

Математическое и методическое обеспечение экосистемы инноваций в проблеме нейтрализации отработавших газов автомобиля



Г. И. Коршунов,
д. т. н., профессор
kgi@pantes.ru



Р. И. Сольницев,
д. т. н., профессор
remira70@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Для отработавших газов автомобиля наибольшее распространение получили методы и средства каталитической нейтрализации. Инновационный проект направлен на создание системы управления температурой катализатора по критерию минимизации вредных отработавших газов. Системы управления с подключением ГЛОНАСС позволяют отслеживать процесс нейтрализации с учетом фоновых концентраций. Приведены базовые химические реакции и на их основе получены математические модели процессов нейтрализации. Предложено развивать предложенный подход в условиях открытых инноваций на базе смежных научных дисциплин, например кинетики химических реакций. Это позволит создать эффективные системы на основе платиновых катализаторов отработавших газов автомобилей и совершенствовать экологию городов и соответствующую экосистему инноваций.

Ключевые слова: экосистема, инновация, каталитический нейтрализатор, замкнутая система управления, отработавшие газы автомобиля, испытания, эффективность.

Экосистема инноваций, как комплекс взаимоотношений между заинтересованными сторонами, должна содержать методы и модели, отражающие сущность происходящих в ней процессов и подтверждать востребованность на рынке. Для экосистемы инноваций применительно к первичной, собственно экологической интерпретации, проблемная область порождает многочисленные, часто междисциплинарные задачи, решение которых может достигаться в процессе инновационной деятельности.

По данным Всемирной организации здравоохранения в течение ближайших 30 лет состояние здоровья населения будет зависеть от качества среды обитания на 50-70%, затраты на стабилизацию качества окружающей среды могут превысить 40-50% валового национального продукта; выбросы только по диоксиду серы (SO₂) современных ТЭС (эстонские ТЭС, работающие на сланцах) составляет до 1 тыс. т SO₂ в сутки; ущерб от выбросов автомобильного транспорта в Санкт-Петербурге только по СО может составить до 20 тыс. руб./год на одного человека.

Задачи экологии достаточно разнообразны, в том числе для экологии атмосферы. Пути их решения развиваются в рамках концепции «природа – техногеника», предложенной в [1], развитой авторами в ряде статей и патентов и обобщенной в монографии [2]. Создаваемые системы управления «природа –

техногеника» (СУПТ) образуют междисциплинарное инновационное научное направление, исследующее и развивающее общие закономерности СУПТ, взаимодействие природы и техногеники, идентификацию звеньев СУПТ, синтез управлений в СУПТ и коммерциализацию таких систем на этом научном базисе.

Концепция замкнутых систем управления «природа – техногеника» включает:

- минимизацию или исключение «человеческого фактора»;
- контроль за концентрацией ЗВ в реальном времени (онлайн-режим);
- сохранение существующей технологии производства на стационарных предприятиях – источниках загрязняющих веществ (ИЗВ);
- нейтрализацию ЗВ в выбросах нестационарных источников (транспортных средств).

Для описания объектов разработаны принципы и выполнены научные исследования, позволяющие получать

- математические модели газо-воздушной смеси (аналогично по воде и почве);
- математические модели многомерного объекта управления с перекрестными связями (промзона, район);
- математические модели объектов управления выхлопными системами автомобилей.

Моделирование СУПТ охватывает в настоящее время

- линейные системы;
- системы с вероятностными характеристиками элементов;
- системы с распределенным объектом управления;
- системы взаимного влияния предприятий ИЗВ;
- системы управления нейтрализацией выхлопных газов автомобиля.

Важной проблемой экосистемы мегаполисов и соответствующей экосистемы инноваций являются вредные выбросы автомобилей. Среди направлений решения проблемы нейтрализации отработавших газов автомобиля наибольшее распространение получили методы и средства каталитической нейтрализации. Исследования показали, что подогрев катализатора для решения задач нейтрализации оказывается необходимым. Однако системы управления температурой катализатора по критерию минимизации вредных отработавших газов в известных работах не рассматривались.

Целью работы является создание на принципах открытых инноваций экосистемы для коммерциализации нового способа нейтрализации, основанного на построении замкнутой системы управления (регулирования, стабилизации) температурного режима катализатора. В статье рассмотрены математические модели процессов и приведены описания систем нейтрализации, а также методы испытаний и оценки экономической эффективности, необходимые для коммерциализации инновационного проекта.

Анализ факторов, влияющих на эффективность катализатора, показал, что его нагревание повышает каталитические свойства. Разработана структура автоматической глобальной и локальной замкнутых систем управления процессом нейтрализации, которые обеспечивают нагрев катализатора только в моменты повышения концентрации вредных отработавших газов. Системы управления с оператором водителем также позволяют отслеживать процесс нейтрализации.

Замкнутая система управления нейтрализацией отработавших газов автомобиля

Замкнутая система управления нейтрализацией отработавших газов автомобиля (ЗСУНОГА) основана на системе управления работой катализатора.

ЗСУНОГА (рис. 1) по защищенному патентом способу [3] отличается от известных тем, что измерители вредных ОГА в составе подвижной замкнутой системы управления встраиваются в выхлопную систему автомобиля, сигналы измерений ОГА передаются на средства визуализации водителя, приемники ГЛОНАСС для регистрации и через автоматическую обратную связь преобразуются в управляющие сигналы блоков компенсации ОГА с учетом фоновых концентраций, которые в свою очередь изменяют уставку в блоках компенсации в сторону минимизации этих выбросов только в необходимое время с привязкой к координатам движущегося или стоящего автомобиля. Источник энергии, потребляемой электронагревателем, на рис. 1 не представлен.

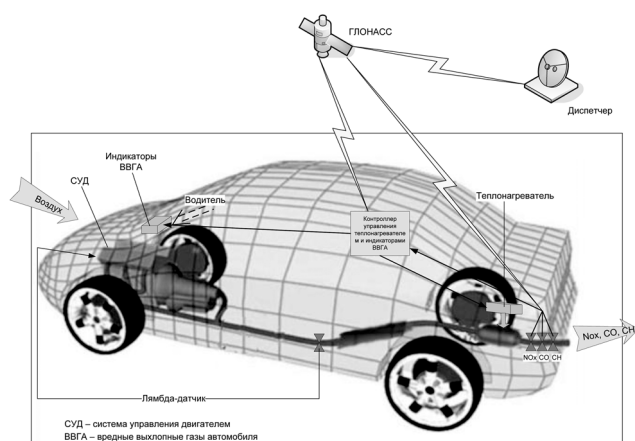


Рис. 1. Замкнутая система управления нейтрализацией отработавших газов автомобиля

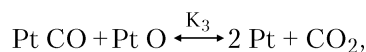
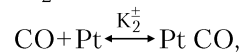
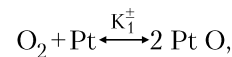
Техническим результатом, достигаемым при реализации ЗСУНОГА, является повышение эффективности очистки отработавших газов и надежности (ресурса) катализатора за счет того, что в систему дополнительно введены датчики концентрации (количества) окислов углерода, азота, углеводородов; блоки индикации вредных выбросов для водителя и диспетчера технадзора; блок беспроводной связи с блоком управления нагревателем катализатора и передатчиком ГЛОНАСС [4].

Катализатор с теплонагревателем конструктивно помещается к выхлопной трубе, что позволяет наиболее просто решить задачу стабилизации температурного режима для эффективного процесса катализа.

Локальная система отличается от системы с включением блоков ГЛОНАСС заменой блоков модуля ГЛОНАСС на соответствующие соединения внутри автомобиля.

Математическая модель объектов управления нейтрализацией выхлопных газов автомобилей

В результате прохождения составляющей ОГА через катализатор на примере монооксида углерода происходит каталитическая реакция следующего вида, описываемая системой химических уравнений:



где O_2 — молекулярный кислород; CO — монооксид углерода; CO_2 — диоксид углерода; Pt — платина (выступающая в роли катализатора); PtO , $PtCO$ — временные соединения; K_1^\pm , K_2^\pm , K_3 — константы при постоянной температуре скорости реакции.

Закон управления в замкнутой системе основан на функциональной связи изменения температуры нагревателя катализатора с количеством поступающим с его выхода CO^* , оставшегося после превращения CO в CO_2 на входе катализатора.

Константы скорости K_j^\pm зависят от температуры по закону Аррениуса, имеющего вид:

$$K = A \exp(-E/(RT)),$$

где K — константа скорости реакции; A — масштабный множитель; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

При заданных значениях концентрации временных соединений PtO и PtCO на поверхности платины были определены на основании экспериментальных данных значения коэффициентов:

$$K_1^+ = 0,2 \cdot 10^6 \exp((-2,1 \cdot 10^5)/(8,3 T)),$$

$$K_1^- = 0,16 \cdot 10^3 \exp((2,1 \cdot 10^5)/(8,3 T)),$$

$$K_2^+ = 0,45 \cdot 10^6 \exp((1,46 \cdot 10^5)/(8,3 T)),$$

$$K_2^- = 0,45 \cdot 10^3 \exp((1,46 \cdot 10^5)/(8,3 T)),$$

$$K_3^+ = 0,4 \cdot 10^4 \exp((4,6 \cdot 10^4)/(8,3 T)).$$

В приведенной выше системе химических уравнений монооксид углерода и диоксид углерода участвуют в равном молярном соотношении. Поэтому поскольку скорость увеличения количества CO_2 эквивалентна скорости убывания CO, то для ускорения нейтрализации монооксида углерода необходимо увеличить скорость реакции образования диоксида углерода CO_2 . Это достигается повышением температуры катализатора.

Приведенным химическим реакциям соответствует система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dC_{CO_2}}{dt} = -K_1^+ C_{O_2} (Q_{Pt})^2 + K_1^- (Q_{PtO})^2, \\ \frac{dQ_{Pt}}{dt} = -K_1^+ C_{O_2} (Q_{Pt})^2 + K_1^- (Q_{PtO})^2 - K_2^+ C_{CO} Q_{Pt} + \\ + K_2^- Q_{PtCO} + K_3^+ (Q_{PtCO})(Q_{PtO}), \\ \frac{dQ_{PtO}}{dt} = K_1^+ C_{O_2} (Q_{Pt})^2 - K_1^- (K_3)^+ - K_3^+ (Q_{PtCO})(Q_{PtO}), \\ \frac{dC_{CO}}{dt} = K_2^- C_{CO} Q_{Pt} + K_1^- (Q_{PtCO}), \\ \frac{dQ_{PtCO}}{dt} = K_2^+ C_{CO} Q_{Pt} - K_2^- (Q_{PtCO}) - K_3^+ (Q_{PtCO})(Q_{PtO}), \\ \frac{dC_{CO_2}}{dt} = K_3^+ (Q_{PtCO})(Q_{PtO}). \end{cases}$$

Решение системы уравнений позволяет получить массовые соотношения участвующих веществ и на их основе уточнить их обоснованную массу и/или концентрацию.

Аналогичные модели получены для других составляющих ОГА.

Полезным дополнением математического обеспечения предложенной экосистемы инноваций явилось бы применение методов и моделей кинетики химических реакций, что еще раз подчеркивает ее междисциплинарность и направленность к открытым инновациям в этой сфере.

Необходимыми условиями существования экосистемы инноваций являются трансфер и коммер-

циализация. Применительно к предложенной экосистеме, представляющей собственно экологическую ее интерпретацию, здесь приведены элементы методики испытаний и оценки эффективности каталитического нейтрализатора выбросов вредных веществ автомобиля, а также пример использования методики оценки экономического эффекта замкнутой системы управления нейтрализацией вредных газов автомобилей (ЗСУНВГА) применительно к Санкт-Петербургу.

Методика испытаний и оценки эффективности каталитического нейтрализатора

Методика испытаний и оценки эффективности каталитического нейтрализатора выбросов вредных веществ автомобилями выполняется на беговых барабанах, включенных в состав испытательного стенда, представленного на рис. 2, где 1 — беговые барабаны; 2 — индикация/управление циклом движения; 3 — подача наружного воздуха; 4 — фильтр наружного воздуха; 5 — канал разбавления воздуха; 6 — контроль давления; 7 — охладитель; 8 — контроль температуры ОГ; 9 — контроль давления ОГ; 10 — ротационный насос; 11 — вентиль для взятия проб ОГ; 12 — сборник ОГ; 13 — измерительные приборы для CO , C_xH_y , NO_x ; 14 — сажевые фильтры для дизельных двигателей; 15 — к выпуску; 16 — испытуемый автомобиль. Пока автомобиль «движется» на барабанах в соответствии с определенными циклами движения (цикл NEDC), откалиброванные измерительные системы определяют концентрацию отдельных компонентов выхлопа.

Состав стенда дополняется и модифицируется для испытаний каталитического нейтрализатора с управляемым подогревом и обеспечивает проведение сертифицированных испытаний.

Оценка экономического эффекта ЗСУНВГА

Оценка экономического эффекта ЗСУНВГА осуществляется по методике предотвращенного ущерба.

Оценка ущерба выполняется в соответствии с формулой:

$$M_i = (O\Phi_i - OНВ_i) \cdot T \cdot 0,0864, \text{ т,}$$

где $O\Phi_i$ — фактическая величина выброса i -го ОГА, установленная на момент проведения замера, $OНВ_i$ —

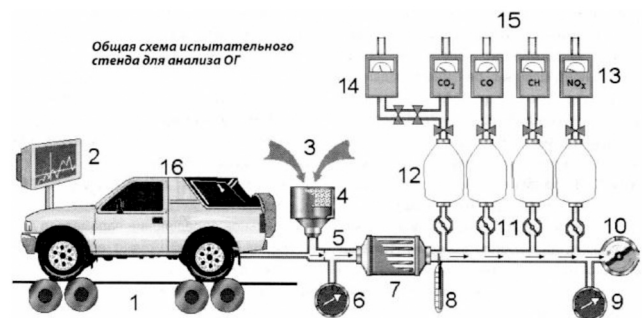


Рис. 2. Стенд для испытаний и оценки эффективности каталитического нейтрализатора выбросов вредных веществ автомобилями

величина допустимого i -го выброса по нормативам, T — продолжительность выброса с превышением ОНВ _{i} , 0,0864 — коэффициент пересчета размерностей.

Размер вреда и убытков, причиненных выбросом i -го ЗВ, определяется по формуле:

$$Y_i = K_{\text{ин}} N_i M_i + Z_0, \text{ руб.},$$

где $K_{\text{ин}}$ — коэффициент индексации за счет инфляции, N_i — такса, установленная по существам нормам, в тыс. руб., Z_0 — затраты на определение вреда от ЗВ, включая мониторинг и лабораторный анализ, руб.

Например, выбросы оксида углерода СО в Санкт-Петербурге, рассчитанные по приведенной в программе составляют $M_i \approx 70000$ т/год и величина ущерба составляет:

$$Y_i = 1,79 \cdot 155000 \text{ руб./т} \cdot 70000 \text{ т/год} \approx 19,4 \text{ млрд руб./год.}$$

Оценка ущерба от вредных выбросов в пересчете на каждый легковой автомобиль в Санкт-Петербург составляет $N \approx 12947$ руб./год.

Ориентировочные затраты на разработку ЗСУНВГА одновременно (в течение 1 года) составят $Z_{\text{авт}} \approx 373000$ руб., стоимость 1 комплекта продукта 10000 руб., тогда как, за счет ЗСУНВГА компенсация только 30% от возможного ущерба из-за вредных выбросов в СПб легковых автомобилей и только от СО, составит 6 млрд руб. ежегодно.

Результаты и выводы

Выполненный анализ функциональных зависимостей концентрации отработавших газов от температуры катализатора для обеспечения соответствия стандартам показал, что использование замкнутой системы регулирования температурного режима позволяет достигнуть требуемых норм.

Практическая значимость состоит в том, что предлагаемый способ позволяет принципиально снизить количество отработавших газов в выбросах автомобилей, а приведенные в статье результаты исследований служат основой для отработки аппаратно-программных средств конструкторско-технологических решений и последующего серийного внедрения управляемых каталитических нейтрализаторов в автомобильную промышленность.

Следует отметить, что проведенные исследования могут быть продолжены и дополнены специалистами смежных научных областей в рамках открытых инноваций. Это позволит уточнить модели процессов на основе кинетики химических реакций, рассчитать параметры и конструкцию платиновых катализаторов и систему нейтрализации в целом, уточнить состав, алгоритмы работы ИКТ для оценки фоновых концентраций и использования ресурсов системы ГЛОНАСС.

Список использованных источников

1. R. Solnitsev. The instrumentation in human safety, ISA//South America region, San-Paolo, Brasil, 1995.
2. Р. И. Сольнищев, Г. И. Коршунов. Системы управления «природа–техногеника». СПб.: Политехника, 2013.
3. Р. И. Сольнищев, Г. И. Коршунов. Пат. 2012145342/06 РФ МПК-F01N 3/28. Каталитический нейтрализатор вредных выбросов автомобиля в атмосферу. № 2511776; заявл. 24.10.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10.
4. Р. И. Сольнищев, Г. И. Коршунов, О. В. Баранова. Замкнутая система управления нейтрализацией отработавших газов автомобиля//Информационно-управляющие системы, № 2, 2015.

The mathematical and methodical provision of the innovation ecosystem in the problem of the Car Exhaust Emissions neutralization

G. I. Korshunov, Doctor of science, professor, Saint-Petersburg State University of the aerocosmic instrumentation.

R. I. Solnitsev, Doctor of science, professor, Saint-Petersburg State University of the aerocosmic instrumentation.

The most common methods of neutralizing harmful car emissions are based on catalytic neutralization. The innovation project is directed on criterion the systems of control over the catalyst temperature according to the harmful emission minimization. The control systems connected with GLONAS allow to look after neutralizing process together with phone concentration estimations. The basic chemistry reactions and mathematical models based on them are cited. The development of proposed approach in open innovation conditions based on other science, f. e. the chemistry reactions kinetics. This way allows to create effective systems based on platinum catalizator of the Car Exhaust Emissions and to improve cities ecosystem and according innovation ecosystem.

Keywords: ecosystem, innovation, catalyst neutralizer, closed control system, car exhaust emissions, testing, efficiency.