

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Минитаева Алина Мажитовна

кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий РЭУ им. Г. В. Плеханова.

Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», 117997, Москва, Стремянный пер., д. 36.

E-mail: alinaflower@rambler.ru

В статье проведен анализ эффективных методов расчета количества продуктов сгорания дизельного топлива. Выделен наиболее перспективный метод, несмотря на его значительную трудоемкость. 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; в-третьих, исследовать влияние параметров теплового процесса дизеля на номенклатуру и количество продуктов сгорания. Реализация предложенной модели позволит выбрать режим работы двигателя, при котором будет наблюдаться наименьшее количество вредных выбросов.

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

ANALYZING MATHEMATIC METHODS OF CONTROL OVER POLLUTING MATTERS IMPACT ON THE ENVIRONMENT

Minitaeva, Alina M.

PhD, Assistant Professor of the Department for Information Technologies of the PRUE.

Address: Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 117997, Russian Federation.

E-mail: alinaflower@rambler.ru

The article provides the analysis of effective methods to calculate the amount of products of diesel fuel burning. The most promising method was shown, in spite of its labour-consuming nature. The given methodology can allow us: firstly, to reject the results of tests, as their results show only a special case of an individual diesel work; secondly, to calculate the amount of products of burning for any type of diesel and thirdly, to investigate the impact of diesel thermal process parameters on the product range and amount of products of burning.

Application of the model could provide an opportunity to choose the condition of engine work, which will exhaust the minimum amount of harmful blow-outs.

Key words: exhaust gases, toxic nature, mathematic methods, blow-outs, environment.

Перед транспортным комплексом России стоит актуальная задача – минимизация антропогенного воздействия на живую природу. Постановлением Правительства Российской Федерации от 12 октября 2005 г. № 609 утверждён специальный технический регламент «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ». Им введены в действие технические нормативы выбросов на период с 2006 по 2014 г. в целях поэтапного приведения российского транспорта к требованиям ЕЭК ООН [1; 5].

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 оксида азота (NO) с отработавшими газами (ОГ) автомобилей требуют неординарного подхода для решения этой сложной технической задачи [7]. 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, NO_x 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, таким как вода и воздух. Не-

смотря на то, что экологическое регулирование является сложной системой инструментов управления, которая включает различные рычаги, стимулы, стандарт и нормативы, большинство известных механизмов неэффективны 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-технологий 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 [1; 2; 6]. Поэтому создание указанных дорогостоящих и трудоемких в реализации моделей требует многолетних исследований.

Кроме того, реакция таких моделей на изменение тех или иных параметров становится непредсказуемой, а сама модель – практически неуправляемой. Возникает известная ситуация [3; 4; 7], в которой желание более точно описать экосистему толкает исследователей на увеличение числа учитываемых факторов. Чем больше факторов включено в модель, тем труднее с ней работать, судить об ее адекватности. Такие модели дают ошибки, являющиеся следствием накопления как чисто вычислительных погрешностей, так и неточностей в экспериментальных измерениях па-

раметров и начальных данных. Эти ошибки могут приводить к катастрофическим неточностям в модельных прогнозах [6].

В зарубежной литературе много внимания уделено моделированию устойчивых природоохранных соглашений и их решению теоретико-игровыми методами [1-3]. Так, Н. В. Козловская моделировала международное экологическое соглашение, результатом которого стало динамически устойчивое (состоятельное во времени) распределение совокупных затрат при условии снижения общего уровня загрязнения [3]. При этом затраты складывались из двух составляющих: выраженных 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 возможность существования периодических и хаотических режимов в динамических моделях экосистем имеет большое значение для

теории математической экологии, поскольку от нее зависят ответы на такие актуальные вопросы, как характер экологических систем под влиянием возрастающего антропогенного воздействия, а также прогноз динамики экосистем.

В результате проведенного анализа научно-технической литературы можно выделить три основные группы факторов, определяющих степень токсичности выбросов: технологические, организационные и инженерные (рисунок). В свою очередь инженерные мероприятия можно разделить 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].

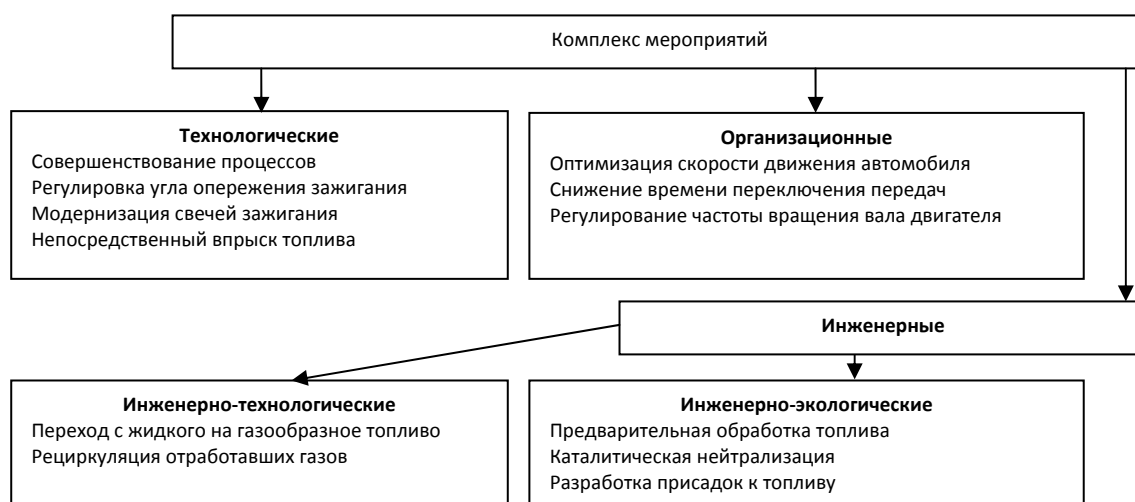


Рис. Классификация методов, снижающих уровень выбросов ДВС

Каждой указанной альтернативе на рисунке отвечает свой набор математических моделей и методов, позволяющих учесть действие данных процедур и оценить результаты указанных мероприятий.

Организационные методы, не требующие технологических вмешательств и ма-

териальных затрат, наряду с инженерными методами, реализация которых предусматривает установку дополнительных устройств защиты воздуха в основные технологические системы автомобиля, позволяют существенно снизить уровень вредных выбросов. Инженерно-технологичес-

кие методы дают возможность оптимизировать основные технологические характеристики автомобиля и, как следствие, приводят к улучшению их экологических параметров, что в свою очередь улучшает 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 из них требует как материальных, так и производственных затрат.

Рассмотрим математическую модель и метод совершенствования процессов смесеобразования. Данный метод можно эффективно применять только при установленном потоке смеси. Методика проведения исследований регулировочных характеристик форкамерного ДВС заключалась в определении содержания CO, CH, NO в отработавших газах (ОГ) и температуры отработавших газов после каталитической нейтрализации (КН) в зависимости от суммарного коэффициента избытка воздуха в смеси, поступающей в ДВС при различном расходе H_2 , поступающего в КН. В соответствии с методикой измерения расход H_2 (кг/ч) можно рассчитать по формуле

$$G_{H_2} = 60 \sum P_{H_2} V_{и} p_{H_2} / 1000 t_{и},$$

где P_{H_2} - плотность H_2 ;

$V_{и}$ - измерительная емкость;

$p_{H_2} = 0,089$ г/л;

$t_{и}$ - время измерения расхода водорода.

Идея реализована методом расслоения заряда в цилиндре, т. е. 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 топ-

ливная экономичность ДВС [1-3]. 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 $b_{ц}$, равная $b_{ц}^*$, то значения T_{max} , $T_{л.з}$, $b_{ц}^*$ определяются из уравнений теплового баланса [1]:

$$M_{и} \cdot \bar{C}_v^m T_{max} - M_{ц} \cdot \bar{C}_v^3 T_c \equiv b_{ц}^* H_{и},$$

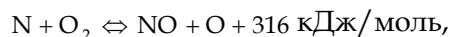
$$M_{л.з} \cdot \bar{C}_v^m T_{max} - M_{ц} \cdot \bar{C}_v^3 T_c \equiv b_{ц}^* H_{и},$$

где $M_{л.з}$ - масса смеси в локальной зоне;

$M_{ц}$ - масса смеси в цилиндре, удельная массовая теплоемкость смеси и свежего заряда.

$$T_{max} \cong \frac{P_{max}}{P_c} T_c \bar{C}_v^m \bar{C}_v^3.$$

Оценим влияние величины $M_{л.з}$ на изменение концентрации NO_x на основании реакции образования оксидов азота по цепному механизму:



а также на основании кинетической теории.

Кинетическая энергия удара молекул O и N_2 , 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 M - число молекул в единице объема;

$$x = c/v_B, v_B = \sqrt{\frac{2RT_{л.з}}{\mu}};$$

c - скорость молекул.

Количество эффективных столкновений в единицу времени Σe пропорционально числу эффективных молекул $N_{эфф}$, числу столкновений в единице объема V_e и произведению концентраций реагирующих компонентов O, (r_o), $N_2(r_{N_2})$. В результате $\Sigma e \approx (M_{л.з}/M_{ц}) \cdot N_{эфф} \cdot r_o \cdot r_{N_2} \cdot V_e$. Результаты расчета dNO_x/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, приводит к обогащению смеси с суммарным (α_Σ) коэффициентом избытка воздуха в заряде, в результате 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 большие преимущества как с экономической точки зрения, так и в плане защиты воздушного бассейна от загрязнений. Послойное смешение, естественно, может применяться и в газовых двигателях. По свойствам газовых топлив допускается большее обеднение газозооной смеси в районе свечи и более высокая степень сжатия. С другой стороны, газ при впрыскивании не образует компактной струи, что может затруднить формирование необходимого расслоения заряда. В этом плане представляет интерес анализ возможных путей реализации принципов послойного смешения, отработанных для бензиновых двигателей, применительно к работе на газовом топливе. Подобные процессы описываются системой уравнений Навье-Сток-

са 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 возможностями современных ИТ-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 газа 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:

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

Важная особенность численного моделирования реального процесса внутри цилиндра – 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 [1]. 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 можно 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 важность разработки единого методического подхода к принятию решений по защите атмосферы от вредных выбросов.

С целью определения нормы выбросов вредных веществ следует проводить 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}) 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 оксида азота и оксида углерода на единицу мощности (г/кВт · ч) вычислялись по следующим формулам:

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

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

где C_{NO_x}, C_{CO} - соответственно концентрация оксида азота и оксида углерода в отработавших 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 с использованием условия равновесного состава следует считать наиболее перспективным, несмотря на его значительную трудоемкость. Он позволяет 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. Козловская Н. В. Динамическая устойчивость PMS-вектора в задаче сокращения вредных выбросов // Процессы управления и устойчивость : труды XLI Международной конференции аспирантов и студентов. - СПб., 2010. - С. 612-617.

4. Минитаева А. М. Интегральная оценка экологической безопасности транспортных двигателей по критерию опасности // Омский научный вестник. – 2010. – № 2 (90). – С. 173–176.

5. Пахомов А. В. Новые стандарты инновационного развития экономического образования // Известия Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. – 2012. – № 3 (8). – С. 76–79.

6. Сквородников 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.

7. Сюзев В. В. Обобщенные функции и преобразования Хартли в системах счисления с постоянным основанием // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2014. – № 2. – С. 63–79.

References

1. Aristov L. I., Dunaev A. I., Kerimov O. M., Kiselev L. N., Pevgov V. G., Semenov A. V., Khmel'shchikov M. V. Spektral'nyy sposob operativnogo opredeleniya malyykh kontcentratsiy azota i kisloroda v gazovykh smesyakh s geliem i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Spectral Method for Rapid Identification of Small Concentrations of Nitrogen and Oxygen in Gas Mixtures with Helium and Device for Its Implementation]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], 2005, No. 6, pp. 60–62. (In Russ.).

2. Gordovskiy D. E., Kartvelishvili V. M. Modeli otcenki effektivnosti obespecheniya zhiznesposobnosti organizatsionnykh struktur [Models Evaluate the Effectiveness of the Organizational Structures to Ensure the Viability]. *Nauka i praktika* [Science and Practice], 2015, No. 2, pp. 13–29. (In Russ.).

3. Kozlovskaya N. V. Dinamicheskaya ustoychivost' PMS-vektora v zadache sokrashcheniya vrednykh vybrosov [Dynamic Stability PMS-Vector in the Task of Reducing Emissions]. *Protsessy upravleniya i ustoychivost', trudy XLI Mezhdunarodnoy konferentsii aspirantov i studentov* [Management Processes and Sustainability, Works XLI International Conference of Students and Graduate Students]. Saint Petersburg, 2010, pp. 612–617. (In Russ.).

4. Minitaeva A. M. Integral'naya otsenka ekologicheskoy bezopasnosti transportnykh dvigateley po kriteriyu opasnosti [Integral Assessment of Environmental Safety of Motor Vehicles on the Criterion of Danger]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Herald of the Omsk Scientific], 2010, No. 2 (90), pp. 173–176. (In Russ.).

5. Pakhomov A. V. Novye standarty innovatsionnogo razvitiya ekonomicheskogo obrazovaniya [New Standards of Innovative Development of Economic Education]. *Izvestiya Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta im. G. V. Plekhanova* [Proceedings of the Plekhanov Russian University of Economics], 2012, No. 3 (8), pp. 76–79. (In Russ.).

6. Skovorodnikov E. I., Anisimov A. S., Taruta M. V., Grishina Yu. B., Minitaeva A. M. Razrabotka metoda ekologicheskogo monitoringa teplovoznnykh dvigateley [Development of the Method of Ecological Monitoring of Diesel Engines]. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport Science and Technology], 2010, No. 1, pp. 76–84. (In Russ.).

7. Syuzev V. V. Obobshchennyye funktsii i preobrazovaniya Khartli v sistemakh schisleniya s postoyannym osnovaniem [Generalized Functions and Hartley Transform in a Number System with a Permanent Base]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Seriya «Priborostroenie»* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrument], 2014, No. 2, pp. 63–79. (In Russ.).