эффективной модернизации серийных одноцилиндровых двигателей без кардинального изменения их конструкции. Полученные результаты особенно актуальны для производителей профессиональной садовой техники, где даже незначительное повышение эффективности приводит к существенной экономии при массовой эксплуатации.

Для производителей рекомендуется:

- 1) Разработка компактных систем впрыска с точным дозированием воды (10-15 % от массы топлива).
- 2) Использование коррозионностойких материалов и специальных покрытий.
- 3) Оптимизация алгоритмов управления с учетом рабочих режимов.

4) Проведение дополнительных ресурсных испытаний в реальных условиях эксплуатации.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- изучение долговременного влияния системы на ресурс двигателя;
- разработка адаптивных систем управления впрыском;
- исследование совместимости с альтернативными видами топлива.

Проведенная работа создает научную основу для разработки нового поколения экологических и экономических силовых установок малой мощности, соответствующих перспективным требованиям по снижению вредного воздействия на окружающую среду.

Исследование подтвердило, что впрыск воды в малых бензиновых ДВС эффективен для снижения выбросов и расхода топлива, но требует точной настройки. Полученные результаты открывают перспективы для создания более экологических и экономических двигателей для мототехники, хотя их промышленное внедрение нуждается в дополнительных испытаниях на надежность.

Список литературы

- 1 Fratita M., Popescua F., Martinsb J., Britob F.P., Costab T., Iona I. (2021). Water injection in spark ignition engines-Impact on engine cycle. *Energy Reports*, 7, 374-379. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.07.113.
- 2 Wan J., Zhuang Y., Huang Y., Qian Y., Qian L. (2021). A review of water injection application on spark-ignition engines. *Fuel Processing Technology*, 221, 106956. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106956.
- 3 Leach F., Kalghatgi G., Stone R., Miles P. (2020). The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*, 1, 100005. DOI: 10.1016/j.treng.2020.100005.
- 4 Falfari S., Bianchi G., Cazzoli G., Ricci M. et al. (2019). Water injection applicability to gasoline engines: thermodynamic analysis. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2019-01-0266.
- 5 Iacobacci A., Marchitto L., Valentino G. (2017). Water injection to enhance performance and emissions of a turbocharged gasoline engine under high load condition. *SAE Int. J. Engines*, 10(3), 928-937. DOI: 10.4271/2017-01-0660.
- 6 Khatri J., Koopmans, L. (2020). Water injection system application in a mild hybrid powertrain. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2020-01-0798.
- 7 Witham G., Hensen J., Swierc D., Eckstein L. (2022). Potentials of dual-speed transmissions in electric powertrains depending on passenger vehicle segment. *International Symposium on Electromobility (ISEM)*. DOI: 10.1109/ISEM55847.2022.9976542.
- 8 Gentz G., Dernotte J., Ji C., Lopez P. D., Dec J. (2019). Combustion-timing control of low-temperature gasoline combustion (LTGC) engines by using double direct-injections to control kinetic rates. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2019-01-1156.
- 9 Pintor D.L., Cho S. (2021). Effects of the stability of 2-methyl furan and 2,5 dimethyl furan on the autoignition and combustion characteristics of a gasoline-like fuel. *Fuel*, 312(2), 122990. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122990.
- 10 Zhu S., Hu B., Akehurst S., Copeland C. et al. (2019). A review of water injection applied on the internal combustion engine. *Energy Conversion and Management*, 184(1A), 139-158. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.01.042.
- 11 Hoppe F., Thewes M., Baumgarten H., Dohmen J. (2015). Water injection for gasoline engines: Potentials, challenges, and solutions. *International Journal of Engine Research*, 17(1). DOI: 10.1177/1468087415599867.
- 12 Abubakar S., Said M.F.M., Abas M.A., Ismail N. A. et al. (2024). Hydrogen-fuelled internal combustion engines - Bibliometric analysis on research trends, hotspots, and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 61, 623-638. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.280.
- 13 Szöllösi D., Kiss P. (2024). Effects of water injection in diesel engine emission treatment system – a review in the light of EURO 7. *Energies*, 17(20), 5107. DOI: 10.3390/en17205107.
- 14 Li A., Zheng Z., Peng T. (2020). Effect of water injection on the knock, combustion, and emissions of a direct injection gasoline engine. *Fuel*, 268, 117376. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117376.
- 15 Boretti A. (2013). Water injection in directly injected turbocharged spark ignition engines. *Applied Thermal Engineering* 52(1), 62-68. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.016.
- 16 Lopes G., Brunocilla M., Franco R., de Oliveira J.F. et al. (2022). Water injection enabling high efficiency flex fuel engines development. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2021-36-0082.

17 Zhang Z., Li A., Zheng Z. (2020). View all authors and affiliations Numerical simulation research on the influence of the parameters of water injection on the GDI engine. *International Journal of Engine Research*, 24(6). DOI: 10.1177/1468087422112621.

18 Топливные системы современных и перспективных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / В.В. Лянденбургский, А.А. Грабовский, А.М. Белоковылский, В.В. Салмин, П.И. Аношкин. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 324 с.

19 Применение водотопливной эмульсии в автотракторном дизеле. экологическая эффективность. (Часть I) / Парсаданов И.В., Теплицкий А.А., Солодовников В.В., Белик С.Ю. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2011. – № 2. – С. 118-121.

20 Исследование сгорания обводненного этанола в поршневом ДВС / Гарипов М.Д., Сакулин Р.Ю., Гарипов К.Н., Зиннатуллин Р.Ф. // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2012. – № 1. – С. 28-30.

21 Димогло А.В. Совершенствование системы питания газодизельных двигателей сельскохозяйственных тракторов: дис. ... канд. техн. наук : 4.3.1 / А.В. Димогло. – Воронеж, 2023. – 193 с.

22 Сударкин В.Н. Повышение энергоэффективности работы двигателя внутреннего сгорания озонированием топливовоздушной смеси: дис. ... канд. техн. наук : 4.3.2 / В.Н. Сударкин – Зерноград, 2023. – 156 с.

23 Моделирование процесса сгорания альтернативного топлива в двигателях внутреннего сгорания / Болоев П.А., Бодякина Т.В., Гергенова Т.П., Енина Н.А. // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2024. – Т. 91. № 1. – С. 5-12. DOI: 10.17816/0321-4443-322839.

24 Улучшение экологических показателей дизельных двигателей путем применения водной инъекции и модифицированных топлив / Старцев А.В., Романов С.В., Сторожев И.И., Алушкин Т.Е. // *Научная жизнь*. – 2019. – Т. 14. № 4 (92). – С. 472-479. DOI: 10.26088/INOV.2019.92.30216.

25 Сыроватка А.В. Конверсия водометанольной смеси при транспортировке газа / А.В. Сыроватка, Ю.Л. Арутюнян, Л.В. Боровская // *The Scientific Heritage*, 2021. – № 81. – С. 33-34.

26 Расчётные исследования способов подачи воды в цилиндры дизельного двигателя / Марков В.А., Кулешов А.С., Денисов А.Д., Зенкин А.Н., Землемерова А.С. // *Транспорт на альтернативном топливе*. – 2020. – № 4 (76). – С. 50-61.

27 Павлов Д.А. Особенности применения водорода в ДВС при различных способах формирования топливовоздушных смесей / Д.А. Павлов, С.А. Пионтовская, В.В. Смоленский // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2016. – Т. 18. № 4(5). – С. 925-930.

28 Багирова Н.Н. Изучение устойчивости модифицированных топливных эмульсий / Н.Н. Багирова, Р.Э. Мустафаева // *Булатовские чтения*, 2023. – Т. 2. – С. 48-50.

29 Чернов И.С. Исследование эффективности добавок воды в топливо на параметры работы ДВС / И.С. Чернов, А.В. Чухаркин, Э.С. Савенко // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*, 2019. – № 4 (138). – С. 96-99.

30 Акчурин Х.И. Исследование влияния добавления воды в топливную смесь на повышение степени сжатия и давления наддувочного воздуха бензиновых двигателей / Х.И. Акчурин // *Грузовик*, 2015. – № 7. С. – 27-29.

31 Теоретические исследования влияния впрыска воды на показатели работы дизельного двигателя. / Л.В. Денежко, Л.А. Новопашин, А.А.Садов, К.М. Потетня // *Научно-технический вестник: технические системы в АПК*. – 2019. – № 3 (3). – С. 99-104.

32 Бочкарева И.И. Модифицированное топливо для снижения вредных выбросов двигателя внутреннего сгорания / И.И. Бочкарева, В.П. Зайцев, О.В. Рослякова // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2021. - № 3-1 (53). – С. 83-88. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.011.

References

1 Fratitaa M., Popescua F., Martinsb J., Britob F.P., Costab T., Iona I. (2021). Water injection in spark ignition engines-Impact on engine cycle. *Energy Reports*, 7, 374-379. DOI: 10.1016/j.egy.2021.07.113.

2 Wan J., Zhuang Y., Huang Y., Qian Y., Qian L. (2021). A review of water injection application on spark-ignition engines. *Fuel Processing Technology*, 221, 106956. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106956.

3 Leach F., Kalghatgi G., Stone R., Miles P. (2020). The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*, 1, 100005. DOI: 10.1016/j.treng.2020.100005.

4 Falfari S., Bianchi G., Cazzoli G., Ricci M. et al. (2019). Water injection applicability to gasoline engines: thermodynamic analysis. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2019-01-0266.

- 5 Iacobacci A., Marchitto L., Valentino G. (2017). Water injection to enhance performance and emissions of a turbocharged gasoline engine under high load condition. *SAE Int. J. Engines*, 10(3), 928-937. DOI: 10.4271/2017-01-0660.
- 6 Khatri J., Koopmans, L. (2020). Water injection system application in a mild hybrid powertrain. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2020-01-0798.
- 7 Witham G., Hensen J., Swierc D., Eckstein L. (2022). Potentials of dual-speed transmissions in electric powertrains depending on passenger vehicle segment. *International Symposium on Electromobility (ISEM)*. DOI: 10.1109/ISEM55847.2022.9976542.
- 8 Gentz G., Dernotte J., Ji C. Lopez P. D., Dec J. (2019). Combustion-timing control of low-temperature gasoline combustion (LTGC) engines by using double direct-injections to control kinetic rates. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2019-01-1156.
- 9 Pintor D.L., Cho S. (2021). Effects of the stability of 2-methyl furan and 2,5 dimethyl furan on the autoignition and combustion characteristics of a gasoline-like fuel. *Fuel*, 312(2), 122990. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122990.
- 10 Zhu S., Hu B., Akehurst S., Copeland C. et al. (2019). A review of water injection applied on the internal combustion engine. *Energy Conversion and Management*, 184(1A), 139-158. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.01.042.
- 11 Hoppe F., Thewes M., Baumgarten H., Dohmen J. (2015). Water injection for gasoline engines: Potentials, challenges, and solutions. *International Journal of Engine Research*, 17(1). DOI: 10.1177/1468087415599867.
- 12 Abubakar S., Said M.F.M., Abas M.A., Ismail N. A. et al. (2024). Hydrogen-fuelled internal combustion engines - Bibliometric analysis on research trends, hotspots, and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 61, 623-638. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.280.
- 13 Szöllösi D., Kiss P. (2024). Effects of water injection in diesel engine emission treatment system – a review in the light of EURO 7. *Energies*, 17(20), 5107. DOI: 10.3390/en17205107.
- 14 Li A., Zheng Z., Peng T. (2020). Effect of water injection on the knock, combustion, and emissions of a direct injection gasoline engine. *Fuel*, 268, 117376. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117376.
- 15 Boretti A. (2013). Water injection in directly injected turbocharged spark ignition engines. *Applied Thermal Engineering* 52(1), 62-68. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.016.
- 16 Lopes G., Brunocilla M., Franco R., de Oliveira J.F. et al. (2022). Water injection enabling high efficiency flex fuel engines development. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2021-36-0082.
- 17 Zhang Z., Li A., Zheng Z. (2020). View all authors and affiliations Numerical simulation research on the influence of the parameters of water injection on the GDI engine. *International Journal of Engine Research*, 24(6). DOI: 10.1177/1468087422112621.
- 18 Lyandenbursky V.V., Grabowsky A.A., Belokovylsky A.M., Salmin V.V., Anoshkin P.I. (2013). Fuel systems of modern and advanced internal combustion engines: Textbook. Penza: PGUAS. 324 p.
- 19 Parsadanov I.V., Teplitsky A.A., Solodovnikov V.V., Belik S.Yu. (2011). Application of water-fuel emulsion in automotive diesel engines. *Environmental efficiency (Part I). Internal Combustion Engines*, No. 2, pp. 118-121.
- 20 Garipov M.D., Sakulin R.Yu., Garipov K.N., Zinnatullin R.F. (2012). Study of hydrated ethanol combustion in piston ICE. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Aircraft Technology*, No. 1, pp. 28-30.
- 21 Dimoglo A.V. (2023). Improvement of the fuel system for gas-diesel engines of agricultural tractors. PhD thesis (Specialty 4.3.1). Voronezh. 193 p.
- 22 Sudarkin V.N. (2023). Improving energy efficiency of internal combustion engines through ozonation of fuel-air mixture. PhD thesis (Specialty 4.3.2). Zernograd. 156 p.
- 23 Boloev P.A., Bodyakina T.V., Gergenova T.P., Enina N.A. (2024). Modeling of alternative fuel combustion in internal combustion engines. *Tractors and Agricultural Machinery*, Vol. 91, No. 1, pp. 5-12. DOI: 10.17816/0321-4443-322839.
- 24 Startsev A.V., Romanov S.V., Storozhev I.I., Alushkin T.E. (2019). Improving environmental performance of diesel engines through water injection and modified fuels. *Scientific Life*, Vol. 14, No. 4 (92), pp. 472-479. DOI: 10.26088/INOB.2019.92.30216.
- 25 Syrovatka A.V., Arutyunyan Yu.L., Borovskaya L.V. (2021). Conversion of water-methanol mixture during gas transportation. *The Scientific Heritage*, No. 81, pp. 33-34.
- 26 Markov V.A., Kuleshov A.S., Denisov A.D., Zenkin A.N., Zemlyamerova A.S. (2020). Computational studies of water injection methods into diesel engine cylinders. *Alternative Fuel Transportation*, No. 4 (76), pp. 50-61.

27 Pavlov D.A., Piontkovskaya S.A., Smolensky V.V. (2016). Features of hydrogen application in ICE with different fuel-air mixture formation methods. Proceedings of Samara Scientific Center RAS, Vol. 18, No. 4(5), pp. 925-930.

28 Bagirova N.N., Mustafayeva R.E. (2023). Study of stability of modified fuel emulsions. Bulatov Readings, Vol. 2, pp. 48-50.

29 Chernov I.S., Chukharkin A.V., Savenko E.S. (2019). Study of water additives in fuel on ICE performance parameters. Bulletin of Donbass National Academy of Construction and Architecture, No. 4 (138), pp. 96-99.

30 Akchurin Kh.I. (2015). Study of water addition to fuel mixture on compression ratio and boost pressure in gasoline engines. Truck, No. 7, pp. 27-29.

31 Denezhko L.V., Novopashin L.A., Sadov A.A., Potetnya K.M. (2019). Theoretical studies of water injection impact on diesel engine performance. Scientific and Technical Bulletin: Technical Systems in Agriculture, No. 3 (3), pp. 99-104.

32 Bochkareva I.I., Zaitsev V.P., Roslyakova O.V. (2021). Modified fuel for reducing harmful emissions of internal combustion engines. Marine Intelligent Technologies, No. 3-1 (53), pp. 83-88. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.011.

© Кораблев Р. А., Толстов С. А., Лихачев Д. В., Артемов А. Ю., 2025