doi:10.18286/1816-4501-2026-3-242-248
УДК 629.366

Влияние впрыска воды в цилиндр двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на показатели рабочего процесса

Ф. Х. Халиуллин[1]✉, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тракторы, автомобили и энергетические установки»
Б. Г. Зиганшин[1], доктор технических наук, профессор, первый проректор
В. И. Курдюмов[3], доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»
И. Г. Галиев[1], доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Эксплуатация и ремонт машин»
И. Р. Курпединов[2], аспирант кафедры «Автомобильные двигатели и сервис»
[1]Казанский государственный аграрный университет;
420015, Казань, ул. К. Маркса, 65
[2]Казанский национальный исследовательский технический университет (Казанский авиационный институт)
420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10
[3] ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ;
432000, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1
✉nzrg555@mail.ru

Резюме. В настоящее время актуальными становятся вопросы обеспечения экологических показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС), используемых как в промышленности и строительстве, так и в сельском хозяйстве. Одним из вариантов решения этой проблемы является впрыск воды в горючую смесь, используемую в поршневых ДВС. Это позволяет повысить эффективные показатели двигателя за счет использования теплоты отработавших газов, а также снизить температуру в цилиндре и уменьшить интенсивность образования оксидов азота NOx. Цель исследований – оценка влияния впрыска воды на состав отработавших газов двухцилиндрового двигателя с искровым зажиганием. В работе исследовано влияние впрыска воды во впускной тракт бензинового двигателя внутреннего сгорания на эффективные и экологические показатели рабочего цикла. Проведён тепловой расчёт рабочего цикла двигателя с учётом впрыска воды в камеру сгорания. Показано, что добавление воды в количестве 10…20 % от массы топлива приводит к снижению температуры сгорания горючей смеси, уменьшению образования оксидов азота и повышению эффективной мощности на 6…9 %. Оценка снижения выбросов NOx выполнена по термическому механизму Зельдовича. Установлено, что снижение температуры цикла обеспечивает уменьшение выбросов NOx на 20…30 %. Для оценки параметров двигателя выполнено одномерное моделирование в программном комплексе AVL BOOST. Разработана расчетная модель двухцилиндрового двигателя с искровым зажиганием, включающая цилиндры, впускной и выпускной коллекторы, систему подачи топлива и систему впрыска воды. В ходе исследования получены зависимости температуры и давления в цилиндре от угла поворота коленчатого вала. Установлено, что применение впрыска воды позволяет снизить максимальную температуру цикла с 3140 К до 3070 К, что приводит к уменьшению скорости образования оксидов азота NOx. Максимальное давление цикла при этом сохраняется на уровне 6…6,5 МПа, что свидетельствует о сохранении эффективных показателей двигателя.
Ключевые слова: впрыск воды, механизм Зельдовича. ДВС, AVL BOOST, температура сгорания, рабочий цикл двигателя.
Для цитирования: Влияние впрыска воды в цилиндр двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на показатели рабочего процесса / Ф. Х. Халиуллин, Б. Г. Зиганшин, В. И. Курдюмов, и др. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 3 (75). С. 242-248. doi:10.18286/1816-4501-2026-3-242-248

Effect of water injection into the cylinder of a spark-ignition internal combustion engine on operating process parameters

F. Kh. Khaliullin, B. G. Ziganshin, V. I. Kurdyumov, I. G. Galiev, I. R. Kurpedinov
[1]Kazan State Agrarian University
420015, Kazan, K. Marx St., 65
[2]Kazan National Research Technical University (Kazan Aviation Institute)
420111, Kazan, Karl Marx St., 10
[3]FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University
432000, Ulyanovsk, Novyi Venets Blvd., 1
✉nzrg555@mail.ru

Abstract. Ensuring the environmental performance of internal combustion engines (ICEs) used in industry, construction, and agriculture is currently becoming a pressing issue. One solution to this problem is water injection into the combustible mixture used in piston ICEs. This improves engine performance by utilizing exhaust heat, while also reducing in-cylinder

temperatures and nitrogen oxide (NOx) formation. The objective of this study was to evaluate the impact of water injection on the exhaust gas composition of a two-cylinder spark-ignition engine. This study examined the impact of water injection into the intake tract of a gasoline ICE on the efficiency and environmental performance of the engine's operating cycle. A thermal calculation of the engine's operating cycle was performed, taking into account water injection into the combustion chamber. It was shown that adding 10-20% of the fuel mass reduces the combustion temperature of the combustible mixture, reduces nitrogen oxide formation, and increases effective power by 6-9%. An assessment of NOx emission reduction was performed using the Zeldovich thermal mechanism. It was found that lowering the cycle temperature reduces NOx emissions by 20-30%. One-dimensional modeling was performed using the AVL BOOST software package to evaluate engine parameters. A computational model of a two-cylinder spark-ignition engine was developed, including cylinders, intake and exhaust manifolds, fuel supply system, and water injection system. The study yielded dependences of cylinder temperature and pressure on crankshaft angle. It was found that using water injection reduces the maximum cycle temperature from 3140 K to 3070 K, which leads to a decrease in the rate of NOx formation. Maximum cycle pressure remains at 6-6.5 MPa, indicating the engine's effective performance.

Keywords: water injection, Zeldovich mechanism, ICE, AVL BOOST, combustion temperature, engine duty cycle.
For citation: Effect of water injection into the cylinder of a spark-ignition internal combustion engine on operating process parameters / F. Kh. Khaliullin, B. G. Ziganshin, V. I. Kurdyumov, et al. // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.3 (75): 242-248 doi:10.18286/1816-4501-2026-3-242-248

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (соглашение от 22.12.2025 г. № 16/2025-ПД-КазГАУ).

Введение

В связи с жесткими требованиями к выбросам, экологическими нормами и более высокими требованиями к двигателям повышение эффективности двигателей и снижение токсичных выбросов стали ключевыми целями развития автомобильных компаний и производителей. В работах [1, 2, 3] исследовали детонацию и нестабильность горения, возникающие при расширении предела обеднения смеси (ЛБ) при высокой степени сжатия (CR) под высокой нагрузкой. Увеличение соотношения вода/топливо (W/F) с 0,1 до 0,2 снижало интенсивность детонации примерно в три раза. В качестве одного из наиболее эффективных методов подавления детонации и снижения потерь мощности на охлаждение в двигателях с искровым зажиганием в последние годы много внимания уделяют впрыску воды (WI). Было доказано, что WI значительно подавляет детонацию благодаря своим физическим и химическим эффектам в условиях высоких нагрузок в двигателях с высокой степенью сжатия.

В работах [4 - 7] представлена концепция добавления двух тактов к циклу Отто или Дизеля для повышения топливной эффективности. Ее можно рассматривать как четырехтактный цикл Отто или Дизеля, за которым следует двухтактный цикл рекуперации теплоты с использованием пара. Для исследования этой модификации использовалась идеальная термодинамическая модель сжатия выхлопных газов, впрыска воды и расширения.

Впрыск воды может снизить температуру сгорания в водородных двигателях с непосредственным впрыском (HDI), уменьшая выбросы оксидов азота (NOx). В работах [8, 9, 10] построена трехмерная численная модель двигателя с непосредственным впрыском чистого водорода в цилиндр. Точность расчета численной модели проверена на основе экспериментальных данных.

Интеграция прямого впрыска воды (DWI) с процессом обедненного сгорания (LB) может значительно повысить производительность двигателя [11]. Данное исследование показывает, что увеличение соотношения W/F подавляет детонацию за счет увеличения времени задержки воспламенения. Интенсивность детонации при стехиометрическом сгорании значительно снижалась (примерно в три раза) при увеличении соотношения W/F с 0,1 до 0,2.

Было проведено экспериментальное исследование [12] с целью изучения того, как прямая подача воды (ПВ) может оптимизировать фазы сгорания в шеститактном бензиновом двигателе с гомогенным зарядом и воспламенением от сжатия (HCCI).

В работе [13] изучали влияние количества и времени впрыска воды на рабочие характеристики и выбросы выхлопных газов шеститактного двигателя. Для этого одноцилиндровый четырехтактный бензиновый двигатель был переоборудован в шеститактный путем модификации кулачкового механизма и адаптации системы впрыска воды. Выбросы NO снизились при впрыске воды, поскольку температура в конце цикла снизилась. В результате было установлено, что производительность двигателя улучшилась при выборе подходящего момента впрыска и количества впрыскиваемой воды благодаря эффекту рекуперации теплоты отработавших газов при впрыске воды. Тепловой коэффициент полезного действия (КПД) увеличился примерно на 8,72 % при впрыске воды. Выбросы угарного газа (CO) и несгоревших углеводородов HC снизились на 21,97 % и 18,23 %.

Рекуперация отработанной теплоты (WHR) является возможным решением для повышения общей эффективности систем [14, 15, 16]. В частности, рекуперация высокого содержания энергии из

выхлопных газов привлекает все больше внимания, особенно в контексте применения в двигателях внутреннего сгорания. В рамках систем WHR новым применением этой концепции является нагрев воды, используемой в качестве рабочего тела, до сверхкритического состояния для непосредственного впрыскивания в камеру сгорания с целью увеличения работы цикла.

Согласно приведенным в работе [17] выводам, при впрыске воды тепловые потери свежего заряда будут линейно снижаться. Максимальные значения в зависимости от параметров режима достигают 30 %. Это также приводит к охлаждению цилиндра изнутри, что позволяет организовать процесс форсирования дизельного двигателя без дополнительной тепловой напряженности деталей.

Согласно результатам работы [18] существуют несколько практически реализуемых способов подачи воды в цилиндр, в частности, впрыскивание воды перед компрессором, после компрессора в коллектор, в патрубок перед впускным клапаном и непосредственно в цилиндр дизеля. Авторы также проанализировали влияние рассмотренных способов подачи воды на топливную экономичность и токсичность отработавших газов на примере дизеля типа Д 245 (4 ЧН 11/12,5). Наиболее привлекательные результаты получены при непосредственной подаче воды в цилиндр.

При работе дизеля типа Д 245 на режиме максимальной мощности с Ne = 85,5 кВт при n = 2400 мин 1 с цикловой подачей топлива, равной 63,5 мг, и подачей воды непосредственно в цилиндр в количестве 19 мг (30 % по массе) выбросы оксидов азота NOx снижаются с 3,049 г/(кВт·ч) до 2,012 г/(кВт·ч), то есть на 34,0 %, а также выбросы твёрдых частиц ТЧ с 0,352 г/(кВт·ч) до 0,321 г/(кВт·ч), или на 8,8 %. При этом удельный эффективный расход топлива g_e увеличивается с 213,99 г/(кВт·ч) до 225 г/(кВт·ч), или на 5,6 % по сравнению с чисто дизельным циклом (без подачи воды). Заметное снижение эмиссии оксидов азота при подаче воды в цилиндры дизеля при небольшом росте расхода топлива позволяет рассматривать подачу воды в цилиндры дизеля как эффективное средство снижения выбросов оксидов азота с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания.

В работах [19, 20] авторы рассматривают вопросы дальнейшего использования полученных результатов для повышения показателей эффективности и экологичности дизельных двигателей.

Цель исследования – обоснование возможности применения впрыска воды в цилиндр поршневого двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием для улучшения его экологических показателей.

Материалы и методы

Исследования выполняли на основе теплового расчёта рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с искровым зажиганием. Впрыск воды осуществлялся непосредственно в цилиндр в момент подачи топлива.

При этом принимали следующие допущения: расход топлива остаётся неизменным; параметры впуска и остаточных газов не изменяются; влияние воды учитывается только в процессе сгорания.

Количество воды определялось как

$$\beta = \frac{G_w}{G_t}, \quad (1)$$

где G_w – массовый расход воды, кг/ч, G_t – массовый расход топлива, кг/ч.

Физически параметр β характеризует степень воздействия воды на процесс сгорания и определяет изменение теплового баланса двигателя.

Поскольку впрыскиваемая вода испаряется в процессе сгорания, она переходит в состав продуктов сгорания в виде водяного пара. Количество водяного пара

$$M_w = \frac{\beta}{18}, \quad (2)$$

где 18 — молярная масса воды, кг/кмоль.

Суммарное количество продуктов сгорания

$$M_{2w} = M_2 + M_w, \quad (3)$$

где M_2 – суммарное количество продуктов сгорания без учета впрыска воды.

Увеличение M_{2w} приводит к изменению состава рабочего тела и росту его теплоёмкости.

Основной эффект от впрыска воды связан с затратами теплоты на её нагрев и испарение. Количество теплоты на испарение воды

$$q_w = \beta \cdot r_w \cdot \varphi_{\text{исп}}, \quad (4)$$

где r_w = 2257 кДж/кг – теплота парообразования воды; $\varphi_{\text{исп}}$ – доля испарившейся воды.

Таким образом, часть теплоты сгорания топлива не участвует в нагреве рабочего тела, что приводит к снижению температуры горения.

Теплота сгорания с учетом наличия воды определяется выражением:

$$H^w_{\text{раб.см}} = \frac{H_u - \Delta H_u - q_w}{M_1(1+\gamma_r)}, \quad (5)$$

где H_u – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг топлива; ΔH_u – потеря теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, МДж/кг; M_1 – количество свежей горючей смеси, кмоль/кг топлива; γ_r – коэффициент остаточных газов.

Снижение теплоты рабочей смеси является ключевым фактором уменьшения температуры цикла и, как следствие, снижения образования оксидов азота.

Температура конца сгорания с учётом наличия воды

$$T_{rw} = T_r - \Delta T_{rw}, \quad (6)$$

где T_r– температура остаточных газов, К, ее значения определяют из теплового расчета;

$$\Delta T_{rw} = \beta \cdot k_T \cdot T_r, \quad (7)$$

где k_T – коэффициент снижения температуры сгорания при впрыске воды.

Средняя теплоёмкость продуктов сгорания увеличивается:

$$(\mu C_v)_w \approx (1{,}03 \ldots 1{,}05)(\mu C_v), \quad (8)$$

где $(\mu C_v)_w$– средняя мольная теплоёмкость рабочей смеси при постоянном объёме с учётом

наличия воды; μ – молярная масса вещества, кг/кмоль; C_v – удельная массовая теплоёмкость при постоянном объёме, кДж/(кг·К); μC_v – мольная теплоёмкость рабочей смеси при постоянном объёме, кДж/(кмоль·К); 1,03…1,05 – поправочный коэффициент, учитывающий увеличение теплоёмкости смеси при добавлении воды.

Дальнейший расчет параметров рабочего цикла и показателей работы бензинового ДВС на топливно-водной смеси проводят по известной методике.

В таблице 1 и 2 приведены результаты изменения мощности и крутящего момента от доли в процентах впрыскиваемой воды от объема топлива.

Таблица 1. Изменения мощности Ne от доли впрыскиваемой воды

n, мин$^{-1}$	1000	2000	3000	4200	5250	7000	7700
Ne, кВт	10,05	21,24	31,95	45,33	53,11	61,4	60,47
Ne+H_2O (10 %)	9,87	21,28	33,34	47,33	57,54	66,98	66,81
Ne+H_2O (15 %)	9,85	21,24	33,28	47,25	57,43	66,86	66,68
Ne+H_2O (20 %)	9,83	21,20	33,21	47,16	57,33	66,73	66,56

Таблица 2. Изменения крутящего момента Me от доли впрыскиваемой воды

n, мин$^{-1}$	1000	2000	3000	4200	5250	7000	7700
Me, Н·м	96,08	101,48	101,75	103,13	96,65	83,80	78,60
Me+H_2O (10 %)	94,31	101,65	106,17	107,67	104,71	91,42	82,89
Me+H_2O (15 %)	94,11	101,45	105,97	107,48	104,52	91,25	82,74
Me+H_2O (20 %)	93,92	101,26	105,77	107,28	104,33	91,08	82,59

Также были построены графики изменения мощности и крутящего момента.

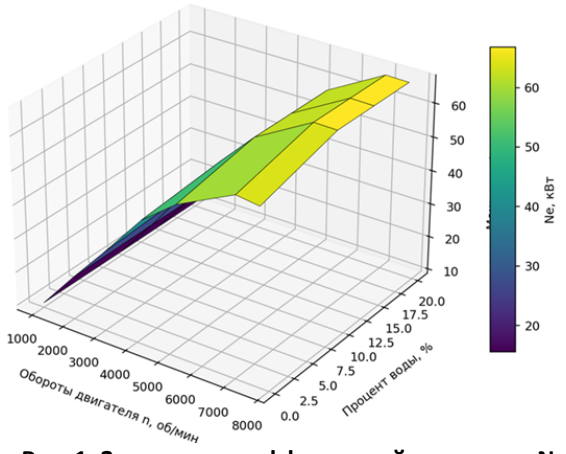


Рис. 1. Зависимость эффективной мощности Ne от частоты вращения коленчатого вала ДВС

Оценку образования оксидов азота выполняли по термическому механизму Зельдовича. Для этого использовали зависимость

$$\frac{NO_{x(w)}}{NO_x} = exp\left[-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_{zw}} - \frac{1}{T_z}\right)\right], \quad (9)$$

где NO_x– концентрация или количество оксидов азота в исходном режиме работы двигателя; $NO_{x(w)}$– концентрация NO_x при добавлении воды; E– эффективная энергия активации процесса образования термическогоNO, Дж/моль; R– универсальная газовая постоянная, R =8,314 Дж/(моль·К); T_z – температура сгорания без воды из основного расчета; T_{zw} – температура сгорания с учетом воды.

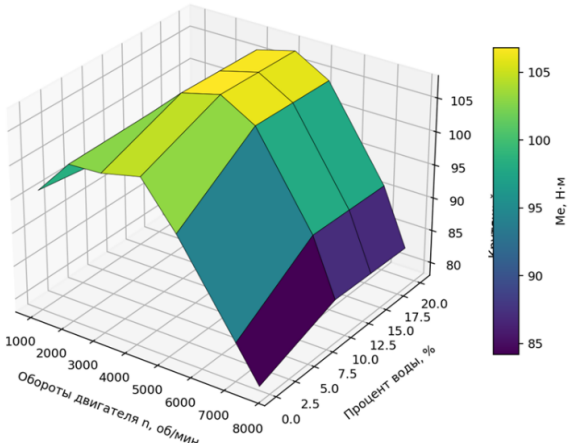


Рис. 2. Зависимость крутящего момента Me от частоты вращения коленчатого вала ДВС

В таблице 3 приведены результаты оценки количества выбросов NOx при 20 % впрыскиваемой в цилиндры ДВС воды.

Таблица 3. Выбросы NOx в % от общей массы выхлопных газов при 20 % впрыскиваемой в цилиндры воды

n, мин-1	1000	2000	3000	4200	5250	7000	7700
Tz, K	2656,86	2880,89	3051,85	3183,46	3221,71	3158,19	3017,58
Tzw, K	2601,97	2822,19	2989,68	3118,24	3154,03	3061,68	2942,85
NOx, %	26,04	23,99	22,81	22,10	22,36	31,57	27,37

Для оценки влияния впрыска воды на параметры рабочего цикла ДВС в настоящей работе выполнено математическое моделирование бензинового двигателя в программном комплексе AVL BOOST. Модель двигателя позволила исследовать изменение температуры и давления в цилиндре при различных режимах впрыска воды.

Моделирование двигателя в AVL BOOST

Моделирование выполнялось для двухцилиндрового оппозитного двигателя с искровым зажиганием.

Расчётная схема двигателя дополнительно включала граничные условия впуска и выпуска, а также форсунки для впрыска воды во впускной тракт.

При моделировании использовали следующие параметры двигателя: компоновочная схема R2, двигатель с искровым зажиганием, частота вращения коленчатого вала: n = 7000 мин$^{-1}$, диаметр цилиндра D = 90 мм, ход поршня S = 81 мм, модель сгорания – Vibe. Впрыск воды в цилиндры моделировали через дополнительную форсунку. Массовый расход воды принимали в пределах 10 % от массового расхода топлива.

Результаты

После моделирования были получены зависимости температуры и давления в цилиндре от угла поворота коленчатого вала. На рисунке 3 показано изменение температуры в цилиндре двигателя без впрыска воды.

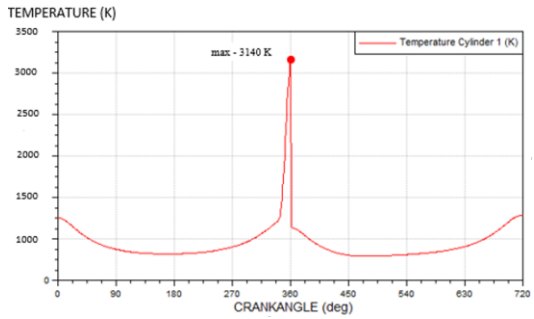


Рис. 3. Температура (К) в цилиндре без впрыска воды в зависимости от угла поворота коленчатого вала (градусы)

Максимальная температура цикла $T_{max} = 3140\ K$. Полученное значение соответствует теоретическому тепловому расчёту двигателя. На рисунке 4 показано изменение давления в цилиндре без впрыска воды.

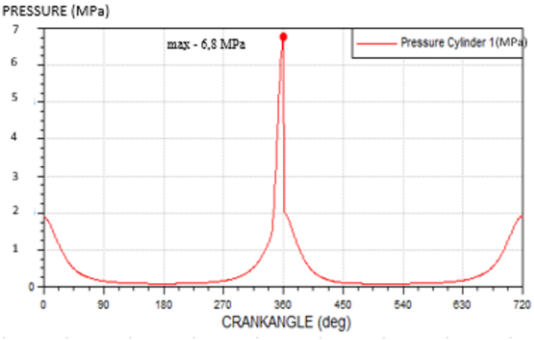


Рис. 4. Давление (МПа) в цилиндре без впрыска воды в зависимости от угла поворота коленчатого вала (градусы)

Максимальное давление цикла P МПа$_{max}$.

На рисунке 5 приведён график температуры в цилиндре при использовании впрыска воды.

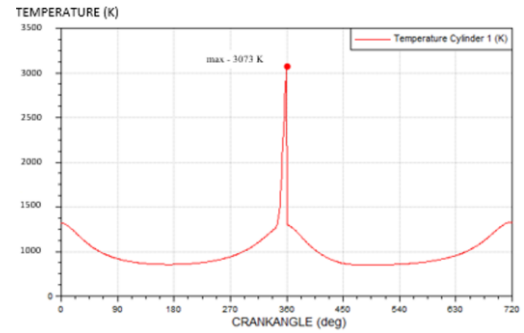


Рис. 5. Температура (К) в цилиндре при впрыске воды в зависимости от угла поворота коленчатого вала (градусы)

Анализ результатов показал снижение максимальной температуры цикла до $T_{max\ вп} = 3073$ К. Это произошло за счет увеличения теплоёмкости рабочего тела и затрат теплоты на испарение воды, а также уменьшения скорости тепловыделения.

На рисунке 6 приведён изменение давления в цилиндре при впрыске воды.

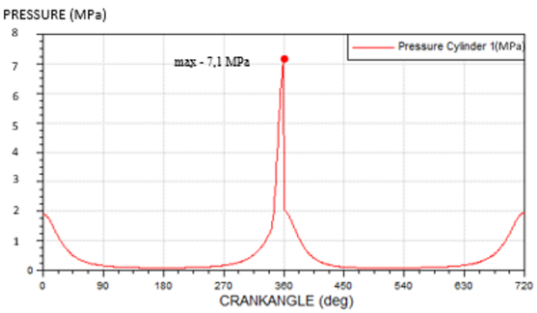


Рис. 6. Давление (Мпа) в цилиндре при впрыске воды в зависимости от угла поворота коленчатого вала (градусы)

Несмотря на снижение температуры, максимальное давление цикла меняется незначительно, что объясняется увеличением массы рабочего тела за счёт образования водяного пара; $P_{max\ вп} = 7{,}1$ МПа.

Для подтверждения достоверности выполненного теплового расчёта было проведено сравнение результатов аналитического расчёта с результатами моделирования в программном комплексе AVL BOOST при использовании впрыска воды (табл. 4).

В ходе аналитического расчёта были получены следующие максимальные параметры рабочего цикла: P МПа$_{max}$.

Таблица 4. Сравнительные параметры результатов расчетов

Параметр	Аналитический расчёт	AVL BOOST	Отклонение
Максимальная температура *T*, К	3061	3073	+0,39 %
Максимальное давление *P*, МПа	6,9	7,1	+2,9 %

Полученные результаты показывают хорошую сходимость аналитического расчёта и результатов моделирования в AVL BOOST. Отклонение температуры не превышает 1 %, а отклонение давления не превышает 3 %, что подтверждает корректность принятой математической модели рабочего процесса двигателя при впрыске воды.

Незначительное увеличение давления и температуры в AVL BOOST связано с более точным учётом динамики газообмена, теплообмена и процессов сгорания топлива в цилиндре двигателя.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают эффективность применения впрыска воды для снижения температуры цикла и уменьшения образования оксидов азота при сохранении высоких эффективных показателей ДВС с искровым зажиганием.

Обсуждение

Результаты расчётов показали, что впрыск воды в цилиндр в зависимости в процентном соотношении от расхода топлива в нашем случае привели к снижению температуры сгорания, уменьшению выбросов NOx и повышению эффективных показателей рассматриваемого двигателя. Полученные результаты коррелируются с данными, приведенными в ранее рассмотренных работах

[13, 17, 18], что позволяет говорить о достоверности проведенных исследований.

Основной эффект впрыска воды обусловлен:

• увеличением теплоёмкости рабочего тела;

• затратами теплоты на испарение воды;

• снижением температуры сгорания;

• уменьшением скорости термического образования NOx.

При этом изменения мощности связаны не с увеличением подачи топлива, а с изменениями рабочего процесса, сопровождаемыми испарением воды, поглощением теплоты из газа и снижением его температуры, что подавляет детонацию, снижает потери на охлаждение и приводит к более эффективному использованию теплоты, как было указано в работах [4-7]. Следует отметить, что чрезмерное увеличение доли воды приводит к снижению эффективности, что ограничивает оптимальный диапазон значений β. Результаты проведенных расчётов также согласуются с данными, приведенными в работе [17].

Заключение

Расчеты показали, что при впрыске воды непосредственно в цилиндр ДВС с искровым зажиганием мощностью N_e = 61,4 кВт в количестве 10…20 % от массы топлива при частоте вращения коленчатого вала n = 7000 мин$^{-1}$ температуры сгорания смеси снижается на 3…6 % при относительно стабильных значениях максимального давления цикла в пределах 6…6,5 МПа. Установлено, что снижение температуры цикла обеспечивает уменьшение выбросов NOx на 20…30 %. Результаты проведенных исследований доказывают перспективность данного решения для улучшения показателей рабочего процесса поршневых двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием.

Литература

1. Zuowen L., Zhaolei Z. Effects of in-cylinder water injection on knocking and combustion stability generated by expanding the lean burn limit // Applied Energy. 2024. Vol. 367. P. 123324, ISSN 0306-2619, doi:10.1016/j.apenergy.2024.123324

2. A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality / N. Hooftman, M. Messagie, J. Van Mierlo, et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 86, P. 1-21, ISSN 1364-0321, doi:10.1016/j.rser.2018.01.012

3. Efficiency improvement through waste heat reduction / K. Semkov, E. Mooney, M. Connolly, et al. // Applied Thermal Engineering, 2014. Vol. 70. P. 716-722, ISSN 1359-4311, doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.05.030.

4. James C., James P. A highly efficient six-stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery // Energy, 2010. Vol. 4. P. 1658-1664, ISSN 0360-5442, doi:10.1016/j.energy.2009.12.012.

5. Zhelev T.K., Semkov K.A., Cleaner flue gas and energy recovery through pinch analysis // Journal of Cleaner Production, 2004. Vol. 12. P. 165-170, ISSN 0959-6526, doi:10.1016/S0959-6526(02)00192-0

6. Chintala V., Subramanian K. Hydrogen energy share improvement along with NOx (oxides of nitrogen) emission reduction in a hydrogen dual-fuel compression ignition engine using water injection // Energy Conversion and Management, 2014. Vol. 83. P. 249-259. ISSN 0196-8904, doi:10.1016/j.enconman.2014.03.075

7. State of the art of NOx mitigation technologies and their effect on the performance and emission characteristics of biodiesel-fueled Compression Ignition engines / S. Palash, H. Masjuki, M. Kalam, et al. // Energy Conversion and Management, 2013. Vol. 76. P. 400-420. ISSN 0196-8904, doi:10.1016/j.enconman.2013.07.059

8. Investigation of the effect of water injection strategy on combustion and emission characteristics of hydrogen direct injection engine / L. Siyi, Z. Guohui, K. Chuanfu, et al. // Applied Thermal Engineering, 2026. Vol. 287. P. 359-366, ISSN 1359-4311, doi:10.1016/j.applthermaleng.2025.129366

9. Effect of fuel injection timing and injection pressure on performance in a hydrogen direct injection engine / P. Cheolwoong, K. Yongrae, O. Sechul, et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 47. P. 21552-21564, ISSN 0360-3199, doi:10.1016/j.ijhydene.2022.04.274

10. Influence of the equivalence ratio on the knock and performance of a hydrogen direct injection internal combustion engine under different compression ratios / Y. Li, W. Gao, P. Zhang, et al. // International Journal of Hydrogen Energy, 2021. Vol. 46. P. 11982-11993. ISSN 0360-3199. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.01.031

11. Zuowen L., Zhaolei Z. Effects of in-cylinder water injection on knocking and combustion stability generated by expanding the lean burn limit // Applied Energy, 2024. Vol. 367. P. 320-324. ISSN 0306-2619, doi:10.1016/j.apenergy.2024.123324

12. Woo Jae S., Han Ho S. Effects of water direct injection on a combustion phase and performance of six-stroke gasoline homogeneous charge compression ignition engine // Fuel. 2024. Vol. 356. P. 129564. ISSN 0016-2361, doi:10.1016/j.fuel.2023.129564

13. Experimental investigation of the effects of direct water injection parameters on engine performance in a six-stroke engine / A. Emre, I. Yakup, S. Hamit, et al. // Energy Conversion and Management, 2015. Vol. 98. P. 89-97, ISSN 0196-8904. doi:10.1016/j.enconman.2015.03.045

14. A study on supercritical water injection as waste heat recovery system in internal combustion engines / R. Ianniello, M. Pipicelli, G. Di Luca, et al. // Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 248. P. 123-134. ISSN 1359-4311. doi:10.1016/j.applthermaleng.2024.123084

15. Cylinder steam injection (CSI) for internal combustion (IC) engine waste heat recovery (WHR) and its application on natural gas (NG) engine / Q. Liu, M. Xie, F. Jianqin, et al. // Energy. 2021. Vol. 214. P. 118892. ISSN 0360-5442, doi:10.1016/j.energy.2020.118892

16. An approach for waste heat recovery of internal combustion engine: In-cylinder steam-air expansion / Q. Liu, F. Jianqin, Z. Liu, et al. // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 197. ISSN 1359-4311. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117394

17. Дмитриев С. В., Хлюпин В. Б. Оценка внутреннего охлаждения цилиндра дизеля с впрыском воды // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2017. № 2. С. 65-72.

18. Расчётные исследования способов подачи воды в цилиндры дизельного двигателя / В. А. Марков, А. С. Кулешов, А. Д. Денисов и др. // Транспорт на альтернативном топливе. 2020. №. 4(76). С. 50-61.

19. Methodology for determining standards of technical operation of vehicles taking into account their technical condition / F. Khaliullin, R. Akhmetzyanov, F. Arslanov, et al. // Engineering for Rural Development. 2021. 20. P. 912–918 doi:10.22616/ERDev.2021.20.TF206

20. Лефёров А. А., Куприянов Н. Д. Актуальность и проблемы совершенствования цикла ДВС применением непосредственного впрыска воды // Труды МАИ: электронный журнал. 2010. № 39. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=14811 (дата обращения: 20.08.2026).

References

1. Zuowen L., Zhaolei Z. Effects of in-cylinder water injection on knocking and combustion stability generated by expanding the lean burn limit // Applied Energy. 2024. Vol. 367, P. 123324, ISSN 0306-2619, doi:10.1016/j.apenergy.2024.123324

2. A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality / N. Hooftman, M. Messagie, J. Van Mierlo, et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 86, P. 1-21, ISSN 1364-0321, doi:10.1016/j.rser.2018.01.012

3. Efficiency improvement through waste heat reduction / K. Semkov, E. Mooney, M. Connolly, et al. // Applied Thermal Engineering, 2014. Vol. 70. P. 716-722, ISSN 1359-4311, doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.05.030.

4. James C., James P. A highly efficient six-stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery // Energy, 2010. Vol. 4. P. 1658-1664, ISSN 0360-5442, doi:10.1016/j.energy.2009.12.012.

5. Zhelev T.K., Semkov K.A., Cleaner flue gas and energy recovery through pinch analysis // Journal of Cleaner Production, 2004. Vol. 12, P. 165-170, ISSN 0959-6526, doi:10.1016/S0959-6526(02)00192-0

6. Chintala V., Subramanian K. Hydrogen energy share improvement along with NOx (oxides of nitrogen) emission reduction in a hydrogen dual-fuel compression ignition engine using water injection // Energy Conversion and Management, 2014. Vol. 83, P. 249-259, ISSN 0196-8904, doi:10.1016/j.enconman.2014.03.075

7. State of the art of NOx mitigation technologies and their effect on the performance and emission characteristics of biodiesel-fueled Compression Ignition engines / S. Palash, H. Masjuki, M. Kalam, et al. // Energy Conversion and Management, 2013. Vol.76. P. 400-420, ISSN 0196-8904, doi:10.1016/j.enconman.2013.07.059

8. Investigation of the effect of water injection strategy on combustion and emission characteristics of hydrogen direct injection engine / L. Siyi, Z. Guohui, K. Chuanfu, et al. // Applied Thermal Engineering, 2026. Vol. 287, P. 359-366, ISSN 1359-4311, doi:10.1016/j.applthermaleng.2025.129366

9. Effect of fuel injection timing and injection pressure on performance in a hydrogen direct injection engine / P. Cheolwoong, K. Yongrae, O. Sechul, et al. // International Journal of Hydrogen Energy, 2012. Vol. 47. P. 21552-21564, ISSN 0360-3199, doi:10.1016/j.ijhydene.2022.04.274

10. Influence of the equivalence ratio on the knock and performance of a hydrogen direct injection internal combustion engine under different compression ratios / Y. Li, W. Gao, P. Zhang, et al. // International Journal of Hydrogen Energy, 2021. Vol. 46, P. 11982-11993, ISSN 0360-3199, doi:10.1016/j.ijhydene.2021.01.031

11. Zuowen L., Zhaolei Z. Effects of in-cylinder water injection on knocking and combustion stability generated by expanding the lean burn limit // Applied Energy, 2024. Vol. 367. P. 320-324. ISSN 0306-2619, doi:10.1016/j.apenergy.2024.123324

12. Woo Jae S., Han Ho S. Effects of water direct injection on a combustion phase and performance of six-stroke gasoline homogeneous charge compression ignition engine // Fuel. 2024. Vol. 356. P. 129564 ISSN 0016-2361, doi:10.1016/j.fuel.2023.129564

13. Experimental investigation of the effects of direct water injection parameters on engine performance in a six-stroke engine / A. Emre, I. Yakup, S. Hamit, et al. // Energy Conversion and Management, 2015. Vol. 98. P. 89-97, ISSN 0196-8904, doi:10.1016/j.enconman.2015.03.045

14. A study on supercritical water injection as waste heat recovery system in internal combustion engines / R. Ianniello, M. Pipicelli, G. Di Luca, et al. // Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 248. P. 123-134. ISSN 1359-4311, doi:10.1016/j.applthermaleng.2024.123084

15. Cylinder steam injection (CSI) for internal combustion (IC) engine waste heat recovery (WHR) and its application on natural gas (NG) engine / Q. Liu, M. Xie, F. Jianqin, et al. // Energy. 2021. Vol. 214. P. 118892. ISSN 0360-5442, doi:10.1016/j.energy.2020.118892

16. An approach for waste heat recovery of internal combustion engine: In-cylinder steam-air expansion / Q. Liu, F. Jianqin, Z. Liu, et al. // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 197. ISSN 1359-4311, doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117394

17. Dmitriev S.V., Khlyupin V.B. Evaluation of internal cooling of a diesel engine cylinder using water injection // Vestnik of the Volga State University of Technology. Ser.: Materials. Structures. Technologies. 2017. No. 2. P. 65-72.

18. Computational studies of water injection methods into diesel engine cylinders / V. A. Markov, A.S. Kuleshov, A.D. Denisov et al. // Alternative Fuel Transport. 2020. 4(76). P. 50-61.

19. Methodology for determining standards of technical operation of vehicles taking into account their technical condition / F. Khaliullin, R. Akhmetzyanov, F. Arslanov, et al. // Engineering for Rural Development. 2021. 20. P. 912–918. doi:10.22616/ERDev.2021.20.TF206

20. Leferov A. A., Kupriyanov N. D. Relevance and challenges of improving the ICE cycle through direct water injection // Scientific works of MAI: Electronic Journal. 2010. No. 39. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=14811 (access date: 20.08.2026).