

Научная статья
УДК 621.43

Экспериментальное исследование снижения нормируемых вредных выбросов с отработавшими газами надувных бензиновых двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива

Андрей Викторович Козлов¹, Александр Васильевич Гонтюрев²

^{1,2}Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

¹a.kozlov@nami.ru

²Alexander.gontyurev@nami.ru

Аннотация. Снижение нормируемых вредных выбросов с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является одним из направлений развития автомобильного двигателестроения. Но из-за постоянно ужесточающихся норм токсичности, производителям ДВС приходится применять более сложные системы, которые напрямую воздействуют на рабочий процесс, что позволяет снижать образование вредных выбросов в процессе сгорания. Однако разработка и применение дополнительных более сложных систем приводит к повышению затрат на изготовление и последующее обслуживание ДВС во всем жизненном цикле.

Цель исследования – проведение экспериментального исследования бензинового двигателя с непосредственным впрыскиванием топлива и использованием турбонаддува для оценки возможности снижения нормируемых вредных выбросов путем повышения давления впрыскивания и оптимизации угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ).

Испытания проводились на измерительном динамометрическом стенде фирмы FEV, предназначенном для испытаний ДВС мощностью до 800 кВт. Достоверность полученных данных подтверждается применением современного измерительного оборудования и обработкой полученных результатов. Результатом оптимизации УОВТ и повышении давления впрыскивания топлива бензинового ДВС с непосредственным впрыскиванием топлива и турбонаддувом стало: снижение счетной концентрации взвешенных частиц во всем диапазоне работы двигателя в среднем на 42%; снижение выбросов углеводородов во всем диапазоне работы двигателя в среднем на 7,7%; выбросы оксидов азота и углерода незначительно зависят от оптимизации УОВТ и повышении давления впрыскивания. Наблюдалось снижение удельного эффективного расхода топлива на 17 % при низком крутящем моменте до 200 Нм и частоте вращения коленчатого вала до 4000 мин⁻¹.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, давление впрыскивания топлива, угол опережения впрыскивания топлива, счетная концентрация взвешенных частиц, непосредственное впрыскивание топлива.

Для цитирования: Козлов А.В., Гонтюрев А.В. Экспериментальное исследование снижения нормируемых вредных выбросов с отработавшими газами надувных бензиновых двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №2 (36).

Original article

Experimental study of the reduction of standardized harmful emissions from exhaust gases of inflatable gasoline engines with direct fuel injection

Andrey V. Kozlov¹, Alexander V. Gontyurev²

^{1,2}Federal State Unitary Enterprise “Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute” (FSUE “NAMI”), Moscow, Russia

¹a.kozlov@nami.ru

²Alexander.gontyurev@nami.ru

Abstract. Reduction of standardized harmful emissions from exhaust gases of internal combustion engines (ICE) is one of the directions for the development of automotive engines. But due to ever-tightening toxicity standards, ICE manufacturers have to use more sophisticated systems that directly affect the workflow, which reduces the formation of harmful emissions during the combustion process. However, the development and application of additional more complex systems leads to an increase in the cost of manufacturing and subsequent maintenance of internal combustion engines throughout the entire life cycle.

The purpose of the study is to conduct an experimental study of a gasoline engine with direct fuel injection and the use of a turbocharger to assess the possibility of reducing standardized harmful emissions by increasing the injection pressure and optimizing of the start of fuel injection (SOI).

The tests were carried out on a FEV dynamometer bench designed for testing internal combustion engines with a power of up to 800 kW. The reliability of the data obtained is confirmed by the use of modern measuring equipment and processing of the results. The result of the optimization of the SOI and an increase in the fuel injection pressure of a gasoline internal combustion engine with direct fuel injection and turbocharging was: a decrease in the calculated concentration of suspended particles over the entire range of engine operation conditions by an average of 42%; reduction of hydrocarbon emissions over the entire range of engine operation by an average of 7,7%; emissions of oxides of nitrogen and carbon are slightly dependent on the optimization of the SOI and increasing the injection pressure; there was a decrease in specific effective fuel consumption by 17% at low torque up to 200 Nm and crankshaft speed up to 4000 min⁻¹.

Keywords: internal combustion engine, fuel injection pressure, start of fuel injection, calculated concentration of suspended particles, direct fuel injection.

For citation: Kozlov A.V., Gontyurev A.V. Experimental study of the reduction of standardized harmful emissions from exhaust gases of inflatable gasoline engines with direct fuel injection. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №2 (36).

Введение

Снижение нормируемых вредных выбросов с отработавшими газами (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является одним из направлений развития автомобильного двигателестроения. Но, из-за постоянно ужесточающихся норм токсичности, производителям ДВС приходится применять более сложные системы, которые напрямую воздействуют на рабочий процесс, что позволяет снижать образование вредных выбросов в процессе сгорания. Однако разработка и применение дополнительных более сложных систем, приводит к повышению затрат на изготовление и последующее обслуживание ДВС во всем жизненном цикле.

Так в 2014 году в Европе ввели экологический стандарт Евро 6, в котором, помимо массы взвешенных частиц, стали ограничивать счетную концентрацию взвешенных частиц. Стоит отметить, что был переходный период на первые три года с начала введения Евро 6, в этот период было установлено ограничение на выбросы счетной концентрации взвешенных частиц на уровне $6 \cdot 10^{12}$ #/км пробега автомобиля, в дальнейшем это ограничение снизили до $6 \cdot 10^{11}$ #/км [1]. Дополнительные ограничения на счетную концентрацию взвешенных частиц, оказали большое влияние на бензиновые двигатели с непосредственным впрыскиванием топлива. Из-за особенностей внутреннего смесеобразования бензиновые двигатели с непосредственным впрыскиванием топлива выбрасывают с ОГ большое количество взвешенных частиц, что заставило производителей ДВС дополнительно контролировать и снижать эти выбросы.

Нормы токсичности, всемирные циклы испытаний транспортных средств

Бензиновые двигатели с непосредственным впрыскиванием топлива имеют ряд преимуществ перед бензиновыми двигателями с распределенным впрыскиванием топлива. К основным преимуществам относится: снижение удельного эффективного расхода топлива; снижение выбросов диоксида углерода; возможность форсировать без возникновения детонации в двигателе, а также возможность работать на расслоенной топливовоздушной смеси (ТВС). Технология непосредственного впрыскивания топлива, заставляет более детально оценивать распределение ТВС в камере сгорания (КС), для прогнозирования образования нормируемых вредных выбросов. Известно, что в двигателях с непосредственным впрыскиванием топлива большую роль на образование нормируемых вредных выбросов влияет характеристика распылителя форсунки [2, 3]. Оптимальный выбор распылителя форсунки обеспечивает равномерное распределение ТВС по КС, также не должны образовываться локальные зоны с бедной или богатой ТВС.

В Европе экологические нормы Евро 5 были введены в 2011 году, в них стали ограничивать массовые выбросы взвешенных частиц бензиновых ДВС. Но в 2014 году ввели новые экологические нормы Евро 6, в которых ужесточили требования на массовые выбросы взвешенных частиц, а также впервые ввели дополнительные ограничения на счетную концентрацию взвешенных частиц. В новых принятых экологических нормах Евро 6d, основным нововведением стало применение нового ездового цикла WLTP, ранее использовался ездовой цикл NEDC, а также был введен новый тип испытаний, называемым тип VI, который предназначен для контроля среднего уровня выбросов оксида углерода и углеводородов при низкой температуре окружающей среды (-7°C). Основные нормы на выбросы нормируемых вредных веществ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Предельное значение нормируемых вредных выбросов с ОГ
для бензиновых ДВС

Экологическая норма	Ездовой цикл	CO	THC	NMHC	NO _x	PM	PN
		г/км					#/км
Евро – 5	NEDC	1,0	0,1	0,068	0,06	0,005	–
Евро – 6	NEDC	1,0	0,1	0,068	0,06	0,0045	$6 \cdot 10^{12}$ *
Евро – 6d	WLTP	1,0	0,1	0,068	0,06	0,0045	$6 \cdot 10^{11}$

* переходный период на первые 3 года с начала введения Евро 6, после этого ограничения установили на уровне $6 \cdot 10^{11}$ #/км

Ездовой цикл NEDC (New European Driving Cycle), представленный на рисунке 1, был введен с экологическими нормами Евро 3 и в начале применялся с нормами Евро 6. Сертификация транспортного средства (ТС), на соответствие нормам токсичности, проводится на беговых барабанах. Цикл NEDC состоит из четырех последовательных городских циклов UDC (Urban Driving Cycle), и последующего загородного цикла EUDC (Extra Urban Driving Cycle). Общая протяженность цикла NEDC составляет около 11 километров, длительность цикла составляет 1180 сек, максимальная скорость ТС в цикле – 120 км/ч, а средняя скорость ТС в цикле – 33 км/ч.

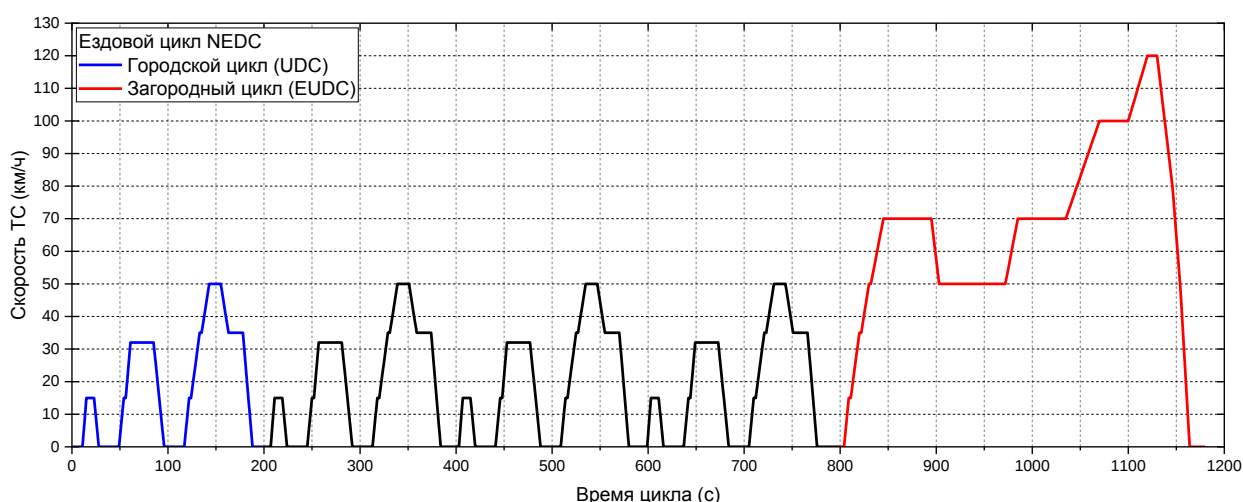


Рис. 1. Ездовой цикл NEDC

С 22 января 2021 года в Европе вступили новые экологические нормы Евро 6d, главным отличием которых стало использование нового ездового цикла WLTP (The Worldwide Harmonised Light vehicles Test Procedure). Данный цикл представлен на рисунке 2, и состоит из четырех различных последовательных фаз. Первая фаза – фаза низкой скорости, в которой ТС разгоняется до 60 км/ч, вторая фаза – средней скорости, где ТС разгоняется до 80 км/ч, третья фаза – высокой скорости, где ТС разгоняется до 100 км/ч, и четвертая фаза сверхвысокой скорости, где ТС разгоняется до 130 км/ч. Цикл WLTP также, как и цикл NEDC воспроизводится на беговых барабанах. Расстояние, которое проходит ТС в цикле WLTP, примерно составляет 23 км, время прохождения цикла 1800 секунд, средняя скорость в цикле 47 км/ч.

Помимо использования нового ездового цикла WLTP в Евро 6d, также был введен новый тип испытаний VI. Этот вид испытаний отвечает за контроль среднего уровня выбросов оксида углерода и углеводородов с ОГ после запуска холодного двигателя при низкой температуре окружающей среды -7°C. Испытания типа VI проводится на беговых барабанах и состоят из четырех городских циклов UDC (рисунок 1), общей продолжительностью 780 секунд, начинается цикл с запуска двигателя и проводят без остановок. Нормы на выбросы оксида углерода и углеводородов для испытаний типа VI приведены в таблице 2.

Таблица 2

Предельное значение выбросов оксида углерода и углеводородов
в ОГ для испытаний типа VI

	СО, г/км	НС, г/км
Норма выбросов	15	1,8

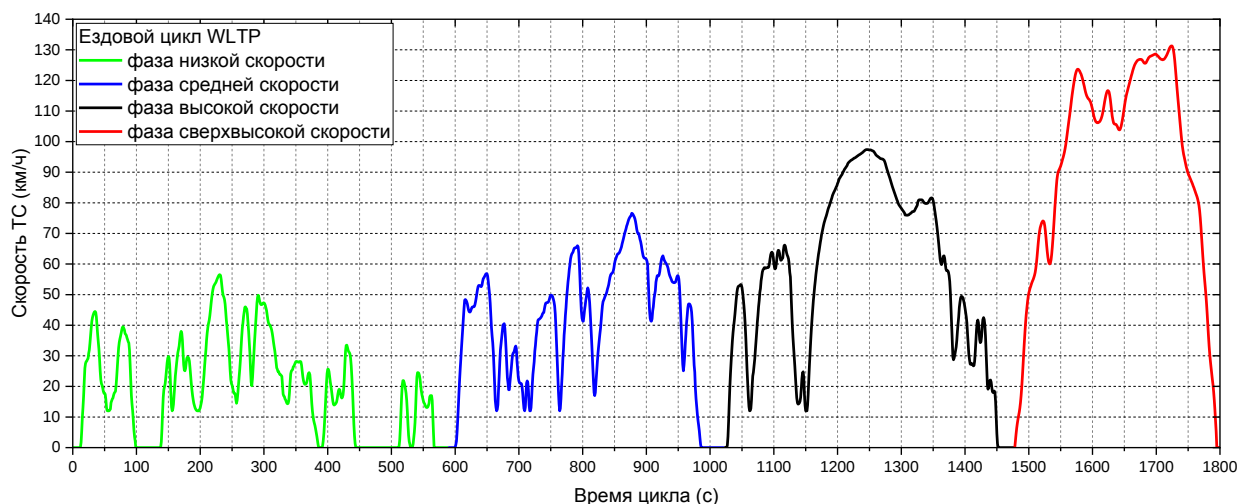


Рис. 2. Ездовой цикл WLTP

Таким образом, с 2011 года были введены ограничения на массовые выбросы взвешенных частиц, далее были введены ограничения на счетную концентрацию взвешенных частиц, а в последующем был изменен ездовой испытательный цикл и добавлен новый тип испытаний. Указанные причины приводят к необходимости постоянно работать над снижением нормируемых вредных выбросов.

Целью испытаний, результаты которых представлены в данной статье было снижение нормируемых вредных выбросов экспериментальным методом, путем повышения давления впрыскивания топлива и оптимизации угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ).

Объект исследования и измерительное оборудование

Двигатель 8СН8,8/9,0

Испытания проводились на бензиновом V-образном двигателе 8СН8,8/9,0, оборудованном системой непосредственного впрыскивания топлива. Топливный насос высокого давления фирмы Bosch HDP5evo, топливная форсунка серии Bosch HDEV5.25evo с семью отверстиями распылителя. На двигателе установлены 2 турбокомпрессора по одному на каждый ряд цилиндров, характеристики двигателя и топливоподающей аппаратуры приведены в таблице 3.

Таблица 3

Основные характеристики двигателя, ТНВД и турбокомпрессора

Параметры	Значение
Двигатель	
Компоновочная схема блока цилиндров	V8
Рабочий объем, см ³	4379
Степень сжатия	10
Номинальная мощность, кВт/л.с.	440/600
Максимальный крутящий момент, Нм	880
Диаметр цилиндра, мм	88
Ход поршня, мм	90
Топливный насос высокого давления	
Тип	плунжерный
Рабочий объем, см ³	1,2
Номинальное давление, МПа	25
Давление топлива на входе в насос, МПа	0,3...0,65
Максимальная производительность насоса, л/ч	182,9

Измерительное оборудование

Испытания были проведены на измерительном динамометрическом стенде фирмы FEV, предназначенном для испытаний ДВС мощностью до 800 кВт. Данный стенд предусматривает измерение большого количества параметров, таких как: расхода воздуха и топлива, температуры воздуха на впуске и ОГ, давление топлива и системы охлаждения, температуры охлаждающей жидкости и масла, и т.д. Также в состав измерительного динамометрического стенда входит газоаналитический комплекс фирмы HORIBA MEHA-ONE-D2, который позволяет проводить измерение

нормированных вредных выбросов в соответствии требованиями Правил ООН № 83.

Счетчик взвешенных частиц HORIBA MEXA-2300SPCS

Прибор MEXA-2300SPCS измеряет счетную концентрацию взвешенных частиц в ОГ двигателя в пределах предусмотренного диапазона, который составляет от 0...10000 до 0...50000 частиц/см³ (после внутреннего разбавления). Принцип измерения счетчика взвешенных частиц основан на подсчете конденсированных частиц методом лазерного рассеяния. Отбор проб производился с частичным разбавлением потока ОГ по туннелю. Применяемое оборудование не позволяет производить измерение гранулометрического состава частиц, однако значимость измерения размеров частиц и их структуры является важной задачей и будет учтена в дальнейших исследованиях.

Конструктивное исполнение прибора соответствует требованиям, описанным в стандарте измерения концентрации частиц (Правила ООН № 83, пер. 5 и № 49, пер. 5, дополнение 1). Прибор MEXA-2300SPCS имеет в своем составе блок удаления летучих частиц, который состоит из первичного разбавителя, вторичного разбавителя, испарительной трубки, детектора (счетчика конденсированных частиц), контроллера потока проб, а также имеет внешний разбавительный блок непосредственного отбора проб.

Определение регулировочных характеристик

Режимы испытаний двигателя

Определение регулировочных характеристик двигателя проводились в диапазоне частот вращения двигателя от 1000...5000 мин⁻¹, при крутящем моменте двигателя от 100...800 Нм, более подробно режимы работы двигателя представлены на рисунке 3.

Основными параметрами регулирования были УОВТ и давление впрыскивания топлива. УОВТ менялся в диапазоне с 240 до 360 град. п.к.в. до ВМТ с шагом в 20 град. п.к.в. в зависимости от режима работы двигателя. На основе ранее проведенных исследований методов снижения выбросов

взвешенных частиц, было определено, что с повышением давления впрыскивания топлива снижается выбросы взвешенных частиц [4]. Таким образом, давление впрыскивания топлива повышалось до максимально допустимого значения 25 МПа. Все полученные результаты регулировочных испытаний по УОВТ и давлению впрыскивания топлива сравнивались с базовыми параметрами работы двигателя.

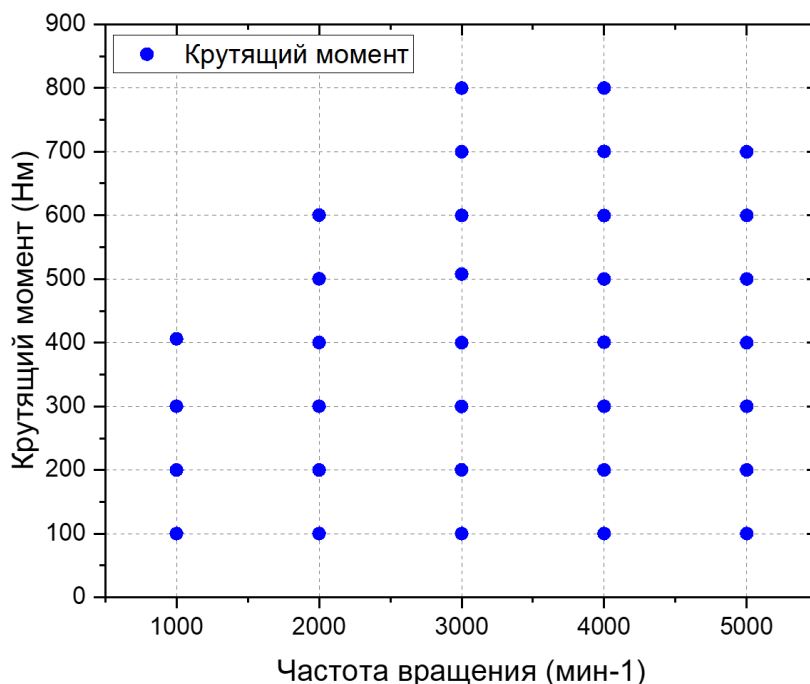


Рис. 3. Режимы работы двигателя

На рисунке 4 представлена многопараметровая характеристика счетной концентрации взвешенных частиц. По результатам видно, что с помощью оптимизации УОВТ и повышения давления впрыскивания до 25 МПа удалось снизить выбросы взвешенных частиц (по уровню счетной концентрации) при низком крутящем моменте в 92 раза, и в значительной степени на остальных режимах работы двигателя. Снижение выбросов взвешенных частиц объясняется двумя факторами. Во-первых, повышение давления впрыскивания уменьшает размер капель топлива, что приводит к более быстрому испарению и образованию гомогенной ТВС в цилиндре двигателя. Во-вторых, при работе двигателя на оптимальных углах начала впрыскивания топлива, обеспечивается более полное испарение топлива и

образование гомогенной ТВС к моменту начала сгорания. Выше представленные факторы оказывают сильное влияние на образование и выбросы взвешенных частиц [5,8].

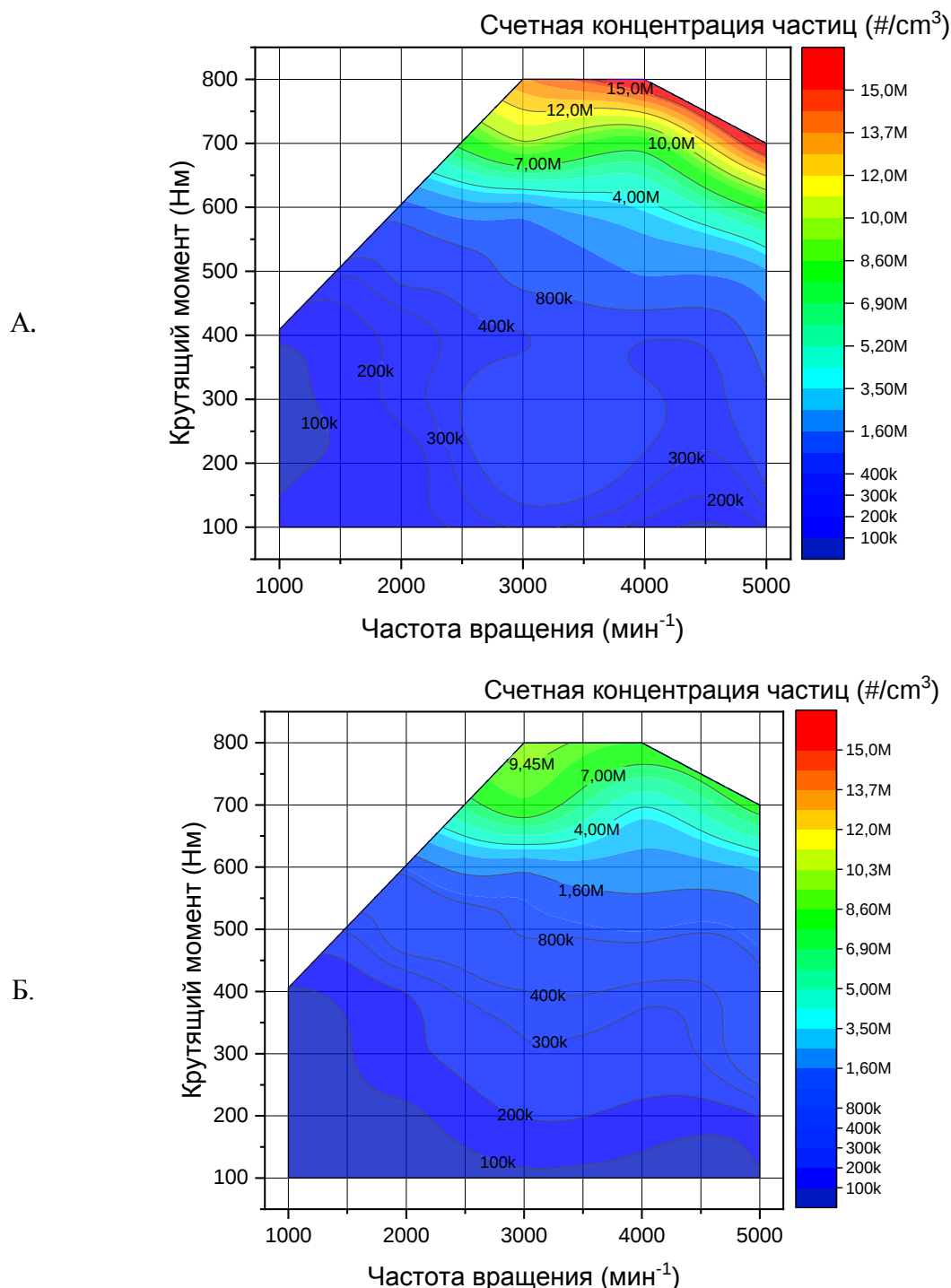


Рис. 4. Многопараметровая характеристика счетной концентрации взвешенных частиц двигателя 8CH8,8/9,0:

А. При базовых значениях калибровок УОВТ и давления впрыскивания топлива;

Б. При оптимальных значениях УОВТ и давления впрыскивания топлива

Помимо счетной концентрации взвешенных частиц, также были проведены измерения остальных нормируемых вредных выбросов. Оптимизация УОВТ и повышения давления впрыскивания до 25 МПа, незначительно влияет на процессы образования оксидов азота и оксидов углерода. Эти выбросы изменяются в пределах $\pm 5\%$ от базовых значений [9, 10].

Однако оптимизация УОВТ и повышение давления впрыскивания, оказали влияние на процессы образования углеводородов. На частотах вращения выше 3000 мин⁻¹ и при крутящем моменте выше 500 Нм было отмечено снижение выбросов углеводородов на 33%. Также прослеживается зависимость от крутящего момента, чем выше крутящий момент, тем в большей степени снижаются выбросы углеводородов. Объясняются полученные результаты теми же факторами что и выбросы взвешенных частиц [11, 12].

Также, работа двигателя на оптимальных УОВТ и давления впрыскивания в 25 МПа оказала влияние на удельный эффективный расход топлива. На частотах вращения до 4000 мин⁻¹ и при низком крутящем моменте до 200 Нм наблюдалось снижение удельного эффективного расхода топлива до 17%, но на других режимах изменяется в пределах $\pm 3\%$ от базовых значений. Снижение удельного эффективного расхода топлива, объясняется улучшением рабочего процесса за счет более равномерного распределения по КС и полного сгорания ТВС, что подтверждается значительным снижением выбросов взвешенных частиц на данных режимах работы двигателя. Результаты изменения эффективного удельного расхода топлива в % приведены на рисунке 5.

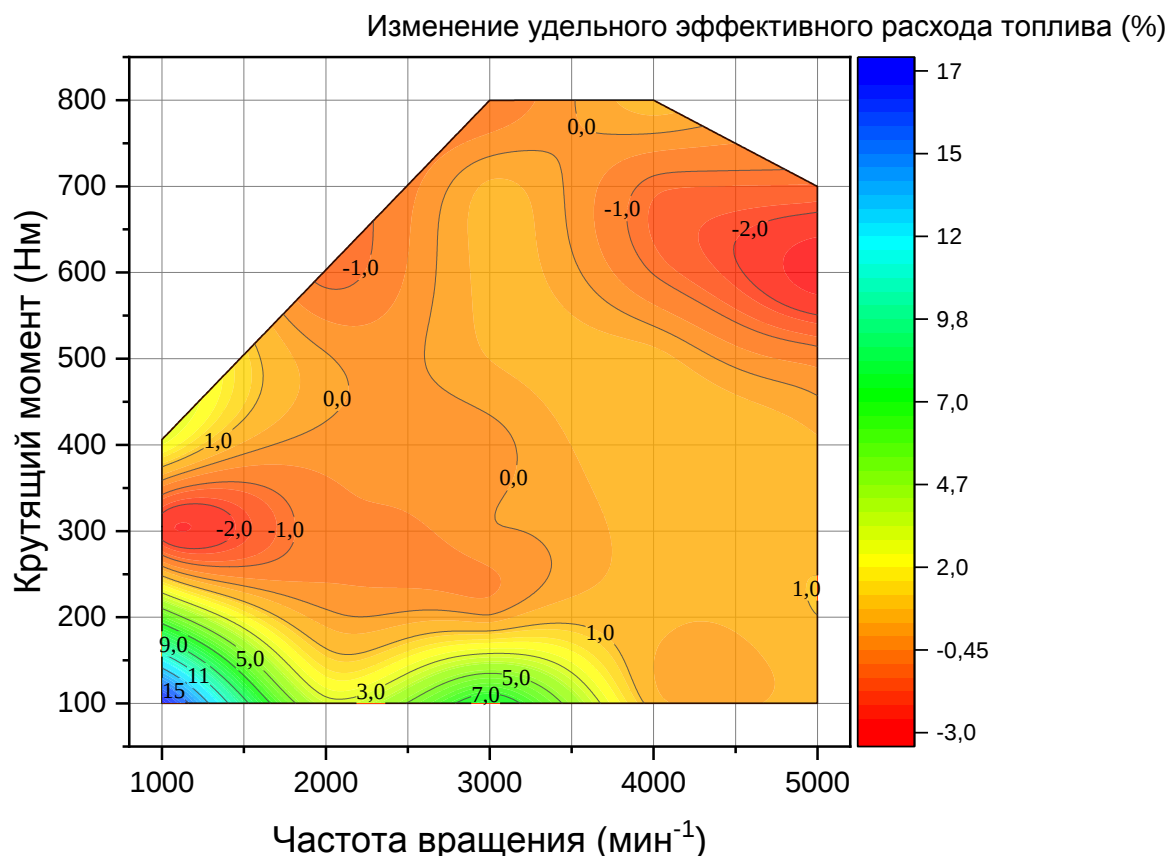
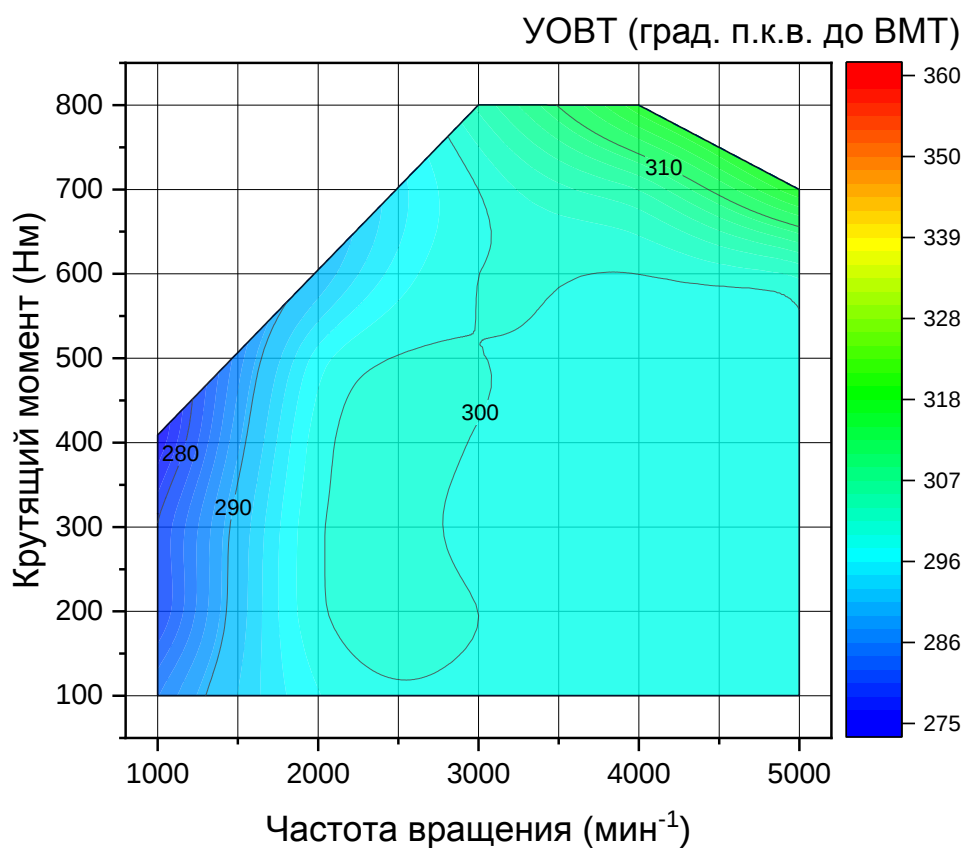


Рис. 5. Многопараметровая характеристика изменения удельного эффективного расхода топлива в % при оптимизации УОВТ и повышения давления впрыскивания до 25 МПа (отрицательные значения соответствуют повышению удельного эффективного расхода топлива, а положительные значения соответствуют снижению удельного эффективного расхода топлива)

Одним из результатов оптимизации стало определение оптимальных значений УОВТ. На рисунке 6 представлены результаты базовых значений УОВТ и оптимальных УОВТ. Как видно по результатам, представленным на рисунке 6, значения оптимальных УОВТ зависят от частоты вращения и крутящего момента двигателя.

А.



Б.

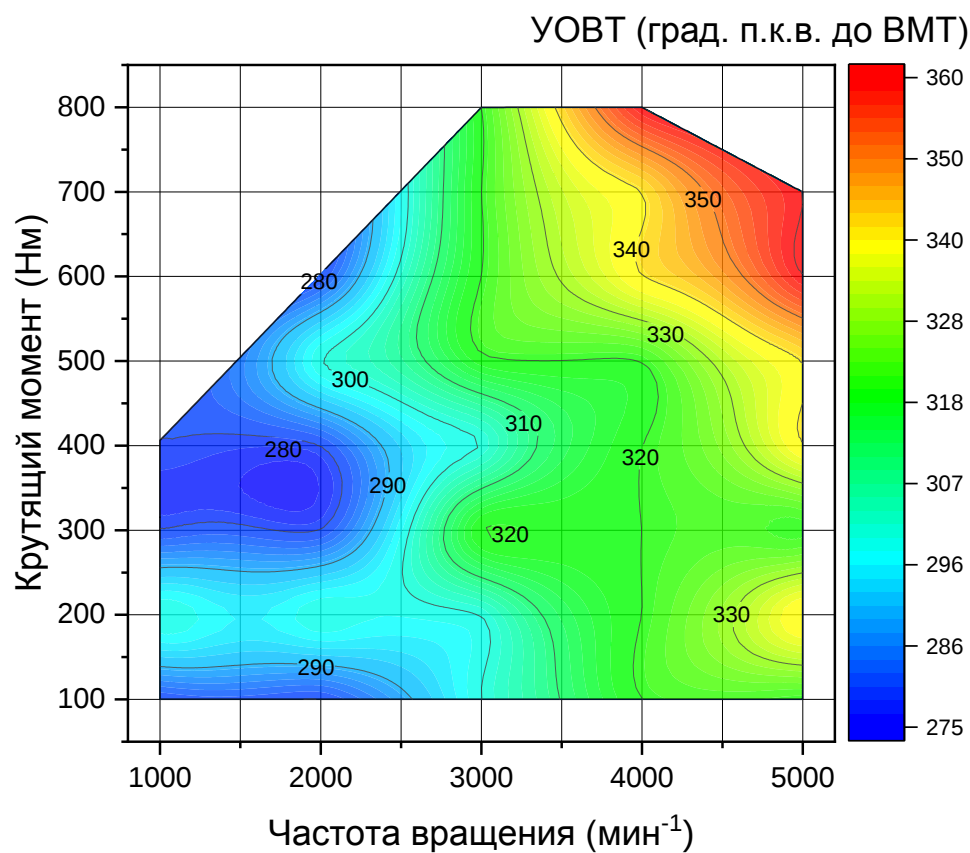


Рис. 6. Многопараметровая характеристика УОВТ двигателя 8ЧН8,8/9,0:
А. Базовые значения УОВТ; Б. Оптимальные значения УОВТ

Выводы

В данной работе проведены исследования бензинового ДВС с непосредственным впрыскиванием топлива и турбонаддувом для оценки возможности снижения нормируемых вредных выбросов путем регулирования параметров подачи топлива. Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

При оптимизации УОВТ и повышении давления до 25 МПа, удалось снизить выбросы взвешенных частиц во всем диапазоне работы двигателя, по отношению к базовым значениям. Максимальное снижение выбросов взвешенных частиц в 92 раза наблюдалось на частоте вращения двигателя 1000 мин⁻¹ и крутящем моменте 100 Нм, а минимальное снижение на 15,3% получилось при частоте вращения двигателя 3000 мин⁻¹ и крутящем моменте 600 Нм.

Выбросы оксидов азота и оксида углерода, незначительно зависят от оптимизации УОВТ и повышения давления впрыскивания топлива и изменялись в пределах $\pm 5\%$ от базовых значений.

Оптимизация УОВТ и повышение давления впрыскивания топлива до 25 МПа, повлияли на выбросы углеводородов. На частотах вращения выше 3000 мин⁻¹ и крутящем моменте выше 500 Нм наблюдалось снижение выбросов углеводородов до 33%. Также прослеживается зависимость от крутящего момента двигателя, чем выше крутящий момент, тем в большей степени снижаются выбросы углеводородов.

Оптимизация УОВТ и повышение давления впрыскивания повлияли на удельный эффективный расход топлива. Было выявлено снижение на 17% удельного эффективного расхода топлива при низком крутящем моменте двигателя до 200 Нм и частоте вращения до 4000 мин⁻¹.

Список источников

1. Правила ООН №83 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении выбросов загрязняющих веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей.
2. Bertsch, M. "Experimental Investigations on Particle Number Emissions from GDI Engines," Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, 2017, doi:10.5445/IR/1000063994.
3. Wiese, W., Kuffèrath, A., Storch, A., and Rogler, P., "Requirements for Multi-Hole Injectors to Meet Future Emission Standards in Direct-Injection Gasoline Engines [in German]," 2nd International Engine Congress, 2015, 63–80, ISBN: 978-3-658-08861-3.
4. Гонтюрев, А.В. Экспериментальное исследование методов снижения счётной концентрации дисперсных частиц в отработавших газах наддувных бензиновых двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива / А.В. Гонтюрев, Н.С. Зуев // Труды НАМИ. – 2021. – № 4(287). – С. 31-40. – DOI 10.51187/0135-3152-2021-4-31-40.
5. Choi K, Kim J, Ko A, Myung C-L, Park S, Lee Y, et al. Evaluation of time-resolved nano-particle and THC emissions of wall-guided GDI engine. SAE paper no.2011-28-0022. 2011.
6. Dageförde, H. «Untersuchung innermotorischer Einflussgrößen auf die Partikelemission eines Ottomotors mit Direkteinspritzung», Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, 2015, ISBN:978-3-8325-4054-8
7. Matousek T, Dageförde H, Bertsch M. Influence of injection pressures up to 300 bar on particle emissions in a GDI-engine. In: 17th ETH-conference on combustion generated nanoparticles; 2013.
8. Piock, W.F., Berndorfer, A., Hoffmann, G., Salemi, P. et al., "Strategies Towards Meeting Future Particulate Matter Emission Requirements in Homogeneous Gasoline Direct Injection Engines," SAE Int. J. Engines 4, no. (1) 2011: 1455–1468, doi:10.4271/2011-01-1212.
9. Горбунов, В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев. – М.: Изд. РУДН, 1998.
10. Subramanian, K., Shukla, S., Athwe, M., Babu, M. et al., "Study of Flame Characteristics of a Spark Ignition Engine for Gasoline Fuel", SAE Technical Paper 2009-28-0028, 2009, doi:10.4271/2009-28-0028.
11. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1981.
12. Warnatz, J., Maas, U., and Dibble, R.W., Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, 4th ed., (Berlin/Heidelberg [u.a.]: Springer, 2006), ISBN:3-540-25992-9.

References

1. Pravila OON №83 Yedinoobraznyye predpisaniya, kasayushchiyesya ofitsial'nogo utverzhdeniya transportnykh sredstv v otnoshenii vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v zavisimosti ot topliva, neobkhodimogo dlya dvigateley (UN Rules No. 83 Uniform requirements regarding the official approval of vehicles regarding the emissions of pollutants, depending on the fuel necessary for the engines).
2. Bertsch, M., "Experimental Investigations on Particle Number Emissions from GDI Engines," Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, 2017, doi:10.5445/IR/1000063994.
3. Wiese, W., Kufferath, A., Storch, A., and Rogler, P., "Requirements for Multi-Hole Injectors to Meet Future Emission Standards in Direct-Injection Gasoline Engines [in German]," 2nd International Engine Congress, 2015, 63–80, ISBN:978-3-658-08861-3.
4. Gontyurev A.V., Zuev N.S. *Trudy NAMI*, 2021, no. 4 (287), pp. 31–40.
5. Choi K, Kim J, Ko A, Myung C-L, Park S, Lee Y, et al. Evaluation of time-resolved nano-particle and THC emissions of wall-guided GDI engine. SAE paper no.2011-28-0022. 2011.
6. Dageförde, H., "Untersuchung innermotorischer Einflussgrößen auf die Partikelemission eines Ottomotors mit Direkteinspritzung," Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, 2015, ISBN:978-3-8325-4054-8.
7. Matousek T, DagefCorde H, Bertsch M. Influence of injection pressures up to 300 bar on particle emissions in a GDI-engine. In: 17th ETH-conference on combustion generated nanoparticles; 2013.
8. Piock, W.F., Berndorfer, A., Hoffmann, G., Salemi, P. et al., "Strategies Towards Meeting Future Particulate Matter Emission Requirements in Homogeneous Gasoline Direct Injection Engines," SAE Int. J. Engines 4, no. (1) 2011: 1455–1468, doi:10.4271/2011-01-1212.
9. Gorbunov V.V., Patrakhaltsev N.N. *Toksichnost' dvigateley vnutrennego sgoraniya* (The toxicity of internal combustion engines), Moscow, Izd. RUDN, 1998.
10. Subramanian, K., Shukla, S., Athwe, M., Babu, M. et al., "Study of Flame Characteristics of a Spark Ignition Engine for Gasoline Fuel," SAE Technical Paper 2009-28-0028, 2009, doi:10.4271/2009-28-0028.
11. Zvonov V.A. *Toksichnost' dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Toxicity of internal combustion engines), Moscow, Mashinostroyeniye, 1981.
12. Warnatz, J., Maas, U., and Dibble, R.W., *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*, 4th ed., (Berlin/Heidelberg [u.a.]: Springer, 2006), ISBN:3-540-25992-9.

Рецензент: А.Л. Яковенко, канд. техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Козлов Андрей Викторович, д-р техн. наук, начальник управления,
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

Гонтюрев Александр Васильевич, аспирант, инженер-конструктор 2 кат.,
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

Information about the authors

Kozlov Andrey V., Dr. Sc., Head of Department, FSUE "NAMI".

Gontyurev Alexander V., postgraduate, design engineer of the 2nd category, FSUE "NAMI".

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Статья поступила в редакцию 24.04.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 30.05.2023.

The article was submitted 24.04.2023; approved after reviewing 11.05.2023; accepted for publication 30.05.2023.