ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ УДЕЛЬНЫХ ПРОБЕГОВЫХ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ЛЕГКОВЫМ АВТОТРАНСПОРТОМ

В.С. Марченко;
О.В. Ложкина, кандидат химических наук, доцент;
М.Е. Шкитронов, кандидат педагогических наук, доцент.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Приводятся данные оценки удельных пробеговых выбросов оксидов азота единичных транспортных средств, определенные с использованием аналитического выражения, полученного методом анализа размерностей на основании π-теоремы.

Ключевые слова: выбросы оксидов азота, автотранспорт, локальное загрязнение воздуха, анализ размерностей, π-теорема

USING THE METHOD OF DIMENSIONAL ANALYSIS IN THE EVALUATION OF SPECIFIC PROBEGOVYH NITROGEN OXIDE EMISSIONS BY CAR

V.S. Marchenko; O.V. Lozhkina; M.E. Shkitronov.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The article presents data of evaluation of specific NOx emissions from single vehicles obtained by a mathematical expression derived from the dimensional analysis based on π-theorem.

Keywords: nitrogen oxides emission, motor transport, local air pollution, dimensional analysis, π-theorem

Для оценки локального загрязнения атмосферного воздуха вблизи автодорог оксидами азота и прогнозирования вероятных последствий их воздействия на население используются расчетно-аналитические методы. В основе многих из них лежит разделение автотранспортных средств на группы в зависимости от ряда параметров (вида и массы, экологического класса, типа и объема двигателя, вида и качества топлива и т.п.), определение общего валового выброса каждой выделенной группы автомобилей на участке дороги и суммарного выброса оксидов азота всеми группами автотранспортных средств транспортного потока [1].

Для расчета общего валового выброса оксидов азота определенной группы автомобилей учитывают количество автомобилей группы на данном участке дороги и усредненный вклад единичного автотранспортного средства группы в формирование загрязнения с учетом средней скорости движения потока по участку. Для нахождения среднего вклада единичного транспортного средства определяют фактор эмиссии оксидов азота – усредненный удельный пробеговый выброс.

В работах [2, 3] расчет удельных пробеговых выбросов оксидов азота проводили по упрощенной формуле (1), полученной с учетом следующих теоретических предпосылок: удельный пробеговый выброс оксидов азота будет тем больше, чем выше значение их концентрации в отработавших газах двигателей автотранспортных средств, и тем больше, чем больше объем выбрасываемых отработавших газов [4]. Объем выбрасываемых отработавших газов зависит от рабочего объема двигателя, от скорости вращения коленчатого вала двигателя, и от того, как часто происходит такт выпуска отработавших газов. Количество пробеговых выбросов оксидов азота единичного автомобиля,

приходящееся на участок пути, зависит от времени нахождения автомобиля на этом участке, которое обратно пропорционально скорости движения автомобиля.

$$C_{NO_X(г/км)}=C_{г/м^3} \cdot 0{,}5 \cdot V \cdot 60 \cdot n / W, \quad (1)$$

где $C_{NO_X(г/км)}$ – удельный пробеговый выброс, г/км; $C_{г/м^3}$ – содержание NO_X в отработанных газах, г/м^3; V – объем двигателя, м^3; 0,5 – коэффициент учитывающий часть рабочего объема двигателя, участвующую в формировании выброса за один оборот коленчатого вала двигателя; n – частота вращения коленчатого вала двигателя (об/мин); 60 – коэффициент пересчета минут в часы; W – скорость движения автомобиля, км/ч.

Для исключения возможных субъективных ошибок при выведении аналитического выражения (1) и увеличения достоверности результатов оценки величины удельных пробеговых выбросов оксидов азота был использован метод анализа размерностей. Данный метод позволяет установить связи между физическими величинами, влияющими на изучаемое явление или процесс, на основании π-теоремы.

Возможность применения метода анализа размерностей и π-теоремы для существующих технических систем обоснована в работе [5].

Формулы размерностей показывают, каким образом основные единицы определяют численное значение переменных [6]. В качестве переменных, для которых выбираются первичные единицы измерения, принимают три основные единицы измерения системы SI (кг, м, с). Вторичные величины измеряются косвенно, посредством измерения некоторых первичных величин.

Специальная структура функциональных соотношений устанавливается π-теоремой: всякое соотношение между размерными характеристиками, имеющее физический смысл, представляет собой соотношение между отвлеченными безразмерными комбинациями, которые можно составить из размерных определяемых и определяющих величин, среди которых должны учитываться и размерные физические постоянные, имеющие существенное значение в рассматриваемых явлениях [7].

Для определения функциональной зависимости одной физической величины x от нескольких других $x_1, x_2, \ldots, x_n$ используем вариант π-теоремы:

$$x = f(x_1, x_2, \ldots x_n). \quad (2)$$

В таком случае зависимость (2) эквивалентна связи:

$$\pi=F(\pi_1, \pi_2, \ldots \pi_{n-k}),$$

где $\pi = \dfrac{x}{x_1^{\alpha} \cdot x_2^{\beta} \cdot \ldots \cdot x_k^{\omega}}$,

где k – количество независимых (первичных) размерностей, из которых образованы все размерности других (производных) величин; π_i – безразмерные комбинации, полученные из оставшихся исходных величин x_{k+1}, x_{k+2}, …, x_n делением на выбранные величины в соответствующих степенях:

$$\pi_1 = \frac{x_{k+1}}{x_1^{\alpha} \cdot x_2^{\beta} \cdot \ldots \cdot x_k^{z}},$$

$$\ldots,$$

$$\pi_{n-k} = \frac{x_n}{x_1^{A} \cdot x_2^{B} \cdot \ldots \cdot x_k^{Z}},$$

Определим величины, описывающие процесс формирования удельных пробеговых выбросов оксидов азота и их размерности в системе SI (табл. 1).

Таблица 1. **Величины, описывающие процесс формирования удельных пробеговых выбросов NO_X, и их размерности**

Величина	Обозначение	Единицы измерения внесистемные	Формула размерности в системе SI
Удельный пробеговый выброс NO_X	C_{NO_x}	кг/км	кг · м$^{-1}$
Содержание NO_X в ОГ автомобиля	C_2	ppm	кг · м$^{-3}$
Объем двигателя	V	л	м^3
Количество оборотов коленчатого вала для завершения полного цикла двигателя	N	об.	рад
Угловая скорость вращения коленчатого вала	n	об./сек	рад · с$^{-1}$
Скорость движения автомобиля	W	км/ч	м · с$^{-1}$

В данном случае имеется шесть переменных и четыре единицы измерения. Следовательно, существует два произведения без размерности.

При применении π-теоремы от выбора первичных аргументов с независимыми размерностями формально будут получаться разные выражения. Однако получаемые результаты эквивалентны, и из одного выражения можно получить другое путем перехода к комбинациям безразмерных параметров.

В соответствии с π-теоремой, получим уравнение для π_1:

$$\pi_1 = N^1 \cdot n^{\alpha} \cdot W^{\beta} \cdot C_{NOx}^{\gamma} \cdot C_2^{\delta}.$$

Подставив единицы измерения переменных, получим следующее уравнение:

$$[[\pi]_1] = \text{рад} \cdot (\text{рад} \cdot \text{с}^{-1})^{\alpha} \cdot (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})^{\beta} \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-1})^{\gamma} \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3})^{\delta} = 1.$$

Следовательно, степени $\alpha = -1;\ \ \beta = 1;\ \ \gamma = -\frac{1}{2};\ \ \delta = \frac{1}{2},$ а безразмерный комплекс примет вид:

$$\pi_1 = C_{NO_x}^{-\frac{1}{2}} \cdot C_2^{\frac{1}{2}} \cdot N \cdot n^{-1} \cdot W,$$

Уравнение для π_2 будет иметь следующий вид:

$$\pi_2 = V^1 \cdot n^{\alpha_1} \cdot W^{\beta_1} \cdot C_{NOx}^{\gamma_1} \cdot C_2^{\delta_1}.$$

Подставив единицы измерения переменных, получим следующее уравнение:

$$[[\pi]_2] = \text{м}^3 \cdot (\text{рад} \cdot \text{с}^{-1})^{\alpha_1} \cdot (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})^{\beta_1} \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-1})^{\gamma_1} \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3})^{\delta_1} = 1,$$

Следовательно, степени $\alpha_1 = 0;\ \beta_1 = 0;\ \gamma_1 = -\frac{3}{2};\ \delta_1 = \frac{3}{2},$ а безразмерный комплекс примет вид:

$$\pi_2 = C_{NO_x}^{-\frac{3}{2}} \cdot C_2^{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot n^0 \cdot W^0,$$

$$\pi_2 = C_{NO_x}^{-\frac{3}{2}} \cdot C_2^{\frac{3}{2}} \cdot V,$$

Разделив комплекс π_1 на комплекс π_2, получим вторичный безразмерный комплекс π_3:

$$[[\pi]_3] = \frac{[[\pi]_1]}{[[\pi]_2]} = 1;$$

$$\pi_3 = \frac{C_{NO_x}^{-\frac{3}{2}} \cdot C_2^{\frac{3}{2}} \cdot V}{C_{NO_x}^{-\frac{1}{2}} \cdot C_2^{\frac{1}{2}} \cdot N \cdot n^{-1} \cdot W};$$

$$\pi_3 = C_{NO_x}^{-1} \cdot C_2 \cdot \frac{V \cdot n}{N \cdot W}.$$

Анализ обобщенного безразмерного комплекса π_3 позволяет получить зависимость величины удельного пробегового выброса оксидов азота от их содержания в отработавших газах:

$$C_{NO_x} = C_2 \frac{V \cdot n}{N \cdot W},$$

где C_{NOx} – удельный пробеговый выброс NO_X, кг · м$^{-1}$; C_2 – содержание NO_X в отработавших газах автомобиля, кг · м$^{-3}$; V – объем двигателя, м^3; n – угловая скорость вращения коленчатого вала, рад · с$^{-1}$; N – количество оборотов коленчатого вала для завершения полного цикла двигателя, рад; W – скорость движения автомобиля, м · с$^{-1}$.

Оценка удельных выбросов оксидов азота, выделяющихся с отработавшими газами, проводилась путем измерения их концентраций в составе отработавших газов легковых автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями отечественного и импортного производства, отличающихся по возрасту, типу топлива, трансмиссии, оснащенных и неоснащенных каталитическим нейтрализатором отработавших газов.

Характеристики испытанных автомобилей приведены в табл. 2.

Таблица 2. **Характеристика легковых автомобилей**

Марка автомобиля	Год выпуска	Объем двигателя, см^3	Тип трансмиссии	Тип двигателя	Тип топлива	Экологический класс
ВАЗ 2101	1980 (КРД 2010)	1300	Механ.	Бензиновый карбюраторный	АИ-92	Не определен
ВАЗ 21093	1992	1300	Механ.	Бензиновый карбюраторный	АИ-92	Не определен
Mitsubishi Lancer IV	1991	1468	Автомат.	Бензиновый инжекторный	АИ-95	Евро 1
Skoda Felicia II	1998	1289	Механ.	Бензиновый карбюраторный	АИ-92	Евро 2
Chevrolet Lacetti	2009	1598	Механ.	Бензиновый инжекторный	АИ-92	Евро 3

Марка автомобиля	Год выпуска	Объем двигателя, см^3	Тип трансмиссии	Тип двигателя	Тип топлива	Экологический класс
Huyndai Elantra	2009	1596	Механ.	Бензиновый инжекторный	АИ-95	Евро 3
Volkswagen Tiguan	2009	1984	Автомат.	Бензиновый инжекторный	АИ-95	Евро 3
Nissan Qashqai	2010	1997	Автомат.	Бензиновый инжекторный	АИ-95	Евро 4
Nissan Qashqai +2	2012	1997	Автомат.	Бензиновый инжекторный	АИ-95	Евро 4
Land Rover Discovery 3 (1)	2008	2720	Автомат.	Дизельный	Диз. топливо	Евро 3
Land Rover Discovery 3 (2)	2008	2720	Автомат.	Дизельный	Диз. топливо	Евро 3

Численные значения удельных выбросов NO_x легковыми автомобилями при различных скоростях движения приведены в табл. 3.

Таблица 3. **Значения удельных выбросов NO_x исследованных автомобилей при различных скоростях движения**

Марка транспортного средства		Скорость движения, км/ч											
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
ВАЗ 2101	Выбросы NOx, г/км	1,4057	0,4706	0,6443	0,4602	0,7363	0,8339	0,7023	0,7766	1,1017	1,2584	1,3311	1,6162
ВАЗ 21093		0,2039	0,6377	1,5833	0,6232	1,2396	1,0195	0,9712	1,0113	1,0064	2,0777	2,1450	2,2691
Mitsubishi Lancer IV		0,2440	0,2265	0,2182	0,1946	0,1900	0,1527	0,1514	0,1590	0,1620	0,2801	0,3012	0,3422
Skoda Felicia II		0,3443	0,3030	0,2182	0,1994	0,1586	0,1592	0,2219	0,1599	0,3881	0,6711	0,8817	0,9018
Chevrolet Lacetti		0,0067	0,0073	0,0191	0,0318	0,0385	0,0160	0,0203	0,0732	0,0418	0,0151	0,0227	0,0195
Huyndai Elantra		0,0238	0,0084	0,0074	0,0226	0,0198	0,0111	0,0122	0,0132	0,0062	0,0333	0,0365	0,0511
Volkswagen Tiguan		0,0956	0,0478	0,0266	0,0159	0,0118	0,0150	0,0023	0,0023	0,0022	0,0134	0,0185	0,0506
Nissan Qashqai		0,1026	0,0118	0,0086	0,0160	0,0064	0,0045	0,0137	0,0060	0,0171	0,0363	0,0700	0,0935
Nissan Qashqai +2		0,0353	0,0064	0,0342	0,0059	0,0047	0,0022	0,0107	0,0061	0,0083	0,0192	0,0583	0,0880
Land Rover Discovery 3 (1)		1,0773	0,7273	0,5614	0,4943	0,4538	0,6448	0,9624	0,8257	1,0979	0,8347	0,7682	0,8248
Land Rover Discovery 3 (2)		1,0054	0,7348	0,5624	0,5414	0,4829	0,6201	0,9713	0,9722	0,8072	0,7948	0,7881	0,8335

Полученные с помощью методов анализа размерностей, результаты отличаются высокой степенью научной достоверности, позволят в дальнейшем обобщить исходную информацию и определить усредненный удельный выброс оксидов азота группы легковых автомобилей и коэффициенты изменения удельных выбросов в зависимости от скорости.

Литература

1. Ложкина О.В., Марченко В.С., Сорокина О.В. Постановка и результаты численных исследований возникновения чрезвычайного локального загрязнения воздуха NO_X вблизи

автодорог (на примере Санкт-Петербурга) // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2014. № 4. С. 1–7.

2. Об оценке удельных выбросов загрязняющих атмосферу веществ автомобильным транспортом / В.Н. Ложкин [и др.] // Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера. 2011. № 2. С. 37–44.

3. Ложкин В.Н., Ложкина О.В., Марченко В.С. Бортовой мониторинг удельных выбросов NO_X, выделяющихся с отработавшими газами легкового автотранспорта, на автодорогах Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 5 (34). С. 195–198.

4. Оценка удельных выбросов окислов азота легковым автотранспортом / О.В. Ложкина [и др.] // Двигателестроение. 2012. № 4. С. 35–41.

5. Поляков А.С., Иванов А.Н., Кожевин Д.Ф. Оценка защищенности огнетушителями автоцистерн, транспортирующих нефтепродукты и сжиженные углеводородные газы // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. «Технические средства противодействия терроризму». М.: НТЦ «Информтехника». 2010. Вып. 1–2.

6. Бриджмен П. Анализ размерностей. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 148 с.

7. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1967.