

Научная статья

УДК 621.436.068.74; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-272-281

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВПРЫСКА ТОПЛИВА

✉ Мельберт Алла Александровна;

Машенская Екатерина Александровна.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,

г. Барнаул, Россия

✉ aamelbert@mail.ru

Аннотация. Целью исследования явилась количественная оценка влияния продолжительности впрыска топлива на образование токсичных компонентов в отработавших газах дизеля для обоснования мероприятий по снижению техногенной нагрузки. Проведены стендовые испытания дизеля 6ЧН 15/18 (Д6Н-250) мощностью 189 кВт при 1900 мин⁻¹ по ГОСТ 31967–2012, ГОСТ 24028–2013 на 13-режимном цикле. Варьировалась продолжительность впрыска от 20 до 35° п.к.в., проводились отбор и анализ отработавших газов, определялась дисперсность твердых частиц. Установлено, что увеличение продолжительности впрыска с 20 до 35° п.к.в. приводит к росту эмиссии продуктов неполного сгорания: выбросы СО возрастают в 1,93 раза, твердых частиц – в 1,35 раза, углеводородов – в 1,64 раза. Одновременно выбросы оксидов азота снижаются в 2,27 раза вследствие того, что момент воспламенения переходит за верхнюю мертвую точку. Выявлено увеличение среднего диаметра твердых частиц при растянутом впрыске. Сопоставление с экологическими стандартами показало, что ни один из исследованных режимов не обеспечивает выполнение норм ЕВРО-4–6 по всем компонентам; выбросы твердых частиц превышают нормы ЕВРО-6 в 35 раз. Научная новизна заключается в получении количественных зависимостей между продолжительностью впрыска и образованием токсичных компонентов для дизеля 6ЧН 15/18. Практическая значимость состоит в обосновании необходимости комплексного подхода, сочетающего оптимизацию продолжительности впрыска с применением фильтров твердых частиц или каталитических нейтрализаторов.

Ключевые слова: экологическая безопасность, дизельный двигатель, отработавшие газы, продолжительность впрыска, топливо

Для цитирования: Мельберт А.А., Машенская Е.А. Повышение экологической безопасности дизельных двигателей путем изменения продолжительности впрыска топлива // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 1 (77). С. 272–281. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-272-281

Scientific article

IMPROVING ENVIRONMENTAL SAFETY OF DIESEL ENGINES BY CHANGING FUEL INJECTION DURATION

✉Melbert Alla A.;

Mashenskaya Ekaterina A.

Polzunov Altai state technical university, Barnaul, Russia

✉aamelbert@mail.ru

Abstract. The aim of the study was to quantify the effect of fuel injection duration on the formation of toxic components in diesel exhaust gases to substantiate measures for reducing technogenic load. Bench tests of the 6ChN 15/18 (D6N-250) diesel engine with a power of 189 kW at 1 900 rpm were carried out according to GOST 31967–2012, GOST 24028–2013 using the 13-mode test cycle. The injection duration was varied from 20 to 35° CA, exhaust gas sampling and analysis were performed, and particulate matter dispersion was determined. It was found that increasing the injection duration from 20 to 35° CA leads to an increase in incomplete combustion products: CO emissions increase by 1,93 times, particulate matter by 1,35 times, hydrocarbons by 1,64 times. Simultaneously, nitrogen oxide emissions decrease by 2,27 times due to the shift of the combustion process to the expansion line. An increase in the average diameter of particulate matter was revealed with extended injection. Comparison with environmental standards showed that none of the studied modes ensures compliance with EURO 4–6 standards for all components; particulate matter emissions exceed EURO 6 standards by 35 times. The scientific novelty lies in obtaining quantitative relationships between injection duration and the formation of toxic components for the 6ChN 15/18 diesel engine. The practical significance consists in substantiating the need for an integrated approach combining optimization of injection duration with the use of particulate filters or catalytic converters.

Keywords: environmental safety, diesel engine, exhaust gases, injection duration, fuel

For citation: Melbert A.A., Mashenskaya E.A. Improving environmental safety of diesel engines by changing fuel injection duration // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 1 (77). P. 272–281. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-272-281

Введение. Состояние проблемы

Современное развитие двигателестроения характеризуется ужесточением требований к экологическим показателям энергетических установок. В связи с ухудшающейся экологической обстановкой на первый план выходят именно показатели токсичности отработавших газов (ОГ) [1]. Основными нормируемыми токсичными компонентами ОГ дизельных двигателей являются оксиды азота (NO_x), монооксид углерода (CO), несгоревшие углеводороды (СН) и твердые частицы (ТЧ) [1, 2]. Около 42 % выбросов NO_x в атмосферу приходится на автомобильный транспорт, и, несмотря на развитие альтернативных силовых установок, доля дизельных двигателей остается значительной благодаря их высокой эффективности [3, 4].

Обеспечение требуемых экологических показателей дизелей достигается как совершенствованием рабочего процесса, так и установкой систем нейтрализации ОГ [2]. Среди методов снижения токсичности, основанных на совершенствовании рабочего процесса, ключевое место занимает оптимизация параметров топливоподачи: давления, момента начала и продолжительности впрыска [2, 5]. Изменение этих параметров напрямую влияет на качество смесеобразования и, как следствие, на полноту сгорания топлива и уровень образования токсичных компонентов [5, 6].

Влияние давления и момента начала впрыска на экологические показатели дизелей изучено достаточно подробно. Исследования на двигателе ТМЗ-650Д показали, что повышение

давления впрыска с 600 до 2 000 бар позволяет снизить дымность на 46,8 %, но приводит к росту NO_x на 51 % [7]. Аналогичные результаты получены в зарубежных работах: повышение давления впрыска до 300 МПа в сочетании с увеличенным давлением наддува признано эффективным средством снижения содержания дисперсных частиц в ОГ [8]. Как показано в работе [9], повышение давления впрыска до 200 МПа улучшает качество распыливания топлива, способствуя более полному сгоранию и снижению выбросов сажи, однако сопровождается ростом эмиссии NO_x . Корректировка момента начала впрыска также является эффективным инструментом управления фазой сгорания и температурой цикла [10, 11]. В современных дизелях с системами Common Rail применяются многократные впрыски, позволяющие гибко управлять процессом сгорания [12, 13]. Эффективность дополнительных впрысков в снижении выбросов сажи подтверждена исследованиями [14, 15], однако она сильно зависит от угла опережения и продолжительности основного впрыска [16].

Значительно меньшее внимание в литературе уделено влиянию продолжительности впрыска топлива как самостоятельного регулируемого параметра. Между тем продолжительность впрыска определяет характер тепловыделения: более растянутый впрыск смещает процесс сгорания на линию расширения, снижая пиковые температуры, но может ухудшать условия смесеобразования и увеличивать долю несгоревших компонентов [17, 18]. Численное моделирование работы дизельного двигателя на смесях дизеля, биодизеля и бутанола показало, что увеличение продолжительности впрыска с 20° до 50° позволяет снизить выбросы NO_x на 11,8–12,3 % [17]. Это объясняется изменением характера тепловыделения: более длительный впрыск снижает интенсивность тепловыделения в фазе предварительного смесеобразования и смещает процесс сгорания в сторону диффузионного, уменьшая локальные пиковые температуры [17, 18].

Применение альтернативных топлив также требует корректировки параметров впрыска. Исследования на двухтопливном дизель-метанольном двигателе показали, что оптимальное замещение дизеля метанолом на 30 % повышает эффективность, но для более высоких степеней замещения необходима оптимизация момента и давления впрыска дизельного топлива [18]. Изучение влияния продолжительности впрыска на смесевых топливах подтверждает значимость этого параметра для обеспечения полноты сгорания [17, 18]. В работе [19] показано, что изменение степени сжатия и момента впрыска также влияет на корреляцию между выбросами и характеристиками сгорания.

Следует отметить, что изменение степени сжатия может служить дополнительным инструментом снижения техногенной нагрузки дизеля. Как показано в работе [20], оптимизация степени сжатия позволяет улучшить экономические и экологические показатели двигателя без существенного вмешательства в конструкцию, что может применяться в комплексе с оптимизацией параметров впрыска.

Таким образом, анализ исследований [1–20] свидетельствует, что управление параметрами топливоподачи, в частности продолжительностью впрыскивания, является перспективным, но недостаточно изученным инструментом воздействия на экологические показатели дизелей. В отличие от широко исследованных параметров давления и момента начала впрыска, влияние продолжительности впрыска на образование различных токсичных компонентов требует дополнительного экспериментального изучения. Это определяет актуальность настоящего исследования, целью которого является количественная оценка влияния продолжительности впрыска топлива на образование оксидов азота, монооксида углерода, несгоревших углеводородов и ТЧ в ОГ дизеля для обоснования мероприятий по снижению его техногенной нагрузки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести экспериментальные исследования влияния продолжительности впрыска топлива на концентрации вредных веществ в ОГ дизеля 6ЧН 15/18;
- выполнить анализ дисперсности ТЧ при различных продолжительностях впрыска;

- сопоставить полученные значения выбросов с требованиями экологических стандартов и нормами Российской Федерации;
- обосновать необходимость комплексного подхода, включающего оптимизацию продолжительности впрыска и применение дополнительных средств очистки ОГ.

Методы исследования

Экспериментальные исследования проводились на дизельном двигателе 6ЧН 15/18 (модель Д6Н-250), предназначенном для транспортных установок. Основные технические характеристики двигателя: номинальная мощность 189 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1 900 мин⁻¹, удельный эффективный расход топлива 228 г/(кВт·ч), угар масла составляет 0,52 % от расхода топлива. Двигатели были собраны в соответствии с ГОСТ 10150–2014 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Общие технические условия», методы испытаний соответствовали ГОСТ 10448–2014 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приемка. Методы испытаний».

Испытания проводились по 13-режимному испытательному циклу согласно ГОСТ 31967–2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения» и ГОСТ 24028–2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения». Условия испытаний были следующими: температура окружающей среды в боксе $T_0 = 302–308$ К, атмосферное давление $B_0 = 750–752$ мм рт. ст., влажность воздуха $W_0 = 72–76$ %. Часовой расход ОГ составлял $V_{OG} = 1\,150$ м³/ч. Испытания проводились на установившихся режимах на топливе по ГОСТ 305–2013 «Топливо дизельное. Технические условия» Л-0,2–40, использовалось масло МТ-16П.

В ходе эксперимента варьировалась продолжительность впрыска топлива в диапазоне от 20 до 35 градусов поворота коленчатого вала (п.к.в.). Для каждого режима работы двигателя проводился отбор проб ОГ с последующим анализом их компонентного состава. Определялись концентрации следующих вредных веществ: СО, СН, альдегидов (СНОН) и ТЧ. Дополнительно исследовалась дисперсность ТЧ.

Измерение дисперсности ТЧ выполнялось с использованием дымомера Bosch. Обработка полученных фильтров производилась в соответствии со стандартными методиками, что позволило определить распределение частиц по размерам и их средний диаметр при различных режимах работы двигателя.

Для верификации полученных результатов и оценки воспроизводимости часть экспериментов была повторена на одноцилиндровом дизеле 1ЧН15/18 при режиме работы: частота вращения 1 500 мин⁻¹, мощность 48,4 кВт, давление наддува $P_k = 0,228$ МПа. Данные испытания подтвердили основные закономерности, выявленные на полноразмерном двигателе.

Обработка экспериментальных данных и построение графических зависимостей выполнялись с использованием стандартных статистических методов. Погрешность измерений не превышала допустимых значений, установленных соответствующими ГОСТами.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведения стендовых испытаний дизеля 6ЧН 15/18 были получены экспериментальные данные, позволяющие оценить характер влияния продолжительности впрыска топлива на образование токсичных компонентов в ОГ. Анализ полученных зависимостей показал, что увеличение продолжительности впрыска с 20 до 35° п.к.в. приводит к существенному изменению состава ОГ. Как видно из рис. 1 а и 1 б, наблюдается устойчивый

рост содержания продуктов неполного сгорания: CO, CH, СНОН и ТЧ. Данная закономерность проявляется во всем диапазоне исследованных нагрузок и наиболее отчетливо выражена при максимальных значениях среднего эффективного давления ($P_e = 0,6–0,7$ МПа). Одновременно с этим, как показано на рис. 1 в, зафиксировано снижение содержания оксидов азота (NO_x) в ОГ, которое при максимальной продолжительности впрыска достигает пятикратного уменьшения по сравнению с минимальными значениями продолжительности. Указанные изменения наглядно демонстрируют взаимосвязь между продолжительностью впрыска и образованием различных групп токсичных компонентов.

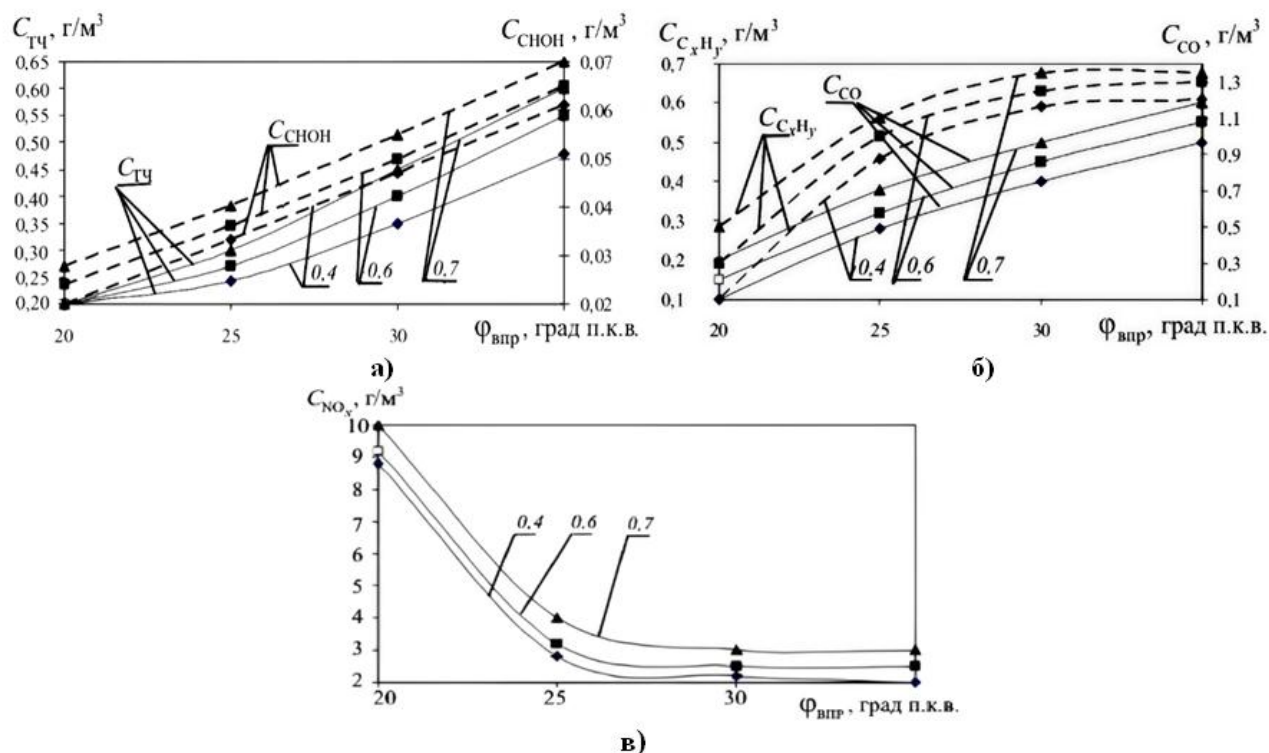


Рис. 1. Влияние продолжительности подачи топлива на вредные выбросы с ОГ дизеля 6ЧН 15/18 в зависимости от нагрузки:
а) ТЧ и CO; б) СН и СНОН; в) NO_x

Выбросы C_xH_y возрастают, так как при увеличении продолжительности впрыска топлива процесс становится вялым, доля крупных капель топлива возрастает, процесс испарения крупных капель растягивается и топливо не успевает выгореть полностью (рис. 1 б).

Выбросы ТЧ с ОГ возрастают с увеличением продолжительности подачи топлива, как показано на рис. 1 а при $P_e=0,4$; $P_e=0,6$ МПа; $P_e=0,7$ МПа.

На рис. 1 в можно наблюдать изменение характера выбросов NO_x . Это можно объяснить тем, что при увеличении продолжительности впрыска топлива процесс сгорания отстает по времени, положение T_{max} сдвигается от ВМТ и находится при значительном текущем объеме камеры сгорания на линии рассеивания, когда вероятность встречи молекул O_2 и N_2 становится меньше. Изменение выбросов при этом объясняется ухудшением условий смесеобразования при растянутом процессе впрыска.

В таблице приведены полученные оценочные показатели вредных выбросов и степень их превышения по стандартам ЕВРО и России.

Влияние продолжительности впрыска топлива на оценочные показатели вредных выбросов с ОГ дизеля 6ЧН15/18 (Д6Н-250)

Оценочные показатели	Значения оценочных показателей, г/(кВт·ч)					действительные, φ_{en} град. п.к.в.			Степень превышения допустимых оценочных выбросов по стандартам ЕВРО 3/4/5/6/РФ при $\varphi_{en} = 30^\circ$ п.к.в.
	допустимые стандартами								
	ЕВРО-3	ЕВРО-4	ЕВРО-5	ЕВРО-6	для России (с 2021 г.)	25	30	35	
$q_{O_2} NO_x$	5,00	3,50	2,00	0,40	6,00	25,2	17,1	11,1	3,42/4,88/8,55/42,75/2,85
$q_{O_2} CO$	2,00	1,50	1,50	1,50	3,50	8,43	13,8	16,3	6,57/9,2/9,2/9,2/3,94
$q_{O_2} C_xH_y$	0,60	0,46	0,25	0,13	0,40	0,23	0,31	0,36	0,52/0,67/1,24/2,38/0,78
$q_{O_2} TC$	0,10	0,02	0,02	0,01	0,10	0,31	0,35	0,42	3,5/17,5/17,5/35/3,5

Анализ данных таблицы показал, что при изменении продолжительности впрыска с 25 до 35 град п.к.в. происходит снижение оценочных выбросов NO_x в 2,27 раза, оценочный показатель по CO при этом вырастает в 1,93 раза, а TC – в 1,35 раза. Рост выбросов CH составил 0,64 раза и на данном этапе можно их не учитывать, так как для данного дизеля в настоящее время они практически удовлетворяют требованиям ЕВРО-3, ЕВРО-4 и требованиям норм России. По TC рост выбросов составил 0,74 раза, при этом степень превышения допустимых оценочных выбросов по стандартам ЕВРО-4 и ЕВРО-5 при $\varphi_{en} = 30^\circ$ п.к.в. составило 17,5, а ЕВРО-6 – 35. Что свидетельствует о необходимости использования фильтров TC в системе выпуска дизеля.

С целью обоснования применения фильтров TC в системе выпуска была проведена оценка дисперсности TC в зависимости от продолжительности впрыска. Результаты измерений на дымомере Bosch (рис. 2) показали, что увеличение продолжительности впрыска сопровождается ростом среднего диаметра частиц. Эта тенденция подтвердилась и при испытаниях на одноцилиндровом двигателе 1ЧН15/18 (рис. 3).

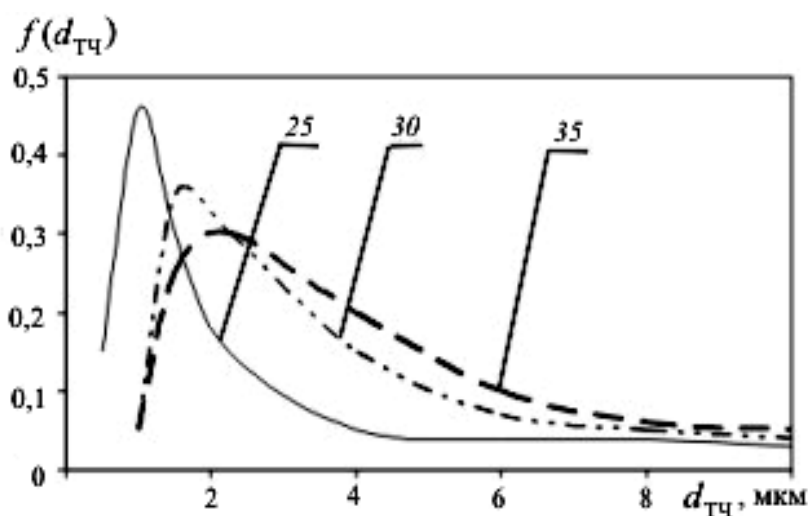


Рис. 2. Влияние продолжительности подачи топлива на дисперсность TC дизеля 6ЧН15/18

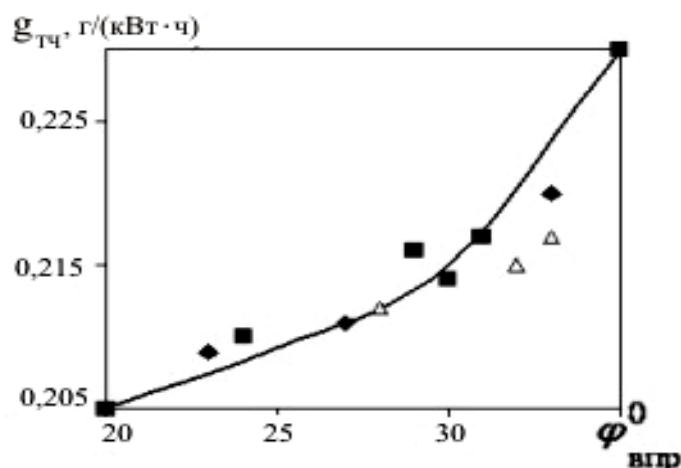


Рис. 3. Влияние продолжительности подачи топлива на выбросы ТЧ (1СН15/18, 1500 мин⁻¹, 48,4 кВт, P_к=0,228 МПа)

На рис. 3 видно, что с увеличением продолжительности подачи топлива с 20 до 35 град п.к.в. удельные выбросы ТЧ возросли с 0,205 до 0,230 г/(кВт·ч).

Затянутая подача топлива на линию расширения приводит к увеличению несвоевременности сгорания и повышенным выбросам ТЧ с ОГ.

Таким образом, в зависимости от параметров подачи топлива изменяются и уровни вредных выбросов.

Заключение

В результате экспериментальных исследований влияния продолжительности впрыска топлива на экологические показатели дизеля 6СН 15/18 установлены количественные закономерности образования основных вредных веществ ОГ. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Продолжительность впрыска топлива является значимым фактором, определяющим уровни выбросов токсичных компонентов. Увеличение продолжительности впрыска с 20 до 35° п.к.в. приводит к росту содержания продуктов неполного сгорания: выбросы СО возрастают в 1,93 раза, ТЧ – в 1,35 раза, несгоревших углеводородов – в 1,64 раза. Одновременно наблюдается снижение выбросов оксидов азота в 2,27 раза, что обусловлено смещением процесса сгорания на линию расширения и уменьшением локальных пиковых температур в камере сгорания.

Выявлено, что увеличение продолжительности впрыска сопровождается ростом среднего диаметра ТЧ, что объясняется ухудшением условий смесеобразования и протеканием процессов окисления при более низких температурах. Данная закономерность подтверждена результатами испытаний на одноцилиндровом дизеле 1СН15/18.

Сопоставление полученных значений выбросов с требованиями экологических стандартов показало, что ни один из исследованных режимов по продолжительности впрыска не позволяет одновременно обеспечить выполнение норм ЕВРО-4, ЕВРО-5 и ЕВРО-6 по всем компонентам. Наиболее проблемными являются выбросы ТЧ, превышающие нормы ЕВРО-4 и ЕВРО-5 в 17,5 раза, а ЕВРО-6 – в 35 раз.

Научная новизна работы заключается в получении количественных зависимостей между продолжительностью впрыска топлива и образованием различных токсичных компонентов для дизеля 6СН 15/18, а также в установлении закономерностей изменения дисперсного состава ТЧ при варьировании данного параметра.

Практическая значимость результатов состоит в обосновании необходимости комплексного подхода к снижению техногенной нагрузки дизелей, сочетающего оптимизацию продолжительности впрыска с применением дополнительных средств очистки ОГ.

Для выполнения современных экологических норм рекомендуется использование фильтров ТЧ или каталитических нейтрализаторов в системе выпуска.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение совместного влияния продолжительности впрыска и других регулируемых параметров топливоподачи (давления, момента начала впрыска) на образование вредных веществ, а также на оценку эффективности различных типов нейтрализаторов при работе дизеля на режимах с измененной продолжительностью впрыска.

Список источников

1. Расчетное исследование параметров дизельного двигателя с системой рециркуляции отработавших газов / А.С. Блинов [и др.] // Двигателестроение. 2024. № 2 (296). С. 42–55.
2. Марков В.А. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок и направления их совершенствования // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2025. № 1 (152). С. 142–168. DOI: 10.18698/0236-3941-2025-1-142-168
3. Peng Q., Rockstroh T., Hall C. The impact of fuel and injection strategy on combustion characteristics, emissions and efficiency in gasoline compression ignition operation // Fuel. 2022. Vol. 318. P. 123548. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123548
4. Boretti A. Advantages and Disadvantages of Diesel Single and Dual-Fuel Engines // Frontiers in Mechanical Engineering. 2019. Vol. 5. P. 64. DOI: 10.3389/fmech.2019.00064
5. Kalwar A., Singh A.P., Agarwal A.K. Experimental Study of Fuel Injection Timing and Exhaust Gas Recirculation for Combustion Control in Diethyl Ether-Diesel Blend Fuelled Tractor Engine // Fuel. 2024. Vol. 371. P. 131930. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131930
6. Investigation on the effect of the flow passage geometry of diesel injector nozzle on injection process parameters and engine performances / V. Markov [et al.] // Energy Science & Engineering. 2022. DOI: 10.1002/ese3.1051
7. Подколзин П.С. Исследования влияния давления впрыска на мощностные и экологические показатели двигателя «ТМЗ-650Д» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 469–473.
8. Марков В.А. Тенденции совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2023. № 1 (144). С. 97–126. DOI: 10.18698/0236-3941-2023-1-97-126
9. Мельберт А.А., Нгуен Ч.Х., Машенский А.В. Применение топливоподающей аппаратуры с увеличенным давлением впрыска для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89. № 5. С. 325–331. DOI: 10.17816/0321-4443-108145
10. Влияние показателей топливоподачи на рабочий процесс дизеля при достижении давления впрыскивания 250 МПа / М.Г. Шатров [и др.] // Двигателестроение. 2023. № 4 (294). С. 42–55. DOI: 10.18698/jec.2023.4.42-55
11. Impact of pilot diesel injection timing on performance and emission characteristics of marine natural gas/diesel dual-fuel engine / X. Zhang [et al.] // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. P. 10767. DOI: 10.1038/s41598-024-61672-5
12. Simpson T., Depcik C. Multiple Fuel Injection Strategies for Compression Ignition Engines // Energies. 2022. Vol. 15. № 14. P. 5214. DOI: 10.3390/EN15145214
13. Yang Z., Tan Q., Geng P. Combustion and Emissions Investigation on Low-Speed Two-Stroke Marine Diesel Engine with Low Sulfur Diesel Fuel // Polish Maritime Research. 2019. Vol. 26. P. 153–161. DOI: 10.2478/pomr-2019-0017
14. Effect of after injections on late cycle soot oxidation in a small-bore diesel engine / L. Rao [et al.] // Combustion and Flame 2018. Vol. 191. P. 513–526. DOI: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2018.02.014

15. Dave H., Sutaria B., Patel B. An Approach to Improve Smoke-Fuel Consumption Trade-Off Under Pilot Injection Mode in a Diesel Engine // *Energy, Environment, and Sustainability*. 2021. P. 377–403. DOI: 10.1007/978-981-16-1513-9_15
16. Farhan S.M. Impact of post-injection strategies on combustion and unregulated emissions during different loads in an HSDI diesel engine / S.M. Farhan [et al.] // *Fuel*. 2020. Vol. 267. P. 117256. DOI: 10.1016/J.FUEL.2020.117256
17. Youssef A., Ibrahim A. A numerical investigation into the effect of altering compression ratio, injection timing, and injection duration on the performance of a diesel engine fuelled with diesel-biodiesel-butanol blend // *Clean Energy*. 2024. Vol. 8. № 5. P. 73–94. DOI: 10.1093/ce/zkae055
18. Fuel injection strategy optimisation and experimental performance and emissions evaluation of diesel displacement by port fuel injected methanol in a retrofitted mid-size genset engine prototype / A.K. Agarwal [et al.] // *Energy*. 2022. Vol. 248. P. 123593. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123593
19. Correlation between Emission and Combustion Characteristics with the Compression Ratio and Fuel Injection Timing in Tribologically Optimized Diesel Engine / S. Milojević [et al.] // *Tehnički vjesnik*. 2022. Vol. 29. № 4. P. 1210–1219. DOI: 10.17559/TV-20220223164932
20. Возможность уменьшения техногенной нагрузки дизельного двигателя на окружающую среду путём изменения степени сжатия / А.А. Мельберт [и др.] // *Тракторы и сельхозмашины*. 2025. Т. 92. № 1. С. 5–9. DOI: 10.17816/0321-4443-631489

References

1. Raschetnoe issledovanie parametrov dizel'nogo dvigatelya s sistemoy recirkulyacii otrabotavshih gazov / A.S. Blinov [i dr.] // *Dvigatelsestroenie*. 2024. № 2 (296). S. 42–55.
2. Markov V.A. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya teploenergeticheskikh ustanovok i napravleniya ih sovershenstvovaniya // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroenie*. 2025. № 1 (152). S. 142–168. DOI: 10.18698/0236-3941-2025-1-142-168
3. Peng Q., Rockstroh T., Hall C. The impact of fuel and injection strategy on combustion characteristics, emissions and efficiency in gasoline compression ignition operation // *Fuel*. 2022. Vol. 318. P. 123548. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123548
4. Boretti A. Advantages and Disadvantages of Diesel Single and Dual-Fuel Engines // *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 5. P. 64. DOI: 10.3389/fmech.2019.00064
5. Kalwar A., Singh A.P., Agarwal A.K. Experimental Study of Fuel Injection Timing and Exhaust Gas Recirculation for Combustion Control in Diethyl Ether-Diesel Blend Fuelled Tractor Engine // *Fuel*. 2024. Vol. 371. P. 131930. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131930
6. Investigation on the effect of the flow passage geometry of diesel injector nozzle on injection process parameters and engine performances / V. Markov [et al.] // *Energy Science & Engineering*. 2022. DOI: 10.1002/ese3.1051
7. Podkolzin P.S. Issledovaniya vliyaniya davleniya vpryska na moshchnostnye i ekologicheskie pokazateli dvigatelya «TMZ-650D» // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2021. № 12. S. 469–473.
8. Markov V.A. Tendencii sovershenstvovaniya sistem avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya teploenergeticheskikh ustanovok // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroenie*. 2023. № 1 (144). S. 97–126. DOI: 10.18698/0236-3941-2023-1-97-126
9. Mel'bert A.A., Nguen Ch.H., Mashenskij A.V. Primenenie toplivopodayushchej apparatury s uvelichennym davleniem vpryska dlya snizheniya tekhnogennoj nagruzki na okruzhayushchuyu sredu // *Traktory i sel'hozmashiny*. 2022. Т. 89. № 5. S. 325–331. DOI: 10.17816/0321-4443-108145
10. Vliyanie pokazatelej toplivopodachi na rabochij process dizelya pri dostizhenii davleniya vpryskivaniya 250 MPa / M.G. Shatrov [i dr.] // *Dvigatelsestroenie*. 2023. № 4 (294). S. 42–55. DOI: 10.18698/jec.2023.4.42-55
11. Impact of pilot diesel injection timing on performance and emission characteristics of marine natural gas/diesel dual-fuel engine / X. Zhang [et al.] // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. P. 10767. DOI: 10.1038/s41598-024-61672-5

12. Simpson T., Depcik C. Multiple Fuel Injection Strategies for Compression Ignition Engines // *Energies*. 2022. Vol. 15. № 14. P. 5214. DOI: 10.3390/EN15145214
13. Yang Z., Tan Q., Geng P. Combustion and Emissions Investigation on Low-Speed Two-Stroke Marine Diesel Engine with Low Sulfur Diesel Fuel // *Polish Maritime Research*. 2019. Vol. 26. P. 153–161. DOI: 10.2478/pomr-2019-0017
14. Effect of after injections on late cycle soot oxidation in a small-bore diesel engine / L. Rao [et al.] // *Combustion and Flame* 2018. Vol. 191. P. 513–526. DOI: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2018.02.014
15. Dave H., Sutaria B., Patel B. An Approach to Improve Smoke-Fuel Consumption Trade-Off Under Pilot Injection Mode in a Diesel Engine // *Energy, Environment, and Sustainability*. 2021. P. 377–403. DOI: 10.1007/978-981-16-1513-9_15
16. Farhan S.M. Impact of post-injection strategies on combustion and unregulated emissions during different loads in an HSDI diesel engine / S.M. Farhan [et al.] // *Fuel*. 2020. Vol. 267. P. 117256. DOI: 10.1016/J.FUEL.2020.117256
17. Youssef A., Ibrahim A. A numerical investigation into the effect of altering compression ratio, injection timing, and injection duration on the performance of a diesel engine fuelled with diesel-biodiesel-butanol blend // *Clean Energy*. 2024. Vol. 8. № 5. P. 73–94. DOI: 10.1093/ce/zkae055
18. Fuel injection strategy optimisation and experimental performance and emissions evaluation of diesel displacement by port fuel injected methanol in a retrofitted mid-size genset engine prototype / A.K. Agarwal [et al.] // *Energy*. 2022. Vol. 248. P. 123593. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123593
19. Correlation between Emission and Combustion Characteristics with the Compression Ratio and Fuel Injection Timing in Tribologically Optimized Diesel Engine / S. Milojević [et al.] // *Tehnički vjesnik*. 2022. Vol. 29. № 4. P. 1210–1219. DOI: 10.17559/TV-20220223164932
20. *Vozmozhnost' umen'sheniya tekhnogennoj nagruzki dizel'nogo dvigatelya na okruzhayushchuyu sredu putyom izmeneniya stepeni szhatiya* / A.A. Mel'bert [i dr.] // *Traktory i sel'hozmashiny*. 2025. T. 92. № 1. S. 5–9. DOI: 10.17816/0321-4443-631489

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 16.01.2026; одобрена после рецензирования: 25.02.2026; принята к публикации: 03.03.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 16.01.2026; approved after review: 25.02.2026; accepted for publication: 03.03.2026

Информация об авторах:

Мельберг Алла Александровна, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46), доктор технических наук, профессор, e-mail: aamelbert@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3973-8315>, SPIN-код: 5949-5831

Машенская Екатерина Александровна, ассистент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46), e-mail: suzuki468@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2101-7050>, SPIN-код: 8323-5725

Information about the authors:

Melbert Alla A., professor of department of life safety of Polzunov Altai state technical university (656038, Altai Territory, Barnaul, Lenin ave., 46), doctor of technical sciences, professor, e-mail: aamelbert@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3973-8315>, SPIN: 5949-5831

Mashenskaya Ekaterina A., an assistant of department of life safety of Polzunov Altai state technical university (656038, Altai Territory, Barnaul, Lenin ave., 46), email: suzuki468@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2101-7050>, SPIN: 8323-5725