

По результатам оптимизации в выбранных точках, с использованием интерполяции, были построены поля оптимальных параметров в рабочем диапазоне режимов дизеля, так на рис. 3. представлено поле давления впрыска. Аналогично построены поля продолжительности и опережения впрыскивания (рис. 4).

Полученные результаты позволяют сформировать программы оптимального управления топливоподачей. В данном случае они были получены для достижения минимума загрязнения воздуха. При постановке других целей, например, достижения наилучшей экономичности, результаты будут другими. Однако и те и другие цели могут обеспечиваться на одном объекте при смене программ управления.

В заключение следует отметить, что для практической работы потребуется обработать более 12...14 точек, но затраты времени даже трудно сравнивать с затратами на натурные испытания. Приведенные результаты отражают работу на установившихся режимах. Формирование программ управления переходными режимами – отдельная тема разговора. Предложенный метод допускает автоматизацию, в этом случае заменить такой подход в плане оперативности получения алгоритма управления не может никакая другая методика решения задачи. Применимость результатов обусловлена апробацией и достоверностью математической модели, эксплуатируемой и совершенствуемой на протяжении 20 лет. Полученные результаты использованы также для нужд проектирования ГНВД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuleshov A.S.: "Model for predicting air-fuel mixing, combustion and emissions in DI diesel engines over whole operating range", SAE Paper No. 2005-01-2119, 2005.
2. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с., ил.

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК АВТОМОБИЛЕЙ В ПОЛНОМ ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ

Козлов А.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

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.

Разработана математическая модель материальных и энергетических потоков в полном жизненном цикле силовой установки автомобиля. 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 (пер-

вого) 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).

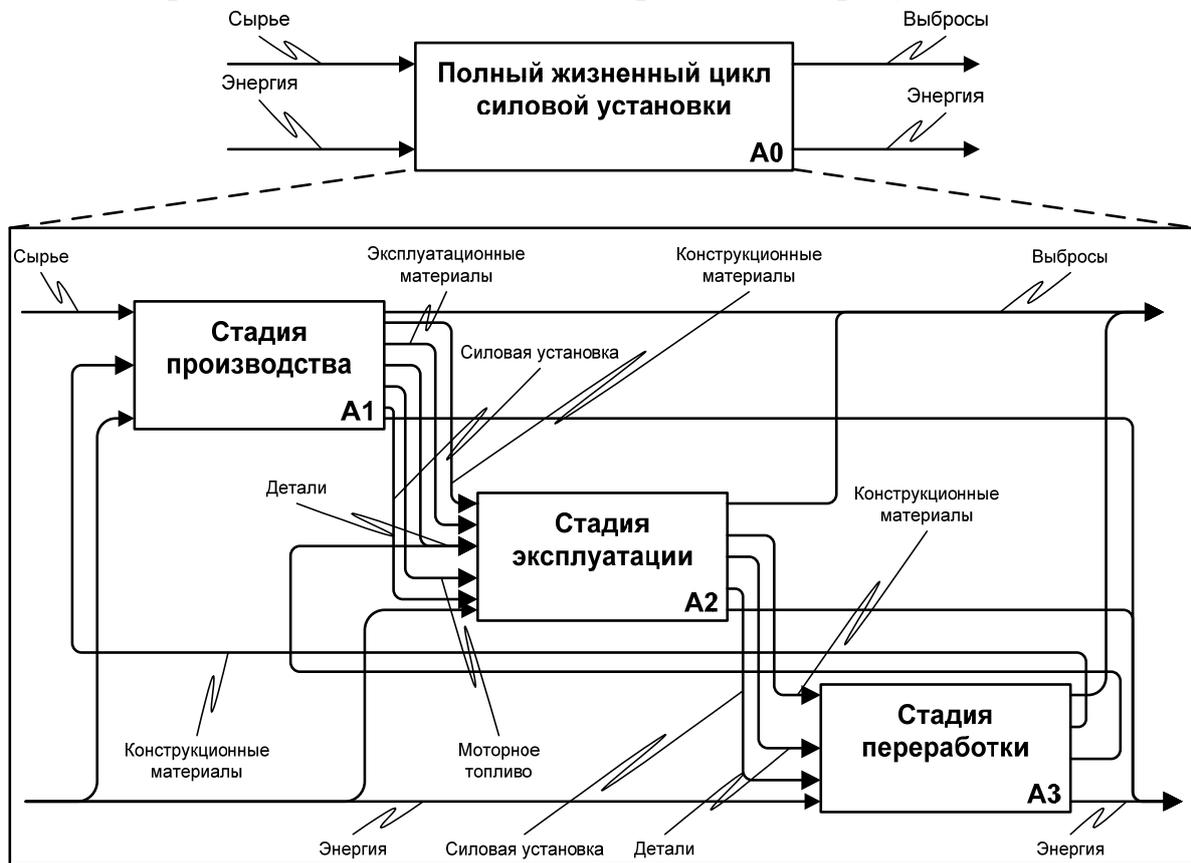


Рис. 1. Принцип построения функциональной модели полного жизненного цикла силовой установки

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 таблице.

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.	Пере- работ-	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:

$$M_{\text{раб},k}^{\text{топл}} = \sum_k L_{\text{нжц}} g_k^{\text{раб}}, \quad (4)$$

где $L_{\text{нжц}}$ – 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:

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

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 сило-

вой 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.

Для оценки ущерба, наносимого окружающей среде вследствие выбросов вредных веществ, разработана соответствующая методика. 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:

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

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.

На основе математической модели материальных и энергетических потоков в полном жизненном цикле силовой установки и методики оценки ущерба окружающей среде 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.

С помощью разработанной программы «CarLCA 2.5» 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. В расчетах учитывалось рециклирование конструкционных материалов по окончании срока службы силовой установки.

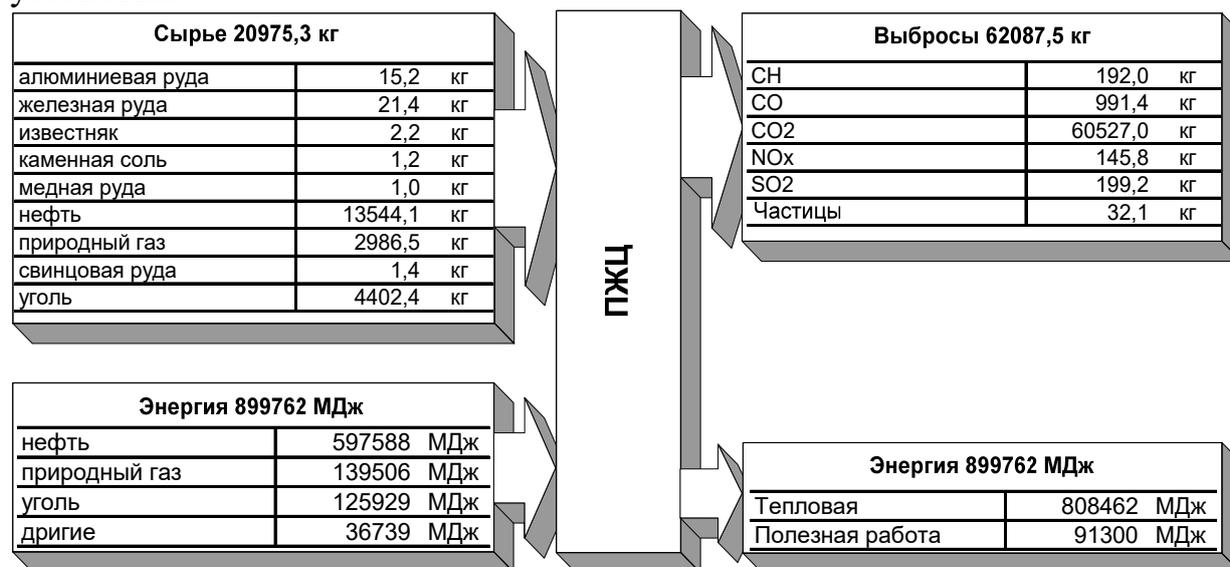


Рис. 2. Результаты инвентаризационного анализа полного жизненного цикла традиционной силовой установки

Результаты инвентаризационного анализа за полный жизненный цикл для традиционной силовой установки (принятой за базовую) представлены на рис. 2.

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 ресурсах 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). Проведен анализ влияния различных факторов на показатели традиционной бензиновой силовой установки в полном жизненном цикле, который позволил выявить наиболее значимые из них.

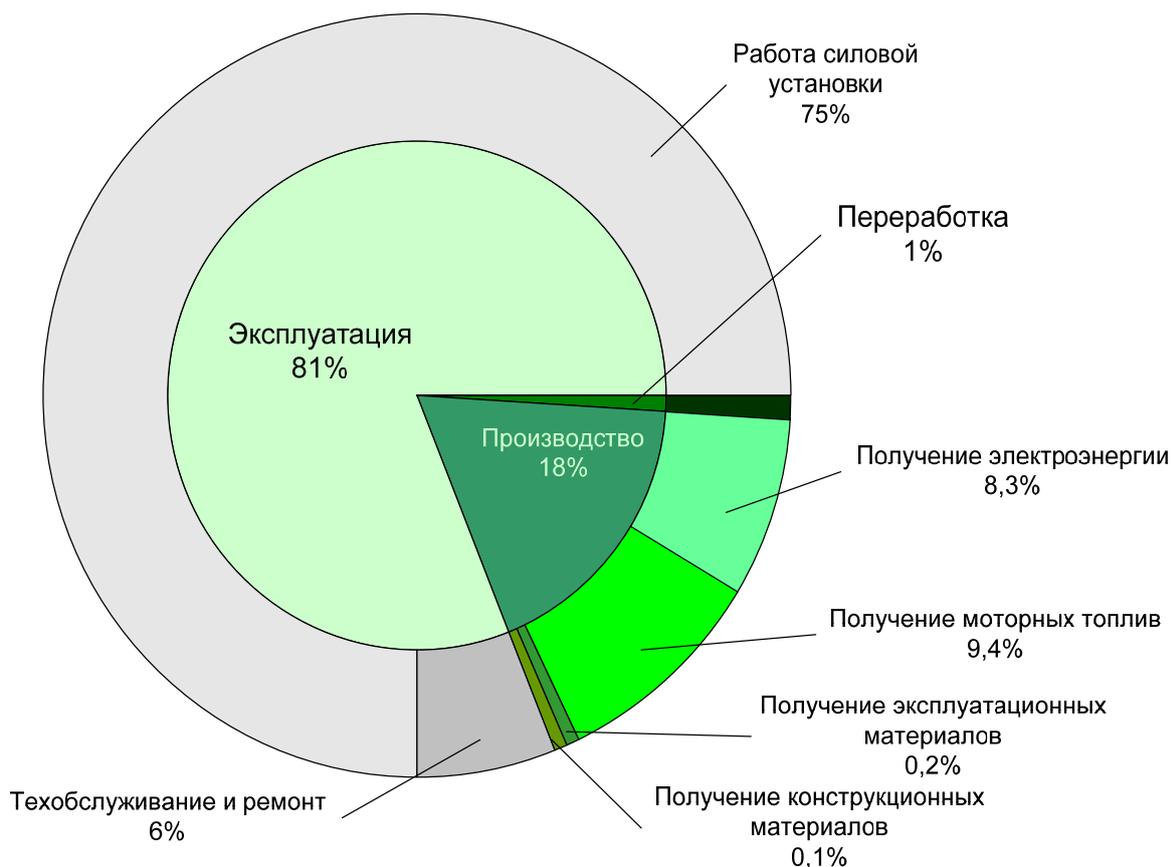


Рис. 3. Вклад отдельных стадий и единичных процессов в ущерб за полный жизненный цикл

Наибольший вклад в ущерб составляют процессы движения силовой установки и получения моторных топлив (см. рис. 3). Если рассмотреть вклад загрязняющих веществ (с учетом выброса CO_2), то наибольший вклад в ущерб за полный жизненный цикл вносят выбросы оксидов азота и диоксида углерода – 32 и 31%, соответственно.

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 снижается в 2,8 раза, а с учетом выброса CO_2 – в 1,8 раза. Основные результаты расчета представлены на рис. 4.

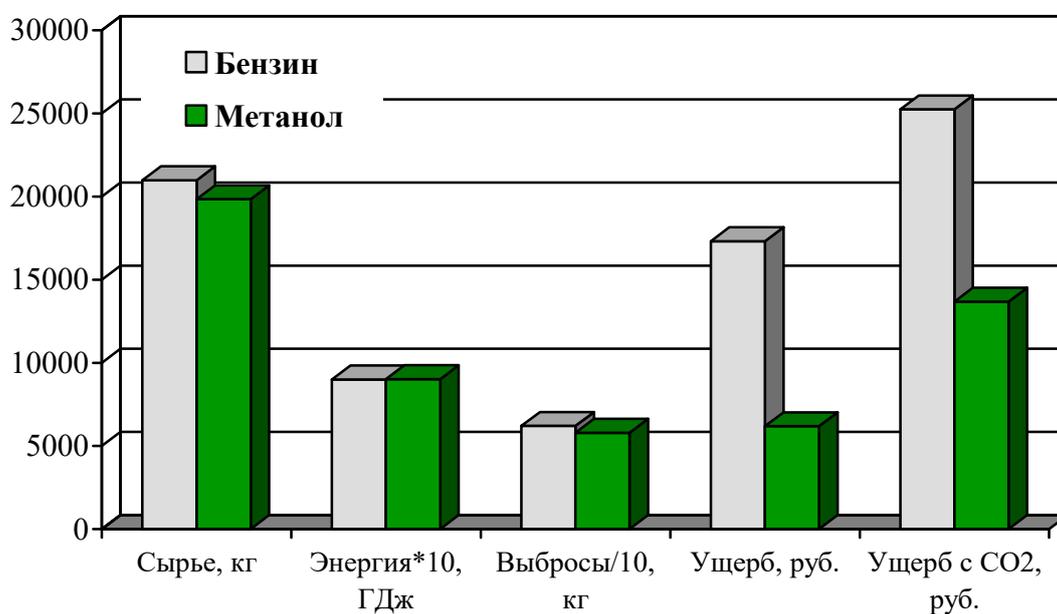


Рис. 4. Основные результаты оценки по полному жизненному циклу ДВС, работающего на бензине и метаноле

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 водо-

рода позволяет сократить затраты энергии на 47% и уменьшить ущерб примерно в 10 раз по сравнению с традиционной силовой установкой.

Приведенные примеры показывают, что 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.

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ОКСИДОВ АЗОТА В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Толшин В.И.

Московская государственная академия водного транспорта, г. Москва

Известно, что оксиды азота образуются в локальных зонах КС с высокой температурой, имеющих место, прежде всего, в фазе кинетического сгорания, когда концентрация кислорода и испарившегося топлива в этих зонах обеспечивает резкий подъем давления и температуры. Поэтому рост жесткости процесса сопровождается повышенной концентрацией NO_x в ОГ дизеля. В камерах сгорания высокооборотных автомобильных дизелей отвод теплоты от локальных зон увеличивается благодаря вихреобразованию и первое место по вредности могут занимать токсичные составляющие CN и CO . В камерах сгорания малооборотных и среднеоборотных судовых дизелей процессы отвода теплоты от локальных зон не столь интенсивны, как в многооборотных автомобильных дизелях, и поэтому первое место по вредности занимают оксиды азота.

Точные методы расчета выбросов оксидов азота с учетом температуры, характера и расположения локальных зон с точки зрения использования их для оценки токсичности дизеля в условиях эксплуатации являются сложными, так как для осуществления расчетов по этим методам необходимо большое количество исходных данных. В частности, необходимо иметь сведения по параметрам топливной аппаратуры, камеры сгорания и необходимо провести расчет смесеобразования. Эти методы целесообразно использовать на заводах - изготовителях дизелей при проектировании и доводке дизелей.

В ряде случаев, например для контроля оксидов азота на борту судна или для их приближенной оценки при расчетах, могут использоваться менее трудоемкие упрощенные методы, которые рассматриваются ниже.

Теоретическое обоснование упрощенного метода оценки оксидов азота в отработавших газах судовых дизелей изложено в (1).