

УДК 542.08

**АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ
ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ****Минитаева А.М.***ГОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова»,
Москва, e-mail: alinaflower@rambler.ru*

Проведен анализ эффективных методов расчета количества продуктов сгорания дизельного топлива в дизелях с использованием условия равновесного состава. С учетом фактора норм выброса вредных веществ выделен наиболее перспективный метод расчета, несмотря на его значительную трудоемкость. На основе предлагаемой методики проведено сравнение токсичности отработавших газов с предельными значениями окислов азота и окислов углерода. Представленная методика позволяет, во-первых, отказаться от результатов опытных испытаний, данные которых, как правило, отражают частный случай работы индивидуального дизеля; во-вторых, рассчитать количество продуктов сгорания для любого типа дизеля, работающего на различных сортах как жидкого, так и газообразного топлива; и, наконец, исследовать влияние параметров теплового процесса дизеля на номенклатуру и количество продуктов сгорания. При выделенной в работе организации процесса сгорания решаются сразу две проблемы: 1) в отработавших газах снижается содержание углеводородов и оксидов азота; 2) улучшается топливная экономичность двигателя внутреннего сгорания ДВС. Реализация предложенной модели позволяет выбрать режим работы двигателя, при котором будет наблюдаться наименьшее количество вредных выбросов.

Ключевые слова: отработавшие газы, токсичность, математические методы, выбросы, окружающая среда

**ANALYSIS MATHEMATICAL METHODS
OF CONTROL INFLUENCE POLLUTING SUBSTANCES ON THE ENVIRONMENT****Minitaeva A.M.***Plehanov Russian University of Economics, Moscow, e-mail: alinaflower@rambler.ru*

An analysis of effective methods of calculating the amount of combustion products of diesel fuel in diesel engines with the terms of the equilibrium composition. Taking into account the factor of the emission standards is stressed the most promising method of calculation, in spite of its considerable complexity. On the basis of the proposed method in comparison with the limit values of emissions of nitrogen oxides and carbon oxides. The presented method allows, first, to abandon the results of pilot testing, data which usually represent a special case of the individual work of a diesel engine; Second, calculate the amount of combustion products for every type of diesel engine operating on different varieties of both liquid and gaseous fuels; and finally to investigate the influence of the thermal parameters of the diesel engine to the range and number of products of combustion. When selected in the organization of the combustion process solved two problems: 1) in the exhaust gases is reduced levels of hydrocarbons and nitrogen oxides; 2) improving fuel economy of internal combustion engine. Implementation of the proposed model allows you to choose the mode of operation of the engine, in which there will be a least amount of harmful emissions.

Keywords: exhaust gases, toxicity, mathematical methods, emissions, environment

Актуальная задача, стоящая перед транспортным комплексом России, – минимизация антропогенного воздействия на живую природу. Постановлением Правительства РФ № 609 от 12.10.2005 г. утвержден специальный технический регламент «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории РФ, вредных (загрязняющих) веществ». Он вводит в действие технические нормативы выбросов на период с 2006 по 2014 г. в целях поэтапного приведения российского транспорта к требованиям ЕЭК ООН [1].

Методики определения норм выбросов вредных веществ на городских автобусных маршрутах позволяют обосновать сумму экологических платежей за ущерб, наносимый окружающей среде. Требования

снижения выбросов оксида углерода CO, углеводородов CH и оксидов азота NO с отработавшими газами (ОГ) автомобилей требуют неординарного подхода для решения этой сложной технической задачи [5]. Все более жесткие требования к токсичности отработавших газов двигателей ставят конструктора перед почти неразрешимой задачей – добиться такого протекания рабочего процесса, при котором выбросы CO, CH, NOx и твердых частиц будут минимальными, а экономичность и мощность двигателя высокими. Невозможность одновременно реализовать противоречивые требования приводит к тому, что основным решением данной проблемы считается установка нейтрализаторов отработавших газов – устройств дорогостоящих и не слишком надежных.

В условиях глобализации экономики наблюдается недостаточная эффективность рыночного механизма применительно к управлению ресурсами общего пользования, такими как вода и воздух. Несмотря на то, что экологическое регулирование является сложной системой инструментов управления, которая включает различные рычаги, стимулы, стандарт и нормативы, большинство известных механизмов неэффективно в силу специфичности области применения объекта исследования [2]. Поэтому актуальными являются исследования по способам регулирования хозяйственной деятельности для улучшения экологического состояния среды.

Проблема адекватности и точности прогноза как в экологических, так и в других науках выдвигается в настоящее время на одно из первых мест. С развитием IT-технологии большое распространение в экологии получают имитационные (портретные) модели [6]. Совершенствование имитации динамики экосистем с целью получения максимально адекватного описания объекта достигается путем более детального воспроизводства в модели их качественного разнообразия, расширения числа описываемых процессов. Это ведет к тому, что имитационные модели насчитывают порой сотни переменных и параметров [3–7]. Поэтому создание указанных дорогостоящих и трудоемких в реализации моделей требует многолетних исследований и создания большого коллектива ученых. Кроме того, реакция таких моделей на изменение тех или иных параметров становится непредсказуемой, а сама модель тем самым практически неуправляемой. Возникает известная ситуация, получившая определенное название [3–5], в которой желание более точно описать экосистему толкает исследователей на увеличение числа учитываемых факторов: чем больше факторов включено в модель, тем труднее с нею работать, судить об ее адекватности; такие модели дают ошибки, являющиеся следствием накопления как чисто вычислительных погрешностей, так и неточностей в экспериментальных измерениях параметров и начальных данных, и эти ошибки могут приводить к катастрофическим неточностям в модельных прогнозах [6].

Приведенный анализ показывает, что в зарубежной литературе много внимания уделено моделированию устойчивых природоохранных соглашений и их решению теоретико-игровыми методами [1–3]. Так

в работе [3] моделировалось международное экологическое соглашение, результатом которого явилось динамически устойчивое (состоятельное во времени) распределение совокупных затрат при условии снижения общего уровня загрязнения. При этом затраты складывались из двух составляющих: выраженный в денежном эквиваленте; экономический ущерб, включающий материальный ущерб, ущерб здоровью граждан и окружающей среде, и затраты на снижение выбросов с максимального уровня до некоторого допустимого. В этой связи задача о возможности существования периодических и хаотических режимов в динамических моделях экосистем имеет важное значение для теории математической экологии, поскольку от решения данной задачи зависят ответы на такие актуальные вопросы, как характер экологических систем под влиянием возрастающего антропогенного воздействия, а также возможность прогнозирования динамики экосистем.

Кроме того, по результатам проведенного анализа научно-технической литературы можно выделить три основные группы факторов, определяющих степень токсичности выбросов – технологические, организационные и инженерные комплексы мероприятий (рисунок). В свою очередь, на рисунке инженерные мероприятия разделим на инженерно-экологические и инженерно-технологические. Указанные мероприятия обуславливают, с одной стороны, влияние объективных причин, определяющих существующий на сегодняшний день уровень экологической технологичности двигателя внутреннего сгорания (ДВС), а с другой – влияние деятельности человека на процесс загрязнения атмосферы [3].

Каждой указанной альтернативе на рисунке отвечает свой набор математических моделей и методов, позволяющих учесть действие данных процедур и оценить результаты указанных мероприятий. Поэтому учитывая различия между методами реализации и методами расчета, тем не менее далее для краткости будем обозначать термином «метод» как метод реализации, так и метод расчета и моделирования.

Организационные методы, не требующие технологических вмешательств и материальных затрат, наряду с инженерными методами, реализация которых предусматривает установку дополнительных устройств защиты воздуха в основные технологические системы автомобиля, позволяют существенно снизить уровень вредных



Классификация методов, снижающих уровень выбросов ДВС

выбросов. Инженерно-технологические методы дают возможность оптимизировать основные технологические характеристики автомобиля и, как следствие, приводят к улучшению их экологических параметров, что, в свою очередь, улучшает непосредственно экологические характеристики, не оказывая существенного влияния на работу двигателя.

На сегодняшний день разработано большое число способов реализации, которым отвечают соответствующие математические модели снижения выбросов загрязняющих веществ. Реализация большинства этих методов требует как значительных материальных, так и производственных затрат. Рассмотрим математическую модель и метод совершенствования процессов смесеобразования. Отметим, что данный метод можно эффективно применять только при установленном потоке смеси. Другой способ относительно требований выбросов вредных веществ, – это методика проведения исследований регулировочных характеристик форкамерного ДВС заключалась в определении содержания CO , CH , NO_x в ОГ и температуры ОГ (t_{H}) после КН в зависимости от суммарного коэффициента избытка воздуха в смеси, поступающей в ДВС при различном расходе H_2 , поступающем в КН. В соответствии с методикой измерения расход H_2 , кг/ч, можно рассчитать по формуле

$$G_{\text{H}_2} = \frac{60 \sum P_{\text{H}_2} V_i p_{\text{H}_2}}{1000 t_{\text{H}}}, \quad (1)$$

где P_{H_2} – плотность H_2 , $P_{\text{H}_2} = 0,089$ г/л.

Идея реализована методом расслоения заряда в цилиндре, то есть методом, при котором в камере сгорания в зоне расположения форкамеры создается зона с обогащенной смесью мощностного состава, а в остальной части камеры – зона с бедной смесью или даже с чистым воздухом. При такой организации процесса сгорания решаются сразу три проблемы: в отработавших газах снижается содержание углеводородов и оксидов азота, улучшается топливная экономичность ДВС [1–4]. По современным представлениям скорость образования NO_x зависит от температуры локальных зон в цилиндре. Если по результатам анализа осциллограмм найдено, что в период от начала сгорания до точки P_{max} сгорела часть цикловой подачи $b_{\text{ц}}$, равная $b_{\text{ц}}^*$, то значения T_{max} , $T_{\text{л.з}}$, $b_{\text{ц}}^*$ определяются из уравнений теплового баланса [1].

$$M_u \cdot \bar{C}_v^m T_{\text{max}} - M_{\text{ц}} \cdot \bar{C}_v^c T_c \equiv b_{\text{ц}}^* H_u; \quad (2)$$

$$M_{\text{л.з}} \cdot \bar{C}_v^m T_{\text{max}} - M_{\text{ц}} \cdot \bar{C}_v^c T_c \equiv b_{\text{ц}}^* H_u, \quad (3)$$

где $M_{\text{л.з}}$ – масса смеси в локальной зоне; $M_{\text{ц}}$ – масса смеси в цилиндре, удельная массовая теплоемкость смеси и свежего заряда.

$$T_{\text{max}} \cong \frac{P_{\text{max}}}{P_c} T_c, \bar{C}_v^m, \bar{C}_v^c. \quad (4)$$

Оценим влияние величины $M_{\text{л.з}}$ на изменение концентрации NO_x на основании реакции образования оксидов азота по цепному механизму: $\text{N}_2 + \text{O} \rightleftharpoons \text{NO} + \text{N} - 316$; $\text{N} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{O} + 316$ кДж/моль и кинетической теории. Кинетическая энергия

удара молекул O и N₂, достаточная для образования NO при температурах локальных зон смеси при сгорании, достигается только частью молекул, которые назовем эффективными. Это следует из закона распределения скоростей молекул Максвелла. Число молекул dN в диапазоне dx составляет

$$dN = \frac{4M}{\sqrt{\pi}} x^2 e^{-x^2} dx,$$

где $x = \frac{c}{v_B}$; $v_B = \sqrt{\frac{2RT_{л.з.}}{\mu}}$; M – число молекул в единице объема; c – скорость молекул. Количество эффективных столкновений в единицу времени Se – пропорционально числу эффективных молекул $N_{эфф}$, числу столкновений в единице объема V_c и произведению концентраций реагирующих компонентов O, (r_o), N₂(r_{N_2}). В результате $\sum e \approx (M_{л.з.}/M_u) \cdot N_{эфф} \cdot r_o \cdot r_{N_2} \cdot V_c$. Результаты расчета $dNOx/dt$ и эксперимента на двигателе 18/22 показали хорошую корреляцию. Чтобы спрямить характеристики $G_2 = f(G_\Sigma)$ серийного форкамерного ДВС, необходимо; значительно уменьшить G_2 при работе ДВС на частичных нагрузках, а при работе ДВС с полностью открытыми дроссельными заслонками, наоборот, увеличить G_2 . А это дело сложное и нежелательное. Что, естественно, приведет к обогащению смеси с суммарным (α_Σ) коэффициентом избытка воздуха в заряде, из-за чего расход топлива и выбросы вредных веществ с отработавшими газами возрастают.

В последние годы широко обсуждается и в значительной степени реализуется возможность замены жидких топлив природным газом. Это сулит значительные преимущества как с экономической точки зрения, так и в плане защиты воздушного бассейна от загрязнений. Послойное смесеобразование, естественно, может применяться и в газовых двигателях. По свойствам

газовых топлив допускается большее обеднение газоздушной смеси в районе свечи и более высокая степень сжатия. С другой стороны, газ при впрыскивании не образует компактной струи, что может затруднить формирование необходимого расщепления заряда. В этом плане представляет интерес анализ возможных путей реализации принципов послойного смесеобразования, отработанных для бензиновых двигателей, применительно к работе на газовом топливе. Подобные процессы описываются системой уравнений Навье – Стокса для вязкой сжимаемой жидкости, дополненной уравнениями неразрывности, энергии и состояния. При этом возможности анализа пространственных нестационарных процессов в цилиндре двигателя сталкиваются с весьма серьезными затруднениями, определяемыми в основном возможностями современных IT-технологий.

Вследствие этого при расчете параметров движения газа в цилиндре двигателя необходимо составить такую схему процесса, которая при соответствующих допущениях позволила бы, пренебрегая несущественными для данного конкретного исследования факторами, достаточно полно охарактеризовать особенности течения и составить упрощенную систему уравнений, более удобную для решения каким-либо численным методом. В основу моделирования положено применение прямых методов расчета на основе уравнений Навье – Стокса, что, как показывает анализ, допустимо для турбулентных течений, характеризуемых большими числами Рейнольдса. Свойства рабочего тела определялись в предположении, что в его состав входят воздух, топливо и продукты сгорания. Для решения уравнений использован метод крупных частиц. Основная идея модифицированного метода крупных частиц состоит в расщеплении по физическим процессам исходной нестационарной системы уравнений Навье – Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu A \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\}; \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu A \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\}; \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u E}{\partial x} + \frac{\partial \rho v E}{\partial y} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu A \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) u + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) v + \mu \frac{\partial}{\partial x} (BJ + u^2) \right\} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu A \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) u + \mu \frac{\partial}{\partial y} (BJ + v^2) \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Важной особенностью численного моделирования реального процесса внутри цилиндра является наличие движущейся границы, соответствующей движению поршня и клапанов. С целью сохранения консервативности расчетной схемы необходимо учитывать изменение параметров, обусловленное перемещением границы. На основе этих принципов был разработан алгоритм расчета подвижной границы для нестационарной задачи с учетом сложной формы поршня и клапанов [7]. Математическая модель и разработанная на ее основе программа были протестированы путем сравнения результатов с уже известными решениями частных задач, а также с данными эксперимента, проведенного на специально созданной модели цилиндра двигателя. Таким образом, добиться расслоения заряда возможно только при правильно выбранной конфигурации днища поршня и головки цилиндров, а также при оптимально подобранных параметрах впрыска топлива.

В современных условиях поиск объективно обоснованного решения проблемы негативного воздействия автотранспорта не менее актуален, чем разработка самих способов снижения выбросов от автотранспорта. Необходимость комплексного учета всего многообразия внешних и внутренних факторов определяет необходимость разработки единого методического подхода к принятию решений по защите атмосферы от вредных выбросов.

Для того чтобы определить нормы выбросов вредных веществ, необходим анализ методов определения количества продуктов сгорания топлива в транспортных двигателях. В основу предлагаемой методики положено сравнение токсичности отработавших газов с предельными значениями окислов азота (e_{NO_x}) и окислов углерода (e_{CO}) [2, 3, 6]. Определение выбросов загрязняющих веществ с отработавшими газами дизелей осуществлялось методом непосредственного анализа проб выбрасываемых в атмосферу газов. Обработка результатов измерений производилась согласно ГОСТ 24585-81, удельные выбросы окислов азота и окиси углерода на единицу мощности (г/кВт·ч) вычислялись по формулам

$$e_{NO_x} = [5,72 \cdot 10^4 C_{NO_x} (G_{air} - 9,74 \cdot 10^{-4} G_f)] / Ne; \quad (6)$$

$$e_{CO} = [3,48 \cdot 10^4 C_{CO} (G_{air} - 9,74 \cdot 10^{-4} G_f)] / Ne, \quad (7)$$

где C_{NO_x} , C_{CO} – соответственно концентрация окислов азота и окиси углерода в отра-

ботавших газах, %; G_{air} – секундный расход воздуха на режиме испытаний, кг/с; G_f – секундный расход топлива на режиме испытаний, г/с; Ne – эффективная мощность двигателя, кВт.

Метод расчета количества продуктов сгорания дизельного топлива в дизелях с использованием условия равновесного состава следует считать наиболее перспективным, несмотря на его значительную трудоемкость. Представленная методика позволяет отказаться от результатов опытных испытаний, данные которых во всех случаях отражают частный случай работы индивидуального дизеля; рассчитать количество продуктов сгорания для любого типа дизеля, работающего на различных сортах как жидкого, так и газообразного топлива; исследовать влияние параметров теплового процесса дизеля на номенклатуру и количество продуктов сгорания [5, 7]. Реализация предложенной модели позволяет выбрать режим работы двигателя, при котором будет наблюдаться наименьшее количество вредных выбросов.

Таким образом, в работе критически проанализированы модели и методы снижения уровня экологической среды и выделены эффективные математические методы, позволяющие оптимизировать процедуры реализации эколого-экономических мероприятий улучшения качества окружающей среды.

Список литературы

1. Аристов Л.И. Дунаев А.И. Керимов О.М. Киселев Л.Н. Певгов В.Г. Семенов А.В. Хмельщиков М.В. Спектральный способ оперативного определения малых концентраций азота и кислорода в газовых смесях с гелием и устройство для его осуществления // Экологические системы и приборы. – 2005. – № 6. – С. 60–62.
2. Гордовский Д. Э., Картвелишвили В. М. Модели оценки эффективности обеспечения жизнеспособности организационных структур // Наука и практика. – 2015. – № 2. – С. 13–29.
3. Козлов А.В. Экологическая модель ДВС с искровым зажиганием // Автомобильная промышленность. – 2003. – № 4. – С. 12–15.
4. Кузнецов И.В. Улучшение экологических показателей форкамерного ДВС с каталитическим нейтрализатором при относительно холодных отработавших газах // Экология и промышленность. – 2005. – октябрь № 6. – С. 40–42.
5. Козловская Н.В. Динамическая устойчивость PMS-вектора в задаче сокращения вредных выбросов // Процессы управления и устойчивость, труды XXI международной конференции аспирантов и студентов. – СПб., 2010. – С. 612–617.
6. Сюзев В.В. Обобщенные функции и преобразования Харли в системах счисления с постоянным основанием // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2014. – № 2. – С. 63–79.
7. Сковородников Е.И., Анисимов А.С., Тарута М.В., Гришина Ю.Б., Минитаева А.М. Разработка метода экологического мониторинга тепловозных двигателей // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 1. – С. 76–84.