



На правах рукописи

КОЗЛОВ Андрей Викторович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК АВТОМОБИЛЕЙ
В ПОЛНОМ ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ**

05.04.02 – Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва - 2004

Тумашев Р.З.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние годы серьезную озабоченность людей вызывает очень высокий уровень техногенного воздействия на окружающую среду, создающий ряд глобальных, региональных и локальных экологических проблем: потепление климата вследствие парникового эффекта и теплового загрязнения окружающей среды; разрушение защитного озонового слоя; закисление почвы и воды от кислотных дождей; фотохимический смог; загрязнение окружающей среды различными токсичными веществами, включая и тяжелые металлы; истощение природных ресурсов и т.д.

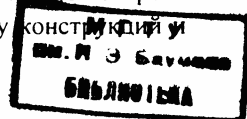
В настоящее время автомобилестроение и автомобильный транспорт являются основными потребителями энергии, природных ресурсов и одним из главных источников загрязнения атмосферы. Наиболее ресурсоёмким и экологически опасным компонентом автомобиля является силовая установка.

В современных условиях совершенствование конструкции двигателей и улучшение их экологических показателей должно опираться на оценку полного жизненного цикла (ПЖЦ). Для более полного учета негативного воздействия силовых установок на окружающую среду целесообразно производить такую оценку учитывая все стадии жизненного цикла: добычу сырья, получение материалов (конструкционных и эксплуатационных), изготовление деталей и узлов, сборку, эксплуатацию, переработку и утилизацию силовой установки. Для проведения оценки показателей (расходования сырья и энергии, выбросов вредных веществ) силовых установок автомобилей в полном жизненном цикле, а также интегральной оценки негативного воздействия на окружающую среду в ПЖЦ силовой установки необходимо создание комплекса математических моделей и методик расчета.

Актуальность оценки жизненного цикла подчеркивается тем, что Международной организацией по стандартизации в период с 1997 по 2000 г. разработан, а в России принят к прямому исполнению, ряд стандартов (ГОСТ Р ИСО 14040 – 14043), регламентирующих вопросы оценки ПЖЦ продукции.

Разработано большое количество различных способов повышения экономичности силовых установок и снижения вредных выбросов. Их применение связано с совершенствованием рабочего процесса, использованием альтернативных топлив, установкой систем нейтрализации отработавших газов, созданием гибридных силовых установок. Необходим обоснованный выбор способов уменьшения негативного воздействия автомобилей и двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на окружающую среду с комплексным учетом различных факторов в полном жизненном цикле.

Таким образом, необходима разработка инструмента с помощью которого можно было бы осуществлять обоснованный выбор и доводку



технологий, обеспечивающих снижение негативного воздействия силовой установки на окружающую среду в полном жизненном цикле.

Цель диссертационной работы: создание теоретических основ оценки показателей силовых установок автомобилей в полном жизненном цикле для снижения их негативного воздействия на окружающую среду. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи** исследования:

1. Проанализировать мировой и отечественный опыт, стандарты в области оценки полного жизненного цикла продукции.

2. Разработать теоретические основы инвентаризационного анализа полного жизненного цикла силовой установки, что предусматривает создание математической модели, описывающей материальные и энергетические потоки в полном жизненном цикле, сбор и обработку инвентаризационных данных о единичных процессах в жизненном цикле силовой установки.

3. Обосновать выбор и адаптировать для целей оценки полного жизненного цикла силовых установок методики интегральной оценки негативного воздействия на окружающую среду.

4. Разработать комплекс математических моделей и методов расчета для оценки расхода топлива и выбросов вредных веществ силовой установкой автомобиля в условиях работы в ездовых циклах, включающий: многозонные модели процессов образования вредных веществ в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием, работающих на традиционном и альтернативном топливах; методики расчета многопараметровых экологических и экономических характеристик двигателей внутреннего сгорания. Проверить достоверность разработанных моделей и методик на основе экспериментального исследования работы двигателя внутреннего сгорания на бензине и метаноле.

5. Разработать прикладное программное обеспечение для осуществления комплекса расчетов показателей различных типов силовых установок автомобилей в полном жизненном цикле.

6. Рассмотреть возможности применения разработанного комплекса методик для оценки показателей традиционных и гибридных силовых установок при работе на традиционном и альтернативных топливах в полном жизненном цикле.

Научная новизна работы состоит в разработке комплекса математических моделей и методов расчета для оценки показателей силовых установок автомобилей в полном жизненном цикле и исследовании путей снижения негативного воздействия на окружающую среду а именно:

1. Разработке математической модели материальных и энергетических потоков в полном жизненном цикле силовой установки автомобиля с учетом процессов восстановления деталей и рециклирования материалов, которая позволяет

производить оценку расхода природных ресурсов, энергии, а также выбросов вредных веществ в жизненном цикле различных типов силовых установок.

2. Создании комплексной модели работы двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием, позволяющей оценивать его эколого-экономические показатели в ездовых циклах на стадии проектирования. Комплексная модель включает в себя многозонные модели рабочего процесса, процессов образования CO , NO_x и CH и позволяет учитывать влияние неомогенности горючей смеси на выход нормируемых токсичных компонентов при работе двигателя на бензине и метаноле.

3. Усовершенствовании методик интегральной оценки негативного воздействия на окружающую среду с целью их применения для оценки силовых установок автомобилей в полном жизненном цикле.

4. Проведении комплексных теоретических оценок перспективных путей уменьшения негативного воздействия силовых установок автомобилей на окружающую среду в полном жизненном цикле путем использования альтернативных топлив, гибридных силовых установок на базе двигателей внутреннего сгорания и топливных элементов.

Практическая значимость работы состоит в разработке методологической основы для обоснованного выбора конструктивных и технологических решений на стадии концептуального проектирования перспективных типов силовых установок; разработке пакета прикладных программ для проведения расчетов, касающихся усовершенствования рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания при работе на бензине и метаноле, инвентаризационного анализа процессов и стадий жизненного цикла, интегральных оценок негативного воздействия на окружающую среду силовых установок в полном жизненном цикле, а также в разработке системы питания двигателя с искровым зажиганием испаренным метанолом.

Реализация результатов работы

Методика и программа расчета для оценки показателей силовых установок в полном жизненном цикле внедрена в практику проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ)».

Методика оценки экологических показателей силовых установок в полном жизненном цикле используется в учебном процессе кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э.Баумана при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам: «Спецглавы теории ДВС наземного транспорта» и «Спецглавы конструирования и САПР».

Методика оценки показателей силовых установок, работающих на традиционных и альтернативных топливах, в полном жизненном цикле передана

ОАО «ГАЗ» и используется в практике проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для оценки эффективности новых силовых установок. Методика была использована при проведении сравнительной оценки экологических показателей двигателей ГАЗ-5601, IVECO 8140.27, ЗМЗ-4063 в полном жизненном цикле.

Методика расчета и конструкция пористого испарителя метанола для системы питания двигателя с принудительным зажиганием используются для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Института проблем машиностроения НАН Украины.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены на научных конференциях и семинарах: III Всероссийской научно-практической конференции «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности» (Санкт-Петербург, 1998); втором научно-техническом семинаре «Город и автомобиль» (Москва, 1998); третьей международной научно-технической конференции «Решение экологических проблем в автотранспортном комплексе» (Москва, 1999); XXVI международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Экология и топливная экономичность автотранспортных средств» (Дмитров, 1999); четвертой международной научно-технической конференции «Решение экологических проблем в автотранспортном комплексе» (Москва, 2000); XXIX международной научно-технической конференции ААИ «Проблемы автомобильного рынка России» (Москва, 2000); XIII международном симпозиуме по спиртовым топливам (Стокгольм, 2000); третьей международной научно-практической конференции «Автотранспортный комплекс. Проблемы и перспективы развития» (Москва, 2000); XXXVII международной научно-технической конференции ААИ «Развитие аналитических исследований и конструкций АТС (грузовые, легковые, автобусы)», (Москва, 2002); XXXIX международной научно-технической конференции ААИ «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров» (Москва, 2002); научно-практической конференции «Луканинские чтения. Пути решения энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе» (Москва, 2003).

Публикации

По теме диссертации опубликована одна монография и 29 печатных работ в научных журналах и сборниках.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 426 страниц, в том числе 272 основного текста. Диссертация содержит 70 таблиц, 172 рисунка и ссылки на 331 литературный источник.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы научная проблема и цель работы.

В первой главе рассмотрена проблема оценки показателей силовых установок автомобилей в полном жизненном цикле.

Создание новых перспективных силовых установок для автомобилей требует разработки новых конструкций ДВС и связано с совершенствованием рабочего процесса, использованием альтернативных топлив, установкой систем нейтрализации отработавших газов, применением гибридных схем силовых установок.

Выбор способа снижения негативного воздействия силовой установки на окружающую среду связан с анализом множества возможных вариантов и должен быть основан на оценке по полному жизненному циклу.

Важность оценки полного жизненного цикла подтверждается принятием целого ряда международных стандартов (ИСО 14040-14043), регламентирующих рамочные требования к проведению оценки. В соответствии с этими стандартами процедура оценка жизненного цикла любого вида продукции должна включать этапы постановки цели и определения области исследования, инвентаризационного анализа, оценки воздействия на окружающую среду и интерпретации полученных результатов. На основе оценки полного жизненного цикла производится добровольная сертификация продукции и ее экологическая маркировка.

Для проведения оценок показателей продукции в полном жизненном цикле разрабатывают соответствующие математические модели и методы расчета, позволяющие производить инвентаризационный анализ и интегральную оценку воздействия на окружающую среду каждого конкретного вида продукции. Применительно к силовым установкам автомобилей такой комплекс математических моделей и методов расчета в настоящее время отсутствует.

Проведение инвентаризационного анализа полного жизненного цикла силовых установок предусматривает учет расхода природных ресурсов и энергии, выбросов вредных веществ в окружающую среду, а также рециклирования материалов и восстановления некоторых деталей силовой установки. Для этого требуется разработка математической модели, описывающей материальные и энергетические потоки в жизненном цикле силовой установки. Также необходим сбор и анализ инвентаризационных данных о единичных процессах в жизненном цикле силовых установок.

Наибольшее влияние на достоверность инвентаризационного анализа жизненного цикла силовых установок оказывает точность определения экологических и экономических показателей ДВС в процессе их работы. На долю процесса работы современной силовой установки приходится более 60% расхода

природных ресурсов (с учетом получения моторных топлив) и более 50% выбросов вредных веществ (с учетом CO_2). В связи с этим точность моделирования эксплуатационных показателей ДВС играет очень важную роль при оценке жизненного цикла силовых установок.

Для оценки параметров силовой установки в процессе ее работы целесообразно использовать ее показатели в ездовом цикле. Такой подход позволяет делать сравнительные оценки различных типов силовых установок в «стандартных» условиях; существуют расчетные программы для проведения таких оценок.

В свою очередь, для расчета экологических и экономических показателей силовых установок в ездовом цикле нужны данные о расходе топлива и выбросах вредных веществ на различных режимах работы двигателя (многопараметровые характеристики). Для существующих двигателей такие характеристики могут быть получены экспериментально, однако при создании новых двигателей на ранних стадиях проектирования многопараметровые характеристики могут быть получены расчетным путем.

В мировой и отечественной практике разработаны различные модели рабочих процессов и процессов образования токсичных веществ в цилиндрах двигателей с искровым зажиганием. Недостатками моделей является то, что они позволяют производить расчеты при работе двигателя только на бензине и не учитывают негомогенность горючей смеси.

Для решения задач оценки полного жизненного цикла, а также использования математических моделей при разработке конструкции ДВС на ранних стадиях проектирования необходимо создание многозонной модели, позволяющей рассчитывать концентрации NO_x , CO и CH в отработавших газах двигателя при работе на бензине и альтернативных топливах (например, метаноле), которая учитывала бы негомогенность горючей смеси в цилиндре двигателя.

Важным этапом оценки жизненного цикла силовой установки наряду с инвентаризационным анализом является оценка воздействия на окружающую среду. Этот этап оценки позволяет количественно оценить уровень негативного влияния на окружающую среду различных материальных и энергетических потоков, связанных с реализацией жизненного цикла. Существует несколько подходов к оценке воздействия на окружающую среду, но наибольший практический интерес представляют два из них:

- экономическая оценка;
- оценка с помощью экологических индикаторов.

Анализ различных методик интегральной оценки воздействия на окружающую среду позволил выделить две методики, которые были взяты за основу:

«Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба» (г.Москва, утверждена Госкомэкологии 9.03.1999 г.);

«Экоиндикатор-99» (европейская методика, разработана под эгидой Нидерландского министерства жилья, территорий и окружающей среды, 1999 г.).

Поскольку эти методики носят общий характер, то их использование в целях оценки полного жизненного цикла силовых установок требует соответствующей проверки и адаптации методик для решения поставленной задачи.

В заключении главы сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрена математическая модель материальных и энергетических потоков в полном жизненном цикле силовой установки автомобиля. Модель является основой для проведения инвентаризационного анализа жизненного цикла.

При оценке жизненный цикл силовой установки представляют в виде производственной системы – совокупности материально и энергетически взаимосвязанных единичных процессов, реализующих одну или более определенных функций. Единичный процесс представляет собой наименьшую часть производственной системы, выделяемую при проведении оценки полного жизненного цикла. Единичные процессы связаны: друг с другом элементарными потоками промежуточных продуктов и (или) отходов, проходящих последующую переработку; с другими производственными системами потоками продукции; с окружающей средой элементарными потоками сырья, энергии, выбросов, сбросов, отходов. Единичные процессы могут быть объединены в отдельные стадии.

Для составления математической модели была разработана функциональная модель, отображающая все потоки между процессами. Такое представление существенно сокращает затраты времени на составление модели и уменьшает вероятность ошибок. Функциональная модель отражает структуру и функции производственной системы, а также потоки материалов и энергии, связывающие единичные процессы. Методология функционального моделирования является частью CALS-технологий и служит для анализа бизнес процессов (методология IDEF0). Эта методология была адаптирована автором применительно к анализу жизненного цикла силовых установок и другой промышленной продукции.

Функциональная модель представлена в виде иерархии диаграмм, начиная с верхнего уровня и вплоть до нижнего. Диаграмма верхнего (первого) уровня представляет полный жизненный цикл, диаграммы второго уровня – стадии жизненного цикла, а третьего уровня – единичные процессы. Рис. 1 иллюстрирует принцип построения функциональной модели полного жизненного цикла силовой установки. Полный жизненный цикл разбит на три стадии: производства, эксплуатации и утилизации, которые, в свою очередь, включают единичные процессы (на рисунке не показаны).

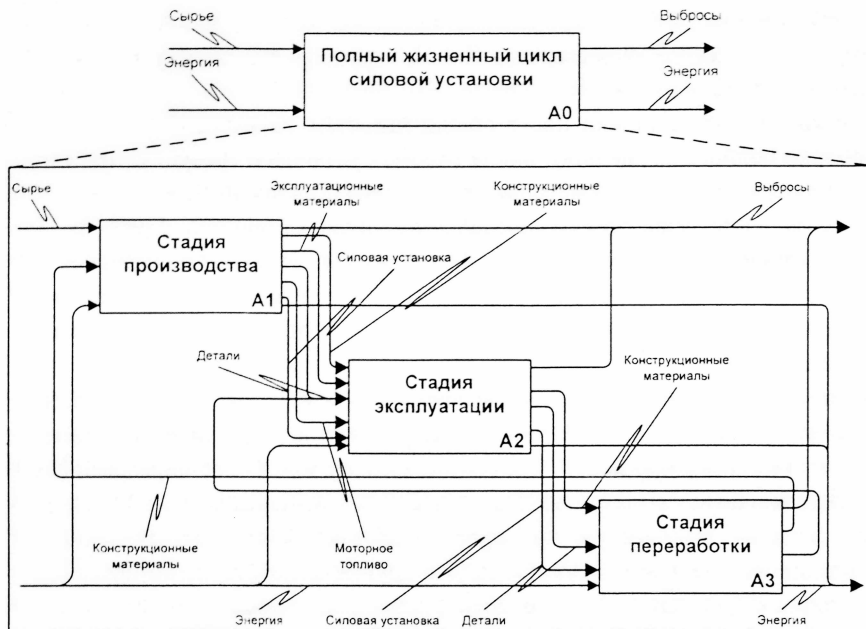


Рис. 1. Принцип построения функциональной модели полного жизненного цикла силовой установки

Любой единичный процесс, стадию жизненного цикла или производственную систему в целом можно схематически представить в виде процесса, который имеет «вход», то есть входные потоки веществ и энергии, и «выход», то есть выходные потоки веществ и энергии. Все процессы в жизненном цикле силовых установок можно классифицировать, как процессы: преобразования материи; преобразования энергии; композиции/декомпозиции; обслуживания; транспортировки. При моделировании любого процесса должны соблюдаться законы сохранения массы и энергии:

$$M_{\text{проц}}^{\text{вх}} = M_{\text{вых}}^{\text{проц}}; \quad (1)$$

$$E_{\text{проц}}^{\text{вх}} = E_{\text{вых}}^{\text{проц}}, \quad (2)$$

где M – поток массы; E – поток энергии (включая энергию, вносимую или выносимую с топливом или сырьем для его получения, а также затраты энергии на процесс и потери энергии в окружающую среду); индексы: «вх» – входной поток; «вых» – выходной поток; «проц» – идентификатор процесса. Эти законы должны соблюдаться на любом уровне иерархии процессов – от единичных до жизненного цикла в целом. Расчет материального и энергетического баланса используется для оценки точности инвентаризационного анализа. Однако на практике не всегда стремятся обеспечить точное соблюдение материального баланса. Так, например, в процессе работы силовая установка расходует топливо и

воздух (входной поток), а выбрасывает отработавшие газы (выходной поток). Обычно не учитывают расход воздуха при сгорании топлива и выбросы азота и кислорода с отработавшими газами.

Для построения модели выделены наиболее значимые единичные процессы в жизненном цикле силовой установки (см. табл. 1). Единичные процессы объединяют в стадии жизненного цикла, как показано в табл. 1.

Для каждого единичного процесса, стадии и жизненного цикла в целом рассчитываются материальные и энергетические потоки по следующей схеме:

- рассчитывается входной поток материалов;
- определяется входной поток энергии;
- рассчитывается выходной поток материалов;
- определяется выходной поток энергии.

В качестве примера ниже приведен расчет материальных и энергетических потоков для процесса работы силовой установки. Формулы (3)–(5) записаны в общем виде для многотопливной силовой установки, для монотопливной установки $k = 1$.

Таблица 1

Стадии и единичные процессы в жизненном цикле силовой установки

№ п/п	Стадия	Наименование	Усл. обозначение
1.	Производство	Получение конструкционных материалов	КМ
2.		Получение эксплуатационных материалов	ЭМ
3.		Получение топлив	ТОПЛ
4.		Получение электроэнергии	ЭН
5.		Изготовление деталей и узлов, производство запасных частей	ДЕТ
6.		Сборка силовой установки	СБ
7.	Эксплуатация	Работа силовой установки	РАБ
8.		Проведение технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР)	ТОТР
9.		Проведение капитального ремонта (КР)	КР
10.	Переработка	Разборка силовой установки	РА
11.		Рециклирование материалов	РЕЦ
12.		Утилизация материалов, узлов и деталей	УТ

Входной поток топлива, кг:

$$M_{\text{раб}}^{\text{топл}} = \sum_k M_{\text{раб},k}^{\text{топл}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{раб},k}^{\text{топл}}$ – расход k -го топлива при работе силовой установки, кг:

$$M_{\text{раб},k}^{\text{топл}} = \sum_k L_{\text{п.ж.ц}} g_k^{\text{раб}}, \quad (4)$$

где $L_{\text{п.ж.ц}}$ – пробег автомобиля за полный жизненный цикл, км; $g_k^{\text{раб}}$ – удельный расход k -го топлива на 1 км пробега автомобиля, кг топлива/км пробега.

Входной поток энергии, МДж:

$$E_{\text{раб}}^{\text{топл}} = \sum_k (M_{\text{раб},k}^{\text{топл}} H u_k), \quad (5)$$

где $H u_k$ – низшая теплота сгорания k -го топлива (тепловой эффект реакции в случае, если используется электрохимический источник энергии), МДж/кг топлива.

Выходной поток материалов, кг:

$$M_{\text{вых}}^{\text{раб}} = \sum_c M_{\text{вых},c}^{\text{раб}}, \quad (6)$$

где $M_{\text{вых},c}^{\text{раб}}$ – выброс c -го вещества при работе силовой установки, кг, определяется по формуле:

$$M_{\text{вых},c}^{\text{раб}} = L_{\text{нжц}} e_c^{\text{раб}}, \quad (7)$$

где $e_c^{\text{раб}}$ – удельный выброс c -го вещества на 1 км пробега, кг вещества/км пробега.

Выходной поток энергии, МДж:

$$E_{\text{вых}}^{\text{раб}} = E_{\text{раб}}^{\text{топл}}, \quad (8)$$

в том числе, полезная работа, МДж:

$$E_{\text{вых(полезная работа)}}^{\text{раб}} = L_{\text{нжц}} l^{\text{раб}}, \quad (9)$$

где $l^{\text{раб}}$ – удельная работа, совершаемая силовой установкой для перемещения автомобиля на 1 км, МДж/км.

В математической модели учтены процессы рециклирования материалов и утилизации (восстановления) деталей и узлов. Рециклированные конструкционные материалы возвращаются на стадию производства силовой установки (см. рис. 1) и используются для получения новых деталей, а восстановленные детали и узлы используются для осуществления текущего и капитального ремонта силовой установки. Таким образом формируется «обратная связь», за счет чего происходит снижение расхода сырья и энергии на получение новых материалов и запасных частей.

На основании расчетов материальных и энергетических потоков для единичных процессов определяются потоки для выделенных стадий: производства, эксплуатации и переработки, а затем и для полного жизненного цикла в целом.

В связи с тем, что для проведения оценок жизненного цикла необходимо большое количество инвентаризационных данных, на основе анализа отечественной и зарубежной информации была создана инвентаризационная база данных по расходу сырья, топлива, энергии и выбросам вредных веществ в полном жизненном цикле силовых установок. Собранные данные охватывают следующие процессы: производство конструкционных и эксплуатационных материалов; производство моторных топлив; получение электроэнергии; изготовление деталей и узлов, сборка силовых установок, их техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт; рециклирование материалов и утилизацию деталей и узлов.

На основе математической модели материальных и энергетических потоков в полном жизненном цикле силовой установки разработана компьютерная программа «CarLCA 2.5», позволяющая производить соответствующие расчеты для единичных процессов, стадий и жизненного цикла в целом. В программе используется собранная инвентаризационная информация, реализованная в виде базы данных.

В третьей главе изложены методики интегральной оценки воздействия силовой установки на окружающую среду. Предложено использовать два типа методик: экономическую с расчетом экономического ущерба и методику экологических индикаторов, позволяющую оценить степень негативного воздействия на окружающую среду в баллах.

За основу для оценки ущерба от загрязнения окружающей среды была выбрана российская «Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба» 1999 г. В соответствии с этой методикой экономическая оценка ущерба, от выбросов загрязнений в атмосферный воздух определяется по формуле, руб./ПЖЦ:

$$Y = \gamma \sigma f M_{np}, \quad (10)$$

где γ – нормативная константа, переводящая условную оценку выбросов в денежную, руб./усл. т; σ – показатель опасности загрязнения атмосферы над различными территориями; f – поправка, учитывающая характер рассеивания примесей в атмосфере; M_{np} – приведенная к диоксиду серы масса выброса загрязнений, усл. т/ПЖЦ.

Приведенный выброс вредных веществ M_{np} определяется по относительной агрессивности индивидуальных веществ, полученной на основе ПДК этих веществ, то есть в методике главным образом учитывается воздействие на здоровье людей. Воздействие на других реципиентов (животных, растения, здания) учитывается косвенно, введением дополнительных коэффициентов.

Для оценки достоверности результатов расчетов по данной методике были проведены сопоставления с результатами, полученными по европейской методике «ExternE», использующейся для оценок жизненного цикла различных источников получения энергии. Методика «ExternE» также использовалась для расчета экономического ущерба от автотранспорта в различных европейских государствах (Германия, Франция, Италия и др.). Методика «ExternE» более точно учитывает факторы, влияющие на размер ущерба окружающей среде от загрязнения окружающей среды, поэтому может быть использована, с учетом различий в уровне валового национального продукта на душу населения, для оценки достоверности «Временной методики...».

В качестве примера сравнения методик в табл. 2 приведены результаты расчетов экономического ущерба от силовой установки легкового автомобиля с выбросами вредных веществ, соответствующими нормам Евро-2.

Сопоставление результатов без учета парниковых газов показывает, что расчет по принятой в России методике дает несколько (на 20%) заниженный результат по сравнению с ущербом, рассчитанным по предлагаемой методике. Несколько отличается также и вклад отдельных компонентов в суммарный ущерб. Однако в связи с тем, что «Временная методика...» не учитывает ущерб от выброса парниковых газов, итоговое различие в результатах превышает 2 раза. Таким образом, необходимо учитывать ущерб от выброса парниковых газов. На основе анализа зарубежных данных по величине ущерба от выброса CO_2 рекомендуется для расчетов в условиях Российской Федерации использовать величину: 131 руб./т CO_2 .

Таблица 2

Ущерб от загрязнителей, выбрасываемых бензиновой силовой установкой легкового автомобиля, удовлетворяющей нормам Евро-2 на 1 км пробега

Загрязняющие вещества	Ущерб, коп./км	
	методика «ExternE»	«Временная методика...»
CO	0,0004	0,29
CH	0,01	0,01
SO ₂	0,22	0,32
ТЧ _{2,5}	0,33	0,16
NO _x	2,1	1,36
Парниковые газы	2,85	
Итого	5,50	2,14
Итого без учета парниковых газов	2,65	2,14

Для применения «Временной методики...» при оценке ущерба от различных единичных процессов в жизненном цикле силовой установки автомобиля разработаны рекомендации по выбору величин коэффициентов σ (показатель опасности загрязнения атмосферы над различными территориями) и f (поправка, учитывающая характер рассеивания примесей в атмосфере).

Методика оценки экономического ущерба наиболее удобна для определения экономической эффективности мероприятий, нацеленных на снижение выбросов вредных веществ в производственных процессах, при работе силовой установки, ее обслуживании и ремонте, а также утилизации.

Методика расчета экоиноксаторов разработана на основе методики «Экоиндикатор-99», созданной под эгидой Нидерландского министерства жилья, территорий и окружающей среды (VROM) и, по сути, является ее адаптированным вариантом для проведения оценок жизненного цикла силовых установок в условиях Российской Федерации.

Принцип расчета экоиноксатора заключается в получении единой количественной оценки уровня воздействия на окружающую среду. Чем выше величина экоиноксатора, тем большее негативное воздействие на окружающую среду. Расчет производится в четыре этапа. На первом этапе производят клас-

сификацию материальных потоков (затраты природных ресурсов, выбросы в окружающую среду) вначале по категориям воздействия, затем по категориям ущерба: ущерб здоровью людей; ущерб, вызванный разрушением экосистем; ущерб из-за истощения природных ресурсов.

На втором этапе расчета производят характеризацию вредных воздействий путем перемножения величин материальных потоков на соответствующие коэффициенты характеристики, и сложения полученных величин по выделенным категориям ущерба, в результате чего получают три величины.

Следующие два этапа расчета: нормализация и оценка значимости негативных воздействий заключаются в умножении величин, полученных на предыдущем этапе расчета, на соответствующие коэффициенты нормализации и весовые коэффициенты. В заключение результаты предыдущих вычислений складывают и получают значение экоиндикатора. Величина экоиндикатора измеряется в баллах. Описанная выше процедура может быть выражена следующей формулой:

$$Ei = \sum M_i k_{ch} k_n k_w, \quad (11)$$

где M_i – выброс i -го вредного вещества (расход i -го ресурса); k_{ch} – коэффициент характеристики; k_n – коэффициент нормализации; k_w – весовой коэффициент.

В методике «Экоиндикатор-99» используются коэффициенты нормализации для стран Европейского Союза. Коэффициент нормализации представляет собой величину, обратную уровню негативного воздействия на одного человека в год при существующем уровне выбросов и расходовании ресурсов на данной территории. Коэффициент нормализации рассчитывается для каждой из выделенных категорий ущерба. Очевидно, что для проведения оценок в России европейские коэффициенты не подходят из-за иной плотности населения, доли площадей, которые занимают естественные экосистемы, количества добываемых и используемых природных ресурсов. Для адаптации методики расчета экоиндикаторов для условий Российской Федерации были рассчитаны значения коэффициентов нормализации для каждой из выделенных категорий ущерба. В качестве исходной информации использовались статистические данные. Были получены следующие значения коэффициентов нормализации для категорий: здоровье людей – 100,46; разрушение экосистем – $6,073 \cdot 10^{-5}$; истощение природных ресурсов – $3,062 \cdot 10^{-5}$.

Для практического использования в конструкторских бюро рассчитаны величины экоиндикаторов для основных процессов в жизненном цикле, а также выброса отдельных загрязняющих веществ. Конструктору необходимо выполнить ряд элементарных расчетов, в результате чего он получит экспресс оценку уровня негативного воздействия разрабатываемого им изделия на окружающую среду.

Для примера можно привести экспресс-оценку силовой установки. Принято, что для изготовления силовой установки требуется 120 кг стали и 30 кг алюминия, а при эксплуатации в течение жизненного цикла она расходует 8000 кг

бензина и выбрасывает 30 кг СН, 25 кг NO_x, 350 кг СО и 26 т СО₂. Ход расчета можно проиллюстрировать следующей таблицей (см. табл. 3).

Таблица 3

Пример расчета экоиндикатора для силовой установки

Расход/Выброс, кг		Экоиндикатор, баллов/кг	Экоиндикатор, баллов
сталь	120	0,222	26,64
алюминий	30	0,564	16,92
бензин	8000	0,0887	709,6
СО	350	0,029	10,15
СН	30	0,051	1,53
NO _x	25	3,7	92,5
СО ₂	26000	0,0084	218,4
ИТОГО	—	—	1075,74

В результате расчетов получена величина экоиндикатора, равная 1075,7 балла. В случае внесения в конструкцию силовой установки каких либо изменений можно легко рассчитать новые значения экоиндикаторов и путем сравнения результатов выбрать наиболее экологически безопасный вариант конструкции. Так, например сокращение расхода топлива (а соответственно и выброса СО₂) на 30% в рассмотренном выше примере позволит снизить величину экоиндикатора на 278,4 балла.

В четвертой главе описаны математические модели образования вредных веществ в цилиндре двигателя с искровым зажиганием, а также методика построения многопараметровых экологических и экономических характеристик ДВС.

На образование токсичных веществ (главным образом СО, СН и NO) в процессе сгорания существенное влияние оказывают температура в зоне реакции и состав смеси. Поэтому в моделях сгорания, применяемых для расчета образования вредных веществ в цилиндре двигателя, необходимо учитывать факторы, влияющие на температуру и концентрацию кислорода в зоне реакции. В наибольшей степени этим требованиям отвечает многозонная модель процесса сгорания и образования NO_x, разработанная профессором В.А.Звоновым. Модель уточнена и дополнена автором, в отличие от названной выше, учитывает процессы теплообмена в цилиндре двигателя, позволяет производить расчеты для условий работы двигателя на альтернативных топливах (в частности, метаноле).

Модель основана на следующих предпосылках:

- камера сгорания разделена на N зон;
- каждая зона, в общем случае, имеет свой коэффициент избытка воздуха α_i в зависимости от среднего α по цилиндру и его среднеквадратического отклонения;

- давление во всех зонах камеры сгорания одинаково в данный момент цикла;
- топливовоздушная смесь в каждой зоне сгорает изохэнтальпно;
- несгоревшая смесь состоит из воздуха, паров топлива и остаточных газов;
- политропное сжатие и расширение каждой зоны определяют ее температуру до и после сгорания;
- состав продуктов сгорания в сгоревшей зоне находится из условия термодинамического равновесия при температуре в зоне и давлении в данный момент;
- перемешивание и теплообмен между зонами отсутствуют;
- прорыв газов через поршневые кольца не имеет места;
- теплообмен в цилиндре описывается с помощью формулы Вошни;
- количество сгоревшего топлива определяется по заданному закону сгорания.

Экспериментальные исследования, проведенные В.А.Звоновым, В.Р.Пундир, Л.Елтинге, F-Q.Zhao, Н.Нироюасу и другими доказали существование неоднородности распределения топлива в топливовоздушной смеси в камере сгорания. Для выбора закона распределения топлива внутри цилиндра двигателя было проанализировано несколько статистических законов распределения случайных величин. Результаты расчетов показали, что форма закона распределения величины коэффициента избытка воздуха незначительно влияет на результаты расчета. Погрешность расчета (по сравнению с экспериментальными данными) при использовании различных законов распределения: расхода топлива до 2,2%, концентрации NO_x – до 5,4%, CO – до 5,2%, CH – до 10%. В связи с этим предложено в дальнейшем использовать нормальный закон распределения.

Расчет образования оксидов азота производится по цепному термическому механизму, поскольку для условий сгорания топлив в двигателях с искровым зажиганием он является определяющим.

Окисление азота происходит по цепному механизму, основные реакции которого:



Определяющей является реакция (13), скорость которой зависит от концентрации атомарного кислорода.

Расчет образования NO по уравнению цепного механизма производится для каждой зоны и затем определяется средняя концентрация NO по камере сгорания. Объемная доля оксида азота в продуктах сгорания r_{NO} , образовавшихся в зоне на данном шаге расчета:

$$\frac{dr_{\text{NO}}}{d\varphi} = \frac{p \cdot 2,333 \cdot 10^7 \cdot e^{\frac{-38020}{T}} \cdot r_{\text{N}_2\text{eq}} \cdot r_{\text{Oeq}} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_{\text{NO}}}{r_{\text{NOeq}}} \right)^2 \right]}{RT \cdot \left(1 + \frac{2346}{T} \cdot e^{\frac{3365}{T}} \cdot \frac{r_{\text{NO}}}{r_{\text{O}_2\text{eq}}} \right)} \cdot \frac{1}{\omega}, \quad (15)$$

где p – давление в цилиндре, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К); T – температура газов в данной зоне, К; φ – угол поворота коленчатого вала, рад; ω – угловая скорость коленчатого вала, рад/с; r_{NOeq} , $r_{\text{N}_2\text{eq}}$, r_{Oeq} , $r_{\text{O}_2\text{eq}}$ – равновесные концентрации оксида азота, молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода при текущих значениях давления в цилиндре и локальной температуры в зоне, соответственно. Равновесные концентрации компонентов (O , O_2 , H , H_2 , OH , H_2O , CO , CO_2 , N , N_2 , NO , NO_2) определяются на каждом шаге расчета для каждой зоны продуктов сгорания.

В двигателях внутреннего сгорания образование оксида углерода может происходить при сгорании топлива в условиях недостатка кислорода, а также вследствие диссоциации диоксида углерода при высоких температурах. Диссоциация происходит по реакции:



Многочисленные исследования процессов сгорания в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания показали, что концентрация оксида углерода превышает равновесную при температуре отработавших газов на выпуске. Этот факт объясняют влиянием кинетики процессов образования и окисления CO , а также неоднородностью состава горючей смеси внутри цилиндра и различием состава смеси в отдельных цилиндрах многоцилиндрового двигателя. Значит, модель образования оксида углерода должна учитывать кинетику химических процессов и неоднородность состава смеси в цилиндре двигателя.

Изменение концентрации CO в цилиндре двигателя можно представить как разность концентрации вновь образовавшегося и окислившегося оксида углерода:

$$\frac{dC_{\text{CO}}}{dt} = \frac{dC_{\text{COfo}}}{dt} - \frac{dC_{\text{COox}}}{dt}, \quad (17)$$

где C_{CO} – концентрация CO , моль/см³; t – время; индекс «fo» обозначает образование, а «ox» – окисление CO .

Скорости реакций образования и окисления CO , соответственно:

$$K_{\text{fo}} = 2,5 \cdot 10^{12} \cdot e^{\left(\frac{-199386}{RT} \right)} r_{\text{COeq}} r_{\text{O}_2\text{eq}}, \quad (18)$$

$$K_{\text{ox}} = 2,26 \cdot 10^{10} \left(\frac{T}{298} \right)^{1,55} \cdot e^{\left(\frac{3342}{RT} \right)} r_{\text{COeq}} r_{\text{OHeq}}, \quad (19)$$

где $r_{CO_{eq}}$, $r_{OH_{eq}}$, $r_{O_{2,eq}}$ – равновесные концентрации оксида углерода, гидроокисла и кислорода при текущих значениях давления в цилиндре и локальной температуры в зоне, соответственно.

Скорость изменения концентрации CO (r_{CO}) по углу поворота коленчатого вала двигателя будет выражаться формулой:

$$\frac{dr_{CO}}{d\varphi} = \frac{P(K_{fo} + K_{ox})}{TR \cdot 10^6} \left(1 - \frac{r_{CO_{eq}}}{r_{CO}} \right) \frac{1}{\omega}. \quad (20)$$

Для оценки достоверности модели был проведен расчет концентрации CO в отработавших газах одноцилиндрового отсека карбюраторного двигателя Ч8,3/11,4 при использовании в качестве топлива бензина и метанола. Результаты расчетов показывают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными (см. рис. 2). Необходимо отметить, что степень негомогенности горючей смеси оказывает значительное влияние на концентрацию оксида углерода в отработавших газах, особенно для состава смеси близкого к стехиометрическому. Для этого случая различия в концентрациях могут достигать нескольких раз, что особенно актуально при проведении расчетов современных двигателей с впрыском, работающих на стехиометрических смесях.

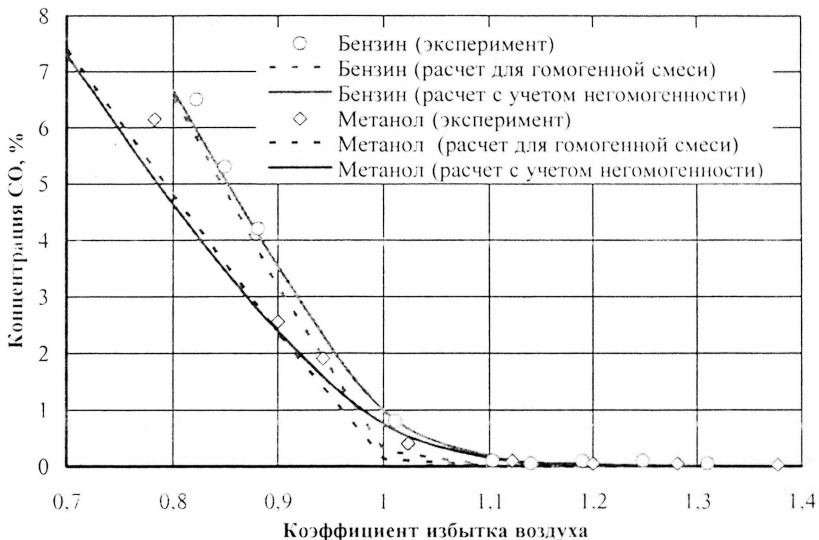
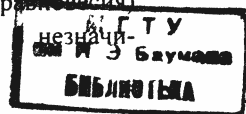


Рис. 2. Концентрация CO в отработавших газах двигателя 1Ч8,3/11,4 при работе на бензине и метаноле

В отработавших газах двигателей содержится свыше двухсот различных углеводородов, в то же время теоретические расчеты (из условий равновесия) показывают, что углеводороды в отработавших газах содержатся



1668341

тельном количестве (менее 10 млн^{-1}). В действительности процессы, происходящие в цилиндре двигателя, отличаются от описываемых законами химического равновесия.

Разработанная модель образования и окисления несгоревших углеводородов в цилиндре двигателя с искровым зажиганием учитывает следующие механизмы образования: гашение пламени у стенок камеры сгорания, гашение пламени в полостях и абсорбция/десорбция углеводородов в масляной пленке на зеркале цилиндра. В модели также учтено окисление не сгоревших в процессе сгорания углеводородов. Ниже представлены основные математические зависимости, описывающие перечисленные механизмы образования и окисления углеводородов.

Поток газов (топливо-воздушной смеси) в полости или из полостей камеры сгорания, куда не может проникнуть фронт пламени, описывается зависимостью:

$$\frac{dm_n}{d\varphi} = \frac{dp}{d\varphi} \frac{V_n}{RT_n}, \quad (21)$$

где m_n – количество молей топливо-воздушной смеси в полостях камеры сгорания; T_n – температура в полостях; V_n – объем полостей. При расчетах можно ограничиться объемом между поршнем и цилиндром в зоне над первым кольцом, так как этот объем является наибольшей полостью в камере сгорания. Количество несгоревших углеводородов, которые выделяются из полостей камеры сгорания, оценивают по разности наибольшего и наименьшего количества молей m_n рабочего тела в этих полостях в течение рабочего цикла.

Процессы абсорбции/диффузии топлива в масляной пленке оценивают с помощью уравнения диффузии:

$$\frac{\partial w_{\text{TM}}}{\partial t} = D_{\text{TM}} \frac{\partial^2 w_{\text{TM}}}{\partial x^2}, \quad (22)$$

где w_{TM} – массовая концентрация топлива в пленке масла; D_{TM} – коэффициент диффузии топлива в масле; t – время; x – радиальная координата. Принимают, что в начальный момент времени в масле нет топлива. Концентрация топлива на границе масло – горючая смесь описывают законом Генри.

Поток несгоревших углеводородов из зоны гашения пламени в зону продуктов сгорания описывается зависимостью:

$$\frac{dm_{\text{зr}}}{d\varphi} = r_{\text{т}} \frac{V_{\text{зr}}(\varphi)}{V_{\text{nc}}(\varphi)} \frac{dm}{d\varphi}, \quad (23)$$

где $m_{\text{зr}}$ – количество молей топлива смеси, поступающего из зоны гашения; $r_{\text{т}}$ – доля топлива в топливовоздушной смеси; dm – количество молей топливовоз-

душной смеси, сгорающее на данном шаге расчета; $V_{\text{зг}}$ – объем зоны гашения для данного шага расчета; $V_{\text{нс}}$ – объем продуктов сгорания, образующихся на данном шаге расчета. Рассчитывают количество несгоревших углеводородов, которые покидают зону гашения в период сгорания топлива на каждом шаге расчета, а затем суммируют полученные значения.

Окисление углеводородов после окончания процесса сгорания описывается уравнением Аррениуса.

При расчетах по всем названным выше механизмам образования и окисления несгоревших углеводородов учитывается негомогенность горючей смеси в цилиндре двигателя.

Проверка адекватности модели образования и окисления несгоревших углеводородов осуществлялась путем сравнения расчетных данных с результатами испытаний одноцилиндрового двигателя 1Ч8,3/11,4. Сопоставление данных производилось при работе двигателя на бензине и метаноле. Было отмечено, что, если проводить расчеты без учета негомогенности смеси, то в диапазонах состава смеси $\alpha < 0,9$ и $\alpha > 1,15$ наблюдается существенное расхождение между экспериментальными и расчетными данными.

Оценка экологических и экономических показателей ДВС в ездовых циклах требует проведения расчетов расхода топлива и выбросов вредных веществ двигателем во всем диапазоне рабочих режимов. Для проведения таких расчетов разработана методика, позволяющая получать многопараметровые характеристики ДВС. В методике используется следующий алгоритм расчета.

1. Рассчитываются значения крутящего момента на валу двигателя по внешней скоростной характеристике.
2. В заданном диапазоне значений частоты вращения коленчатого вала и разрежения во впускном коллекторе рассчитываются для каждого рабочего режима расход топлива и выбросы вредных веществ.
3. Определяется диапазон изменения крутящего момента на валу двигателя для построения многопараметровой характеристики.
4. Полученные данные интерполируются в заданном диапазоне значений крутящего момента на валу двигателя.

Проверка адекватности разработанной методики расчета многопараметровых характеристик ДВС производилась по данным испытаний двигателя ВАЗ-2106 в НИЦИАМТ. В табл. 4 представлены данные о концентрациях NO_x , CO и CH в отработавших газах, полученные в результате расчетов и погрешность расчетов (p_e – среднее эффективное давление; n – частота вращения коленчатого вала). Расхождения между экспериментальными и расчетными данными по расходу топлива, концентрациям CO и NO_x не превышают 5...11%, а расхождения в определении величин концентраций CH на отдельных режимах могут достигать до 30%.

Таблица 4

Результаты проверки адекватности методики расчета многопараметровых характеристик на примере двигателя ВАЗ-2106

n, мин ⁻¹	p _e , МПа	Расчет			Погрешность расчета, %		
		NO _x , млн ⁻¹	CO, %	CH, млн ⁻¹	NO _x	CO	CH
5400	0,752	3300	1,25	2500	0,2	0,8	0,2
5400	0,55	2700	3,1	3000	1,7	-4,5	23,0
5400	0,426	3000	0,21	2400	-2,7	4,8	-6,5
5400	0,266	2600	0,17	2200	1,7	0,0	5,0
4500	0,73	3000	2,7	2300	-3,9	3,0	37,0
4500	0,637	4300	0,27	1800	-1,7	-3,7	6,6
4500	0,478	4100	0,18	2100	1,0	-5,6	2,6
4500	0,333	3100	0,1	2200	-1,4	0,1	20,6
3250	0,832	3000	1,7	2200	-1,7	1,8	18,0
3250	0,664	4000	0,22	1800	-1,2	9,1	7,3
3250	0,507	3100	0,11	1650	-3,6	0,1	27,0
3250	0,359	2100	0,11	1800	-2,6	0,1	18,4
2500	0,796	3600	0,09	1400	1,5	-11,1	7,8
2500	0,638	3300	0,09	1600	-2,8	-11,1	5,4
2500	0,498	2300	0,08	1700	0,3	0,1	0,0
2500	0,359	1500	0,08	1600	3,3	0,2	15,6
1800	0,748	2700	0,1	2000	2,5	0,0	-30,0
1800	0,634	2900	0,1	1800	-1,9	0,1	-11,2
1800	0,51	2200	0,1	1700	0,3	0,0	-1,6
1800	0,352	1500	0,08	1900	2,2	0,1	-5,5

В результате анализа математических моделей и программного обеспечения для моделирования движения автомобиля в ездовом цикле была выбрана программа «ADVISOR 2002», разработанная в Национальной лаборатории по возобновляемым энергетическим ресурсам при Министерстве энергетики США. Программа позволяет оценивать технические характеристики, расход топлива (энергии), выбросы вредных веществ в различных ездовых циклах для традиционных автомобилей, гибридных автомобилей с различными схемами включения элементов (параллельной, последовательной, смешанной), автомобилей с топливными элементами и электромобилей. В программе заложена возможность моделирования систем нейтрализации отработавших газов, как для бензиновых, так и для дизельных двигателей, учитывается фактор прогрева двигателя и нейтрализатора. Недостатком программы «ADVISOR 2002» является то, что рабочий процесс ДВС не моделируется, а в качестве исходных данных используются многопараметровые характеристики двигателя, полученные расчетным путем или экспериментально. Адекватность расчета по программе «ADVISOR 2002» была проверена путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными испытан

ний (в НИЦИАМТ) автомобиля ВАЗ-2106. Расхождения по расходу топлива не превышали 7%, а выбросам (NO_x , CO , CH) – 15%. Разработчики программы «ADVISOR 2002» проверяли ее адекватность по данным испытаний гибридных автомобилей Toyota Prius и Honda Insight и пришли к заключению, что модель дает достоверные результаты.

На основе разработанных математических моделей и методик расчета создана программа «MultiZ 2.0», которая предназначена для оценки экономических и экологических показателей двигателей с искровым зажиганием при работе на различных топливах и позволяет рассчитывать: удельный эффективный расход топлива; концентрации CO , CH , NO_x в отработавших газах; выбросы CO , CH , NO_x с отработавшими газами двигателя; многопараметровые экономические и экологические характеристики двигателей.

В пятой главе рассмотрены результаты расчетных и экспериментальных исследований процессов образования вредных веществ в цилиндре двигателя с искровым зажиганием. Расчетные исследования иллюстрируют возможности разработанных математических моделей для поиска путей снижения токсичности отработавших газов двигателей за счет применения альтернативного топлива (метанола). Экспериментальные исследования были направлены на изучение показателей двигателя при использовании испаренного метанола в качестве топлива.

Проведение экспериментальных исследований преследовало следующие цели: исследование работы системы питания двигателя испаренным метанолом и исследование показателей двигателя с искровым зажиганием при работе на испаренном метаноле.

Применение метанола является перспективным, так как имеется широкая сырьевая база для его получения, в том числе из возобновляемых ресурсов (биомассы). При нормальных условиях метанол – жидкость, что облегчает его использование на транспорте. Метанол в перспективе может применяться как топливо для топливных элементов. Использование метанола позволяет существенно сократить выбросы вредных веществ от двигателя. К недостаткам применения метанола относят токсическое действие на организм при попадании его на слизистые оболочки, а также повышенный износ двигателя из-за разрушения масляной пленки на стенках цилиндра.

Для уменьшения износа двигателя, а также улучшения экономических и экологических показателей целесообразно перед подачей метанола в двигатель его испарять. Разработана система питания двигателя испаренным метанолом с испарителем на основе волоконных пористых структур, использующим теплоту отработавших газов и жидкости из системы охлаждения. Конструкция испарителя включает три испарительных модуля, она компактна (3...4 л объема испарителя на 1 л рабочего объема двигателя), обеспечивает быстрый прогрев испарителя и устойчивую работу во всем диапазоне рабочих режимов двигателя.

Разработана методика расчета для определения конструктивных параметров испарителя применительно к конкретному двигателю. С помощью этой методики были определены размеры испарителя для системы питания двигателя МеМЗ-245, а затем был изготовлен и испытан опытный образец испарителя. Испытания показали, что при расходе отработавших газов через испаритель равном 68 кг/ч с температурой 286°C и расходе жидкости из системы охлаждения равном 760 л/ч с температурой 90°C была получена максимальная производительность испарителя – 12 кг/ч, что достаточно для обеспечения движения автомобиля в условиях Европейского ездового цикла. Время прогрева испарителя при температуре окружающей среды 17°C составило 8 минут.

Проведены экспериментальные исследования показателей двигателя МеМЗ-245 с разработанной системой подачи испаренного метанола на впуск, которые показали, что при переходе на питание метанолом и обеднении горючей смеси до $\alpha = 1,2 \dots 1,4$ возможно повышение эффективного КПД двигателя в 1,2...1,3 раза, снижение выброса оксидов азота в 2...3 раза, оксида углерода более чем в 6 раз, несгоревших углеводородов в 2...3 раза при увеличении выброса формальдегида в 2...4 раза. Результаты экспериментальных исследований использовались для проверки адекватности разработанных математических моделей.

Выполнена теоретическая оценка влияния изменения состава топлива на процессы образования вредных веществ в цилиндре двигателя. Сравнивались показатели двигателя МеМЗ-245 при работе на бензине и метаноле. (параметры режима: $P_e = 0,4$ МПа, $n = 2000$ мин⁻¹; закона сгорания: начало сгорания $\phi_0 = 342$ и продолжительность сгорания $\phi_z = 46$ град. п.к.в.).

Анализ процесса образования оксидов азота показывает, что при использовании метанола в качестве топлива происходит снижение концентраций NO_x во всех зонах камеры сгорания. Так, например, в 1 зоне к концу процесса расширения концентрация NO_x ниже в 2 раза по сравнению с бензиновым двигателем, в 25 зоне – в 2,2 раза (см. рис. 3). Концентрация NO_x в отработавших газах в 2,1 раза ниже при переходе на метанольное топливо. Причиной снижения выброса оксида азота является снижение локальных температур при сгорании метанола в сравнении с бензином на 80...120 К.

Использование метанола в качестве топлива приводит к снижению выделения оксида углерода. Наблюдается снижение концентраций СО примерно на 40% (при $\alpha = 1$) как в отдельных зонах, так и в отработавших газах. Переход на метанольное топливо сопровождается снижением выбросов несгоревших углеводородов примерно в 3 раза по сравнению с работой на бензине. Снижение концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах метанольного двигателя можно объяснить наличием кислорода в молекуле метанола, что, по-видимому, способствует более интенсивному окислению той части метанола, который попадает в зоны гашения пламени, после окончания процесса сгорания.

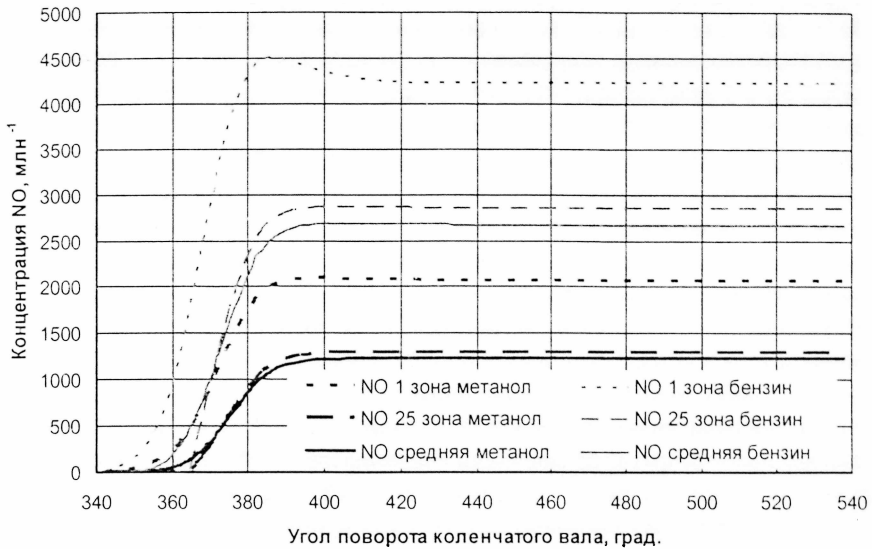


Рис. 3. Образование оксидов азота в цилиндрах двигателя при работе на бензине и метаноле

В шестой главе рассмотрены примеры оценки экологических и экономических показателей различных типов силовых установок в ездовом цикле. Для построения многопараметровых характеристик ДВС, использовавшихся при проведении расчетов, применялись разработанные математические модели и программа MultiZ 2.0. Оценка пробеговых выбросов и расхода топлива для автомобиля с различными вариантами силовых установок производилась с помощью программы «ADVISOR 2002».

Расчеты иллюстрируют возможности разработанного комплекса математических моделей при оценке показателей традиционных силовых установок, работающих на бензине и испаренном метаноле, гибридных силовых установок на базе бензиновых ДВС с последовательной и параллельной схемами включения элементов, а также для силовых установок на базе водородных топливных элементов. Показатели всех перечисленных типов силовых установок рассчитывались применительно к условиям работы на легковом автомобиле малого класса в Европейском ездовом цикле по Правилам 83 ЕЭК ООН (снаряженная масса автомобиля с грузом – 1068 кг). За базу для сравнения были выбраны рассчитанные показатели традиционной силовой установки с ДВС мощностью 54 кВт и рабочим объемом 1,3 л, распределенным впрыском и трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором: расход топлива – 7,3 л/100 км; выбросы CO – 2,6, CH – 0,29, NO_x – 0,12 г/км.

Расчеты показали, что по сравнению с базовым вариантом силовой установки использование метанола в качестве топлива позволяет снизить расход топлива на 15% (в бензиновом эквиваленте, то есть по расходу энергии), выбросы углеводородов в 3 раза, оксидов азота в 3,8 раза, оксида углерода более чем на порядок.

Применение гибридных силовых установок на базе ДВС позволяет существенно снизить расход топлива и выбросы вредных веществ в эксплуатации. Существуют несколько вариантов включения элементов силовых установок. Рассмотрены две схемы гибридных силовых установок: параллельная и последовательная. Цель проведения оценок – определение влияния схемы гибридной силовой установки на технико-экономические и экологические показатели автомобиля в Европейском ездовом цикле, то есть, оценивались показатели ДВС в различных условиях работы. В качестве примера в табл. 5 приведены результаты расчетов для параллельной силовой установки с мощностью ДВС – 35 кВт, мотор-генератора – 20 кВт и 25 модулями аккумуляторных батарей емкостью 6 Ач каждый, а также для последовательной силовой установки с мощностью ДВС – 10 кВт, тягового мотор-генератора – 55 кВт и 50 модулями аккумуляторных батарей емкостью 6 Ач каждый. Характеристики электрических машин, аккумуляторных батарей, системы управления для проведения расчетов были взяты из базы данных программы «ADVISOR 2002».

Таблица 5

Показатели автомобилей с гибридными силовыми установками
в Европейском ездовом цикле

Тип силовой установки	Расход топлива, л/100 км	Выбросы, г/км		
		CH	CO	NO _x
Параллельная	5,3	0,221	1,872	0,102
Последовательная	4,6	0,098	1,088	0,069

Анализ полученных результатов (при различном сочетании мощностей ДВС, мотор-генераторов и различной емкости аккумуляторных батарей) показывает, что применение гибридных параллельных силовых установок позволяет на 25...30% снизить расход топлива, топливная экономичность автомобиля с последовательной гибридной силовой установкой на 35...40% выше чем у автомобиля с традиционной установкой и на 10...15% выше, чем у автомобиля с параллельной гибридной силовой установкой. Использование последовательной гибридной силовой установки позволяет наряду с повышением экономичности улучшить экологические показатели. По сравнению с традиционной силовой установкой выброс CO снижается на 30...60%, NO_x – на 10...50%, CH – более чем в 2 раза.

Представляет значительный практический интерес оценка показателей автомобилей с гибридными силовыми установками на базе топливных элементов. Проведены расчеты показателей силовых установок на базе двух типов топливных элементов: работающего на водороде и использующего бензин в качестве

исходного топлива, который на борту конвертируется в водород. В результате были определены для водородного топливного элемента расход водорода – 45,1 л/100 км (что соответствует расходу 3,1 л бензина по энергосодержанию); для топливного элемента, использующего бензин расход топлива – 4 л/100 км. Можно отметить, что автомобили с гибридными силовыми установками на топливных элементах отличаются высокой экономичностью (в 1,8...2,3 раза меньший расход топлива, чем у традиционного автомобиля) при этом в случае использования водорода как топлива отсутствуют выбросы вредных веществ при работе силовой установки.

В седьмой главе приведены примеры использования комплекса разработанных математических моделей, методов расчета и программного обеспечения для оценки показателей различных типов силовых установок в полном жизненном цикле.

Проведен анализ показателей следующих типов силовых установок:

- традиционной силовой установки с бензиновым двигателем (этот вариант используется как база для сравнения);
- традиционной силовой установки с метанольным двигателем;
- гибридной силовой установки с параллельной схемой включения элементов;
- гибридной силовой установки с последовательной схемой включения элементов;
- силовой установки на базе водородного топливного элемента;
- силовой установки на базе топливного элемента, использующего водород, полученный конверсией бензина на борту автомобиля.

Было принято, что все силовые установки на базе ДВС оборудованы трехкомпонентными каталитическими нейтрализаторами.

Для проведения расчетов использовались результаты оценки показателей силовых установок в ездовом цикле, а также среднестатистические данные по расходу сырья, энергии, выбросам загрязняющих веществ в различных единичных процессах в полном жизненном цикле силовых установок. Принято, что все рассматриваемые типы силовых установок за полный жизненный цикл выполняли работу, обеспечивающую пробег автомобиля 200 тыс. км (с загрузкой автомобиля по требованиям Правил №83 ЕЭК ООН). Воздействие силовых установок на окружающую среду оценивается по экономическому ущербу и значению экоиндикатора. В расчетах учитывалось рециклирование конструкционных материалов по окончании срока службы силовой установки.

Результаты инвентаризационного анализа за полный жизненный цикл для традиционной силовой установки (принятой за базовую) представлены на рис. 4.

Общие результаты оценки полного жизненного цикла традиционной силовой установки можно представить следующим образом. Расход сырья за полный жизненный цикл составляет 20975 кг. Наибольшая доля в расходуемых ре-

сурсах приходится на нефть – около 65%. Расход энергии за ПЖЦ составляет 899762 МДж, при этом на долю полезной работы приходится около 10%. Наибольшее количество энергии потребляется на стадии эксплуатации – около 62%, в том числе при работе силовой установки – около 54%. Количественная оценка воздействия силовой установки на окружающую среду показала, что ущерб от загрязнения атмосферы составил 17306 руб. (25235 руб. с учетом выброса CO₂), величина экоииндикатора – 2318 баллов. Проведен анализ влияния различных факторов на показатели традиционной бензиновой силовой установки в полном жизненном цикле, который позволил выявить наиболее значимые из них.

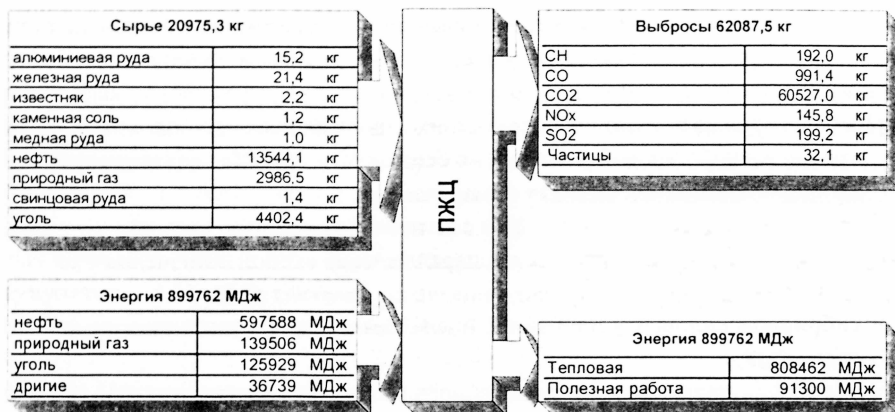


Рис. 4. Результаты инвентаризационного анализа полного жизненного цикла традиционной силовой установки

Наибольший вклад в ущерб составляют процессы движения силовой установок и получения моторных топлив. Если рассмотреть вклад загрязняющих веществ (с учетом выброса CO₂), то наибольший вклад в ущерб за полный жизненный цикл вносят выбросы оксидов азота, диоксида углерода и оксида серы – 32, 31 и 27%, соответственно. Наибольший вклад в воздействие на окружающую среду, оцененное по методике экоииндикаторов, оказывают выбросы неорганических вредных веществ, приводящие к возникновению респираторных заболеваний и выброс газов, способствующих глобальному потеплению – 48 и 22%, соответственно. Расход запасов ископаемых топлив приводит примерно к 28% негативного воздействия.

Сравнительное исследование показателей бензиновой и метанольной силовых установок (при условии получения метанола из природного газа) позволяет сделать заключение, что применение метанола позволяет на 17% сократить валовой выброс загрязняющих веществ, на 5% расход природных ресурсов. Ущерб от загрязнения окружающей среды в полном жизненном цикле снижает-

ся в 2,8 раза, а с учетом выброса CO_2 – в 1,8 раза. Основные результаты расчета представлены на рис. 5.

Исследования полного жизненного цикла гибридных силовых установок в сравнении с традиционной показали, что в зависимости от применяемой схемы (параллельной или последовательной) возможно сократить расход энергии и природных ресурсов на 29...46%, а ущерб, наносимый окружающей среде, на 27...56%.

Оценка по полному жизненному циклу силовых установок на базе топливных элементов в сравнении с традиционной показала, что применение водорода, полученного электролизом воды (с КПД равном 70%) в стационарных условиях в качестве топлива, приводит к уменьшению расхода энергии на 5% при снижении ущерба от загрязнения воздуха в 13 раз, а использование бензина в качестве первичного топлива для получения водорода позволяет сократить затраты энергии на 47% и уменьшить ущерб примерно в 10 раз по сравнению с традиционной силовой установкой.

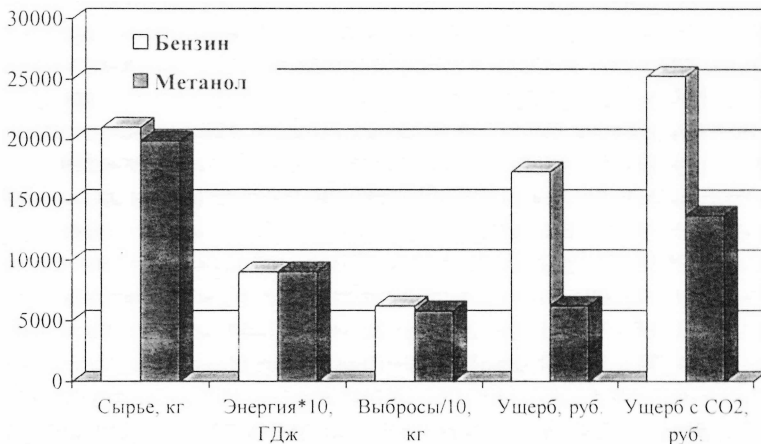


Рис. 5. Основные результаты оценки по полному жизненному циклу ДВС, работающего на бензине и метаноле

Приведенные примеры показывают, что оценка силовых установок на базе ДВС с искровым зажиганием может производиться полностью на основе разработанных моделей, а для оценки других типов ДВС или альтернативных источников энергии необходимы экспериментальные данные по расходу топлива и выбросам вредных веществ при работе силовой установки. Комплекс разработанных математических моделей, методов расчета и программного обеспечения позволяет производить оценку показателей в полном жизненном цикле, как существующих типов силовых установок, так и перспективных вариантов, в том числе на основе альтернативных источников энергии, таких как топливные элементы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ проблемы снижения негативного воздействия силовых установок на окружающую среду показал, что при выборе направлений усовершенствования конструкций и технологических процессов необходимо учитывать их показатели в полном жизненном цикле. В результате анализа определены требования к математическим моделям и методам расчета показателей силовых установок в полном жизненном цикле.

2. Предложена методология функционального моделирования жизненного цикла силовых установок, позволяющая наглядно представить материальные и энергетические взаимодействия между единичными процессами и стадиями жизненного цикла, что существенно упрощает построение соответствующих математических моделей. Методология может применяться также для анализа жизненного цикла различных видов промышленной продукции.

3. Разработана математическая модель материальных и энергетических потоков в полном жизненном цикле силовой установки автомобиля. Модель на основе законов сохранения массы и энергии описывает 12 единичных процессов, объединенных в 3 основные стадии жизненного цикла: производство, эксплуатация и переработка. Модель и разработанная на ее основе компьютерная программа «CarLCA 2.5» позволяют производить оценку расхода природных ресурсов, энергии, а также выбросов вредных веществ для единичных процессов, стадий и полного жизненного цикла силовой установки. Разработанные математическая модель и программное обеспечение при минимальной доработке могут быть использованы для оценки полного жизненного цикла силовых установок других типов (например, стационарных), автомобилей и их компонентов.

4. На основе анализа отечественной и зарубежной информации создана инвентаризационная база данных по расходу сырья, топлива, энергии и выбросам вредных веществ в полном жизненном цикле силовых установок. Собранные данные охватывают следующие процессы: производство конструкционных и эксплуатационных материалов; получение моторных топлив и электроэнергии; изготовление деталей и узлов, сборка силовых установок, их работа и техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт; рециклирование и утилизацию материалов. Разработанная база данных может быть использована для проведения оценок показателей как традиционных, так и новых, в том числе гибридных силовых установок, а также других видов продукции машиностроения.

5. Путем сравнения результатов расчета ущерба по «Временной методике определения предотвращенного экологического ущерба» с результатами оценки ущерба по европейской методике «ExternE» доказана достоверность отечественной методики и сделан вывод о необходимости учета при оценке полного жизненного цикла ущерба от выброса парниковых газов. Разработаны рекомендации по выбору величин показателя опасности загрязнения атмосферы над различными территориями и поправки, учитывающей характер рассеивания

примесей в атмосфере для оценки единичных процессов в полном жизненном цикле силовых установок. На основе европейской методики «Экоиндикатор-99» предложена адаптированная для расчета жизненного цикла силовых установок в условиях Российской Федерации методика расчета экоиндикаторов, которая учитывает следующие категории воздействия: здоровье людей, разрушение экосистем, истощение природных ресурсов. Для облегчения проведения экспресс оценок уровня негативного воздействия силовых установок на окружающую среду на ранних стадиях проектирования рассчитаны таблицы значений экоиндикаторов для основных производственных процессов (получение и обработка материалов, получение топлив и электроэнергии), а также выбросов основных загрязняющих веществ.

6. Разработана комплексная многозонная математическая модель рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием и процессов образования оксидов азота, оксида углерода и несгоревших углеводородов в цилиндре двигателя для оценки расхода топлива и выбросов вредных веществ силовой установкой автомобиля во всем диапазоне рабочих режимов. Многозонная математическая модель процессов образования и окисления оксида углерода учитывает кинетику реакций с участием СО и описывает эффект «закалки» концентрации СО при температурах 1400 – 1800 К. Также модель позволяет учитывать степень негомогенности горючей смеси в цилиндрах двигателя, что дает возможность адекватно оценивать выбросы СО двигателей с различными системами подачи топлива. Важной особенностью разработанной модели является возможность проведения расчетов выбросов СО от двигателей, работающих на альтернативных топливах, в частности – метаноле. Математическая модель образования несгоревших углеводородов учитывает механизмы гашения пламени у стенок цилиндра и в полостях камеры сгорания, абсорбции/десорбции топлива в масляной пленке и окисления углеводородов после окончания процесса сгорания. Модель позволяет с достаточной для практического использования точностью оценивать процессы образования и окисления углеводородов при сгорании бензина и метанола в цилиндрах двигателя с искровым зажиганием. На основе разработанных математических моделей и методик расчета разработана программа «MultiZ 2.0», предназначенная для оценки экономических и экологических показателей двигателей с искровым зажиганием при работе на бензине или метаноле.

7. Предложена методика расчета многопараметровых экономических и экологических характеристик двигателей с искровым зажиганием. Методика может быть полезна для прогнозирования многопараметровых характеристик вновь проектируемых двигателей. Проверка достоверности расчета технико-экономических и экологических показателей двигателей осуществленная путем сравнения с экспериментальными данными испытаний двигателей MeM3-245, 148,3/11,4 и BA3-2106. Различия между экспериментальными и расчетными

данными не превышают 5...11%, за исключением величин концентраций СН на отдельных режимах, где различия могут достигать 30%.

8. Результаты экспериментальных исследований работы двигателя МеМЗ-245 на бензине и испаренном метаноле (с комбинированным пористым испарителем метанола) показали, что при переходе на питание метанолом возможно повышение эффективного КПД двигателя в 1,2...1,3 раза, снижение выброса оксидов азота в 2...3 раза, оксида углерода более чем в 6 раз, несгоревших углеводородов в 2...3 раза при увеличении выброса формальдегида в 2...4 раза. Результаты экспериментов использовались для проверки адекватности разработанных математических моделей.

9. Использование разработанных математических моделей показано на примерах оценки жизненного цикла различных типов силовых установок. Рассмотрены возможности разработанного комплекса моделей и методов расчета при оценке полного жизненного цикла традиционных силовых установок, работающих на бензине и метаноле, гибридных силовых установок на базе бензиновых ДВС с последовательной и параллельной схемами включения элементов, а также для силовых установок на базе водородных топливных элементов.

10. Результаты выполненных исследований использованы в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ)», Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана, ОАО «ГАЗ», Институте проблем машиностроения НАН Украины.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1.Звонов В.А., Козлов А.В., Кутенев В.Ф. Экологическая безопасность автомобиля в полном жизненном цикле. – М.: НАМИ, 2001. – 248 с.

2.Сравнительная оценка экономической эффективности применения различных способов улучшения экологических показателей дизелей / В.Ф.Кутенев, В.А.Звонов, Г.С.Корнилов и др. // Проблемы конструкции двигателей и экология: Сб. науч. тр. НАМИ. – М., 1998. – С.152-161.

3.Анализ соотношений между ущербом от выброса вредных веществ и эконалогом на транспорт / В.Ф.Кутенев, В.А.Звонов, Г.С.Корнилов, А.В.Козлов // Проблемы конструкции двигателей и экология: Сб. науч. тр. НАМИ. – М., 1998. – С.171-178.

4.Оценка относительной агрессивности углеводородов в отработавших газах бензиновых двигателей / Ю.В.Азарова, Д.П.Панков, А.В.Козлов, Н.Я. Кузнецова // Экология двигателя и автомобиля: Сб. науч. тр. НАМИ. – М., 1998. – С. 59–62.

5.Кутенев В.Ф., Звонов В.А., Козлов А.В. Оценка экологичности конструкции автомобиля по методике полного жизненного цикла // Проблемы конструкции двигателей: Сб.науч. тр. НАМИ. – М., 1998. – С.3-11.

6.Сравнительная оценка различных типов испарителей топлива для систем питания автомобильных двигателей / В.А.Звонов, Г.С.Корнилов, А.В.Козлов, И.И.Червенчук // Проблемы конструкции двигателей: Сб. науч. тр. НАМИ. – М., 1998. – С.239-254.

7.Звонов В.А., Козлов А.В., Червенчук И.И. Результаты теплофизических испытаний испарителя метанола с комбинированным подводом теплоты // Вестн. ВУГУ. – 1999. – №1. – С.130-136.

8.Звонов В.А., Козлов А.В., Червенчук И.И. Инженерная методика расчета пористого испарителя метанола при комбинированном подводе к нему теплоты от газообразного и жидкого теплоносителей. // Автомобильные и тракторные двигатели. Межвуз. сб. научн. тр. – М.: МАМИ, 1999. – Вып. XV. – С.214-232.

9.Звонов В.А., Козлов А.В. Экологическая безопасность автотранспорта // Вестн. ВУГУ. – 1999. – №2. – С.43-52.

10.Козлов А.В. Оценка выбросов вредных веществ автомобилями в условиях эксплуатации //Автомобильная промышленность. – 1999. – №2. – С.37-40.

11.Кутенев В.Ф., Звонов В.А., Козлов А.В. Комплексная оценка уровня экологической безопасности силовой установки автомобиля в жизненном цикле // Приводная техника. – 1999. – №9/10. – С.24-28.

12.Звонов В.А., Кутенев В.Ф., Козлов А.В. Особенности оценки жизненного цикла автомобилей в России // Приводная техника. – 1999. – №11/12. – С.21-27.

13.Звонов В.А., Кутенев В.Ф., Козлов А.В. Разработка отечественной методики оценки экологической безопасности автомобилей в полном жизненном цикле // Проблемы конструкции двигателей и экология: Сб.науч. тр. НАМИ. – М., 1999. – С.61-79.

14.Звонов В.А., Козлов А.В., Теренченко А.С. Оценка альтернативных топлив по полному жизненному циклу // Проблемы конструкции двигателей и экология: Сб.науч. тр. НАМИ. – М., 1999. – С.186-194.

15.Кутенев В.Ф., Звонов В.А., Козлов А.В. Проблема рециклирования материалов при оценке конструкции автомобиля по полному жизненному циклу // Автомобильные и тракторные двигатели. Межвуз. сб. научн. тр. – М.: МАМИ, 1999. – Вып.XVI. – С.73-80.

16.Кутенев В.Ф., Звонов В.А., Козлов А.В. Проблемы повышения конкурентоспособности автомобилей на основе концепции полного жизненного цикла // Проблемы автомобильного рынка России. Сборник материалов XXIX международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров. – М., 2000. – С.48-70.

17. Kutenev V.F., Zvonov V.A., Kozlov A.V. Comparative Assessment of Ways of Methanol Using in Diesel Engines // Proceedings of XIII-th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF XIII). – Stockholm, 2000. – Part II. – 10 p.

18. Звонов В.А., Козлов А.В., Теренченко А.С. Оценка альтернативных топлив по полному жизненному циклу // Приводная техника. – 2000. – №5. – С.24-29.

19. Звонов В.А., Козлов А.В., Кутенев В.Ф. Экологическая безопасность автомобиля с учетом его полного жизненного цикла // Автомобильная промышленность. – 2000. – №11. – С.7-12.

20. Козлов А.В., Кузнецова Н.Я. Сравнительный анализ методик оценки экономического ущерба от выбросов вредных веществ транспортом. // Вестн. ВУГУ. – 2000. – № 4 (26). – С. 146-149.

21. Современные информационные технологии. Перспективы использования CALS в автомобилестроении / В.А.Звонов, Т.С.Лаптева, А.С.Теренченко, А.В.Козлов // Автомобили, двигатели и экология: Сб. науч. тр. НАМИ. – М., 2000. – С.184-192.

22. Козлов А.В., Кузнецова Н.Я. Экономическая эффективность двух- и трехкомпонентных каталитических нейтрализаторов с учетом уточненного значения агрессивности углеводородных соединений // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2001. – № 1. – С. 53-57.

23. Звонов В.А., Козлов А.В., Теренченко А.С. Экологическая безопасность автомобиля в полном жизненном цикле // Стандарты и качество. – 2001. – №7-8. – С.128-133.

24. Звонов В.А., Теренченко А.С., Козлов А.В. Методика проведения инвентаризации расходования сырья и энергии, выбросов вредных веществ в окружающую среду при оценке традиционных и альтернативных топлив по полному жизненному циклу // Автомобили и двигатели: Сб. науч. тр. НАМИ. – М., 2001. – С.260-271.

25. Звонов В.А., Козлов А.В. Многозонная модель рабочего процесса и образования оксидов азота в цилиндрах двигателя с искровым зажиганием // Приводная техника. – 2002. – №4. – С.39-47.

26. Звонов В.А., Козлов А.В. Модель образования оксидов азота в цилиндрах двигателя с искровым зажиганием // Автомобили и двигатели: Сб. науч. тр. НАМИ. – М., 2002. – С.69-85.

27. Козлов А.В. Математическая модель образования оксида углерода в двигателях с искровым зажиганием // Приводная техника. – 2003. – №1. – С.13-20.

28. Козлов А.В. Экологическая модель ДВС с искровым зажиганием // Автомобильная промышленность. – 2003. – №4. – С.12-15.

29. Звонов В.А., Козлов А.В., Теренченко А.С. Оценка жизненного цикла – основа совершенствования АТС // Автомобильная промышленность. – 2003. – №11. – С.9-11.

30. Звонов В.А., Козлов А.В. Оценка экологической безопасности продукции по методике экоиндикаторов // Приводная техника. – 2003. – №6. – С.22-29.

