

ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ ОДНОГО ТИПОРАЗМЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГРЕССИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

В.Н. Бондарь, А.А. Малозёмов, А.В. Копеин, В.В. Герцев

TOXICITY ASSESSMENT OF THE EXHAUST GASES OF THE EQUAL DIMENSION-TYPE DIESEL ENGINES USING REGRESSION RELATIONSHIP

V.N. Bondar, A.A. Malozemov, A.V. Kopein, V.V. Gertsev

Приводятся результаты регрессионного анализа результатов экспериментального определения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей производства ОАО «ПО Алтайский моторный завод» (АМЗ) одного типоразмерного ряда. Сформулированы рекомендации по использованию регрессионных зависимостей для расчетной оценки выбросов оксидов азота.

Ключевые слова: дизель, типоразмерный ряд, испытания, токсичность отработавших газов, оксиды азота, линейная регрессия.

The results of the regression analysis of experimental determination of hazardous emissions with the exhaust gases of the diesel engines of equal dimension-type produced by the open joint stock company "Production Enterprise Altai Motor Plant" (AMP) (OAO "Proizvodstvennoe Obedinenie Altaisky Motorny Zavod" (AMZ) are considered. Recommendations for use of the regression relationship for estimation of the nitric oxides emissions are defined.

Keywords: diesel engine, dimension-type, testing, exhaust toxicity, nitric oxides, linear regression.

Введение. Одной из актуальных проблем современного двигателестроения является снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей различных типов. В связи с этим, перед заводами-изготовителями встает проблема доводки выпускаемых дизелей по параметрам токсичности. Для этого необходимы расчетные методики, позволяющие оценить влияние конструктивных изменений на выбросы вредных веществ с отработавшими газами. В настоящее время такие методики разработаны и реализованные в виде программ, наиболее известными из которых являются зарубежные «GT-Power» фирмы «Gamma Technologies», AVL-Boost, Ricardo Wave и разработка МГТУ им. Баумана - «Дизель-РК». Кроме того, образование токсичных веществ можно оценить с помощью некоторых универсальных программных пакетов для расчета газовой динамики, например «Star-CD» фирмы Adapco, AVL-Fire, Fluent, KIVA. Однако, высокая стоимость программ, сложность и трудоемкость расчетов мешают их широкому распространению. Существует потребность в простых и быстрых методах расчета, которые позволяют на основании имеющихся экспериментальных данных оценить влияние различных факторов на характеристики токсичности дизелей одного типоразмерного ряда.

1. Линейная однопараметровая регрессия. Авторами выполнен анализ возможности использования линейных регрессионных зависимостей, полученных обработкой результатов испытаний дизелей, для оценки влияния различных факторов (в первую очередь частоты вращения коленчатого вала, цикловой подаче топлива и степени наддува) на выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Для этого проведены испытания пяти различных дизелей производства АМЗ по методикам ГОСТ 7.2.2.05 и ГОСТ Р 41.96-2005 (методика ГОСТ Р 41.96-2005 отличается только количеством экспериментальных точек и коэффициентами весомости). С целью распространения результатов на весь типоразмерный ряд дизелей АМЗ размерностью 13/14, в качестве объектов испытаний выбраны типичные представители ряда: 4- и 6-цилиндровые дизели с надду-

вом и без наддува и поставленная на производство в 2008 году высокофорсированная модификация Д-4037. Основные технические характеристики двигателей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики испытанных дизелей АМЗ

Параметр	Модель двигателя				
	А-41СИ	А-01МСИ	Д-442ВСИ	Д-461	Д-3047К
Число цилиндров	4	6	4	6	4
Номинальная мощность, кВт	69,0	99,0	116,2	161,7	183,8
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	1750	1700	1850	2000	2000
Наличие газотурбинного наддува	Нет	Нет	Есть	Есть	Есть

Испытания подтвердили соответствие дизелей требованиям нормативных документов. Для выявления влияния основных параметров, характеризующих режим работы двигателей, на характеристики токсичности проведена статистическая обработка экспериментальных данных. Первоначально был выполнен регрессионный анализ (линейная однопараметровая регрессия) влияния на концентрацию вредных веществ в отработавших газах частоты вращения, крутящего момента, часового расхода топлива и воздуха. Среднее квадратичное отклонение между экспериментальными данными и расчетом удельных выбросов оксидов азота (NO_x) в зависимости от крутящего момента составило R²=0,749, для оксида углерода II (CO) R²=0,011, для углеводородов (CH) R²=0,008, что проиллюстрировано рис. 1.

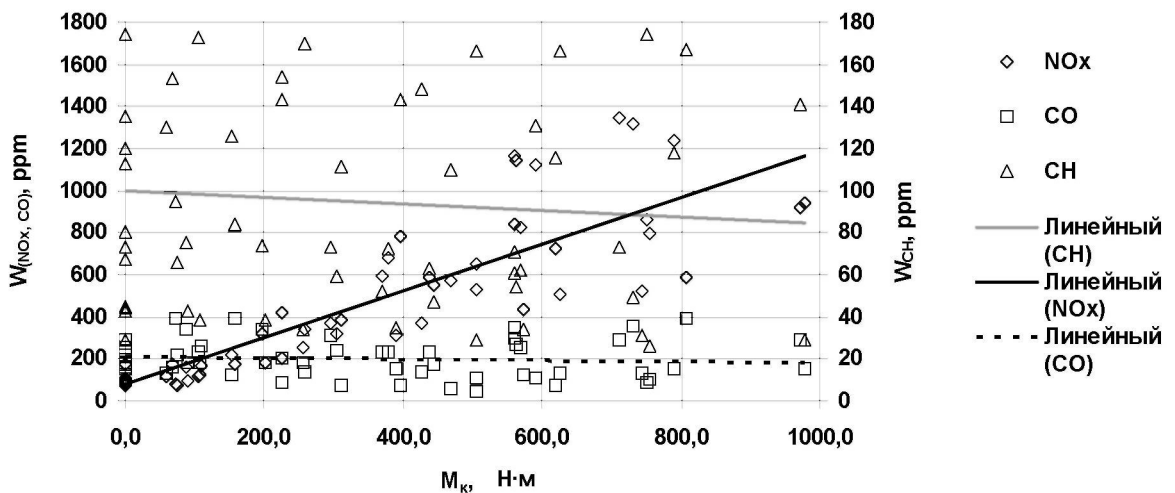


Рис. 1. Регрессионный анализ результатов испытаний дизелей АМЗ (линейная однопараметровая регрессия)

Аналогичный расчет, выполненный для фактора среднего эффективного давления дал следующие результаты: для NO_x – R²=0,324, для CO – R²=0,144, для CH – R²=0,009. Анализ показал, что корреляция между основными параметрами двигателя и концентрацией вредных веществ выражена очень слабо и однопараметровая регрессионная зависимость не может использоваться для прогнозных расчетов.

2. Линейная многопараметровая регрессия. Был выполнен многопараметровый регрессионный анализ с теми же влияющими факторами (частота вращения, крутящий момент, часовые расходы топлива и воздуха). Для оксидов азота коэффициент парной корреляции расчетных и экспериментальных значений составил 0,952 (рис. 2), для оксида углерода II R²=0,126 (рис. 3), для углеводородов (CH) R²=0,326 (рис. 4).

Регрессионная зависимость имеет вид:

$$W_{NOx} = 0,181n + 2,94M_{кр} - 49,3G_T - 0,45IG_B + 141,62, \quad (1)$$

где W_{NOx} – концентрация оксидов азота, ppm; n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹; M_{кр} – крутящий момент, Нм; G_T – расход топлива, кг/ч; G_B – расход воздуха, кг/ч.

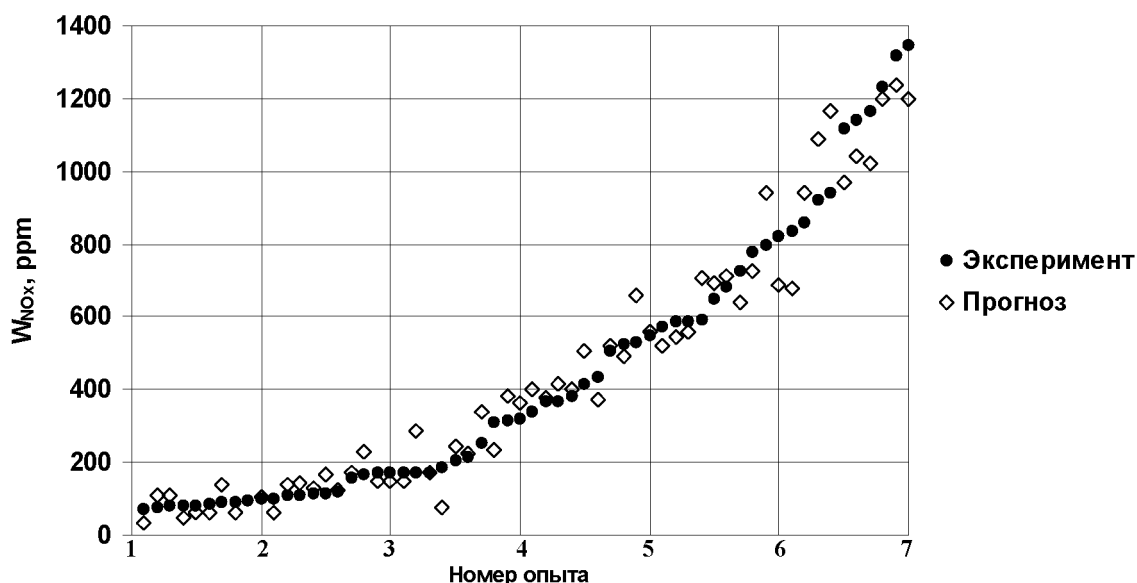


Рис. 2. Удельные выбросы оксидов азота (линейная многопараметровая регрессия), экспериментальные значения упорядочены вдоль оси абсцисс

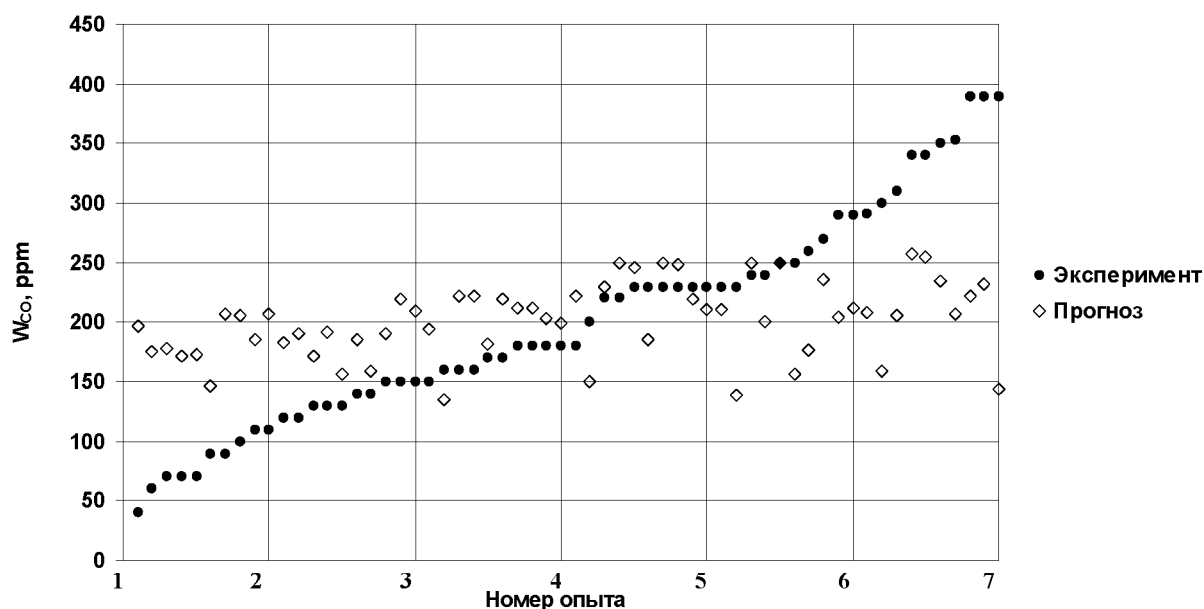


Рис. 3. Удельные выбросы оксида углерода II (линейная многопараметровая регрессия), экспериментальные значения упорядочены вдоль оси абсцисс

Так как уравнение (1) сложно преобразовать к виду, позволяющему вычислять удельные выбросы вредных веществ, приведенные к стандартной размерности г/кВт·ч, была определена многопараметровая регрессионная зависимость вида:

$$G_{\text{NOx}} = -0,115n + 1,758M_{\text{кр}} - 13,7G_T - 0,239G_B + 71,76, \quad (2)$$

где G_{NOx} – массовые выбросы оксидов азота, г/ч (рис. 5).

Среднее квадратичное отклонение между экспериментальными данными и расчетом составило $R^2=0,979$, что выше, чем определенное по формуле (1).

Отметим, что в уравнениях (1) и (2) все влияющие факторы приведены к двигателю в целом, а не к одному цилиндру. По формуле (2), с использованием методик обработки данных, приве-

денных в нормативно-технической документации, можно определить удельные выбросы вредных веществ приведенные к стандартной размерности г/кВт-ч.

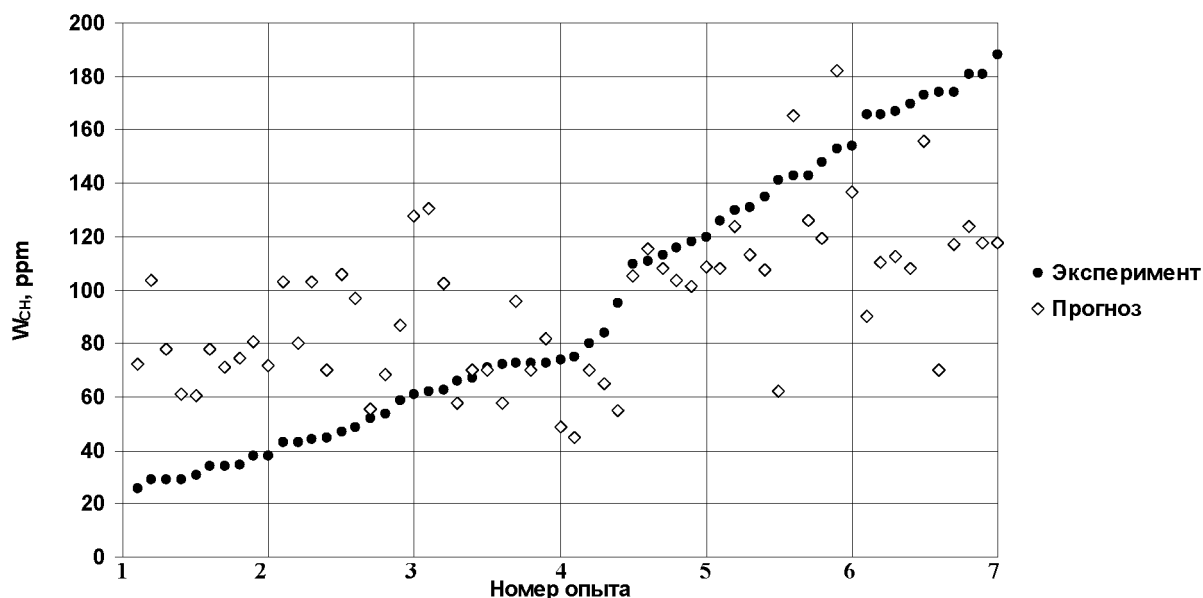


Рис. 4. Удельные выбросы углеводородов (линейная многопараметровая регрессия), экспериментальные значения упорядочены вдоль оси абсцисс

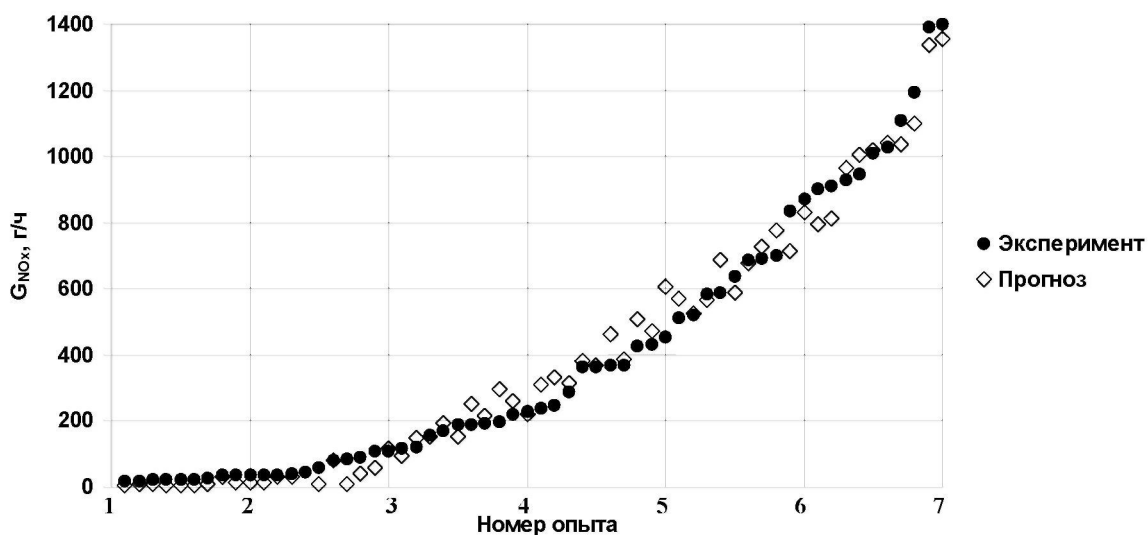


Рис. 5. Удельные выбросы оксидов азота (линейная многопараметровая регрессия), экспериментальные значения упорядочены вдоль оси абсцисс

Высокая сходимость экспериментальных и расчетных значений выбросов оксида азота объясняется особенностями химической кинетики их образования, которая хорошо описывается механизмом Зельдовича и предполагает пропорциональную зависимость от температуры и давления рабочего тела в камере сгорания, которые, в свою очередь, зависят от включенных в уравнение (1) факторов. Выбросы оксида углерода II и углеводородов определяются процессами смесеобразования, зависящими от динамики топливоподачи, геометрии распыливающих отверстий форсунки и камеры сгорания, которые не учитываются при регрессионном анализе.

Заключение. В ходе исследования установлено, что величина удельных выбросов оксидов азота с отработавшими газами дизелей одного типоразмерного ряда может быть с высокой сте-

пенью достоверности аппроксимирована линейной зависимостью от его основных характеристик: частоты вращения, крутящего момента или мощности, удельных или абсолютных значений расхода топлива и воздуха. Эти зависимости могут быть использованы при конструктивной доводки дизелей по параметрам токсичности и определении их допустимых значений согласно требованиям стандартов.

Поступила в редакцию 26 мая 2008 г.

Бондарь Владимир Николаевич. Кандидат технических наук, заслуженный машиностроитель Российской Федерации, заведующий кафедрой «Специальные и дорожно-строительные машины» Южно-Уральского государственного университета, генеральный директор ОАО «НИИ Автотракторной техники». Область научных интересов - испытания дизелей военных машин.

Bondar Vladimir Nikolaevich. Cand.Sc. (Engineering), Honored Mechanical Engineer of the Russian Federation, Head of the Special and Road Building Machines Department of the South Ural State University, Director-General of the open joint stock company «Scientific Research Institute of Automotive Engineering» (ОАО «Nauchno-Issledovatel'sky Institut Avtotraktornoi Tekhniki»). Professional interests: testing of diesel engines of the military machines.

Малозёмов Андрей Адиевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Специальные и дорожно-строительные машины» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания.

Malozemov Andrey Adievich. Cand.Sc. (Engineering), Associate Professor of the Special and Road Building Machines Department of the South Ural State University. Professional interests: operating processes of internal combustion engines.

Копейн Алексей Викторович. Начальник отдела ремонта автомобильной техники ГАБТУ. Область научных интересов - экология двигателей внутреннего сгорания.

Kopein Aleksey Viktorovich. Head of the Automotive Engineering Repairing Department of the General Armoured Office. Professional interests: ecology of internal combustion engines.

Герцев Василий Васильевич. Почетный машиностроитель Российской Федерации, доцент кафедры «Специальные и дорожно-строительные машины» Южно-Уральского государственного университета, заместитель генерального директора ОАО «НИИ Автотракторной техники». Область научных интересов: испытания дизелей военных машин.

Gertsev Vasilij Vasilievich. Honored Mechanical Engineer of the Russian Federation, Associate Professor of the Special and Road Building Machines Department of the South Ural State University, Deputy Director-General of the open joint stock company «Scientific Research Institute of Automotive Engineering» (ОАО «Nauchno-Issledovatel'sky Institut Avtotraktornoi Tekhniki») Professional interests: testing of military machines diesel engines.