На правах рукописи

МИРЕНКОВА Елена Александровна

УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК, РАБОТАЮЩИХ НА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА

05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации - Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ».

Научный руководитель:	Доктор технических наук, доцент **Козлов Андрей Викторович** (ФГУП «НАМИ»)
Официальные оппоненты:	**Ерохов Виктор Иванович** д.т.н., профессор, профессор кафедры «Экологическая безопасность технических систем», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»
	Савастенко Андрей Александрович к.т.н., доцент, доцент кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
Ведущая организация:	**Инженерная академия ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»**

Защита состоится «27» ноября 2019 г. в 15 ^{00} часов
на заседании диссертационного совета Д 217.014.01 при ФГУП «НАМИ» по адресу: 125438, г. Москва, Автомоторная ул., д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте www.nami.ru по ссылке: http://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу, ученому секретарю диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru

Автореферат разослан «24» сентября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент — Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время совершенствование силовых установок автотранспортных средств (АТС) чаще всего связано с применением новых конструкторских решений, материалов, технологий и использованием альтернативных топлив (природного газа, биотоплив, водорода и т.д.), электропривода в сочетании с электроаккумуляторами или водородными топливными элементами. Для Российской Федерации по экономическим, экологическим, ресурсным и техническим критериям целесообразной альтернативой традиционным нефтяным моторным топливам является природный газ как таковой и полученные из него иные моторные топлива (к примеру, метанол, диметиловый эфир и др.).

Замена нефтяных моторных топлив альтернативными, полученными из природного газа, позволяет не только повысить энергетические показатели силовых установок, но и уменьшить отрицательное воздействие на окружающую среду путем уменьшения парникового эффекта и выбросов токсичных веществ в отработавших газах АТС, а также обеспечить безопасность населения и низкие затраты в эксплуатации. Этому способствует и законодательное обеспечение Российской Федерации, а именно, введение мер стимулирования перевода транспорта на использование природного газа, путем принятия федеральных законов («Об охране окружающей среды», «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности …» и др.), стратегий (Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2030 г., Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. и др.) и государственных программ развития АТС в направлении энергоэффективности и экологической безопасности («Развитие энергетики», «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» и пр.).

Немаловажным остается тот факт, что переход на альтернативные топлива, полученные из природного газа, должен подразумевать комплексный подход. Ведь при использовании альтернативных топлив всегда важно оценить их влияние на энергетические, экологические и экономические показатели силовых установок АТС не только на стадии использования моторного топлива, но и с учетом стадии его получения и др., т.е. в полном жизненном цикле. Для проведения оценки данных показателей на каждой стадии и в полном жизненном цикле в целом, требуется создание комплекса математических моделей и комплексной методики оценки, которая позволит получить технико-эколого-экономический эффект от применения различных альтернативных моторных топлив, полученных из природного газа. Несмотря на высокий уровень технического развития в данной области, в настоящий момент такие исследования не проводились.

Таким образом, актуально и необходимо проведение комплексного исследования, направленного на определение наилучших способов использования природного газа и полученных из него иных альтернативных моторных топлив на автотранспорте в полном жизненном цикле: от добычи природных ресурсов, включая использование силовых установок в составе АТС,

до их утилизации, и на оценку влияния данных топлив на энергетические, экологические и экономические показатели силовых установок.

Цель исследования - разработка комплексной методики оценки эффективности силовых установок, работающих на различных альтернативных топливах, полученных из природного газа, в полном жизненном цикле, для улучшения их энергетических, экологических и экономических показателей.

Задачи исследования:

1. Анализ отечественного и мирового опыта, стандартов в области оценки полного жизненного цикла продукции и топлив.
2. Разработка комплекса математических моделей полного жизненного цикла силовых установок, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа: компримированном и сжиженном природном газе (КПГ, СПГ), метаноле, диметиловом эфире (ДМЭ), синтетическом дизельном топливе (ДТ) и водороде.
3. Сбор и анализ инвентаризационных данных и проведение расчетных исследований показателей силовых установок в полном жизненном цикле при использовании альтернативных моторных топлив, полученных из природного газа, для сравнительной оценки и выбора наиболее перспективных видов моторных топлив по критериям энергетической эффективности и уровню загрязнения окружающей среды токсичными веществами и парниковыми газами.
4. Верификация комплекса математических моделей полного жизненного цикла силовых установок, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа.
5. Разработка комплексной методики оценки эколого-экономического эффекта в полном жизненном цикле силовых установок городских автобусов, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа, и проведение расчетных исследований.

Объект исследования - силовые установки городских автобусов, работающие на традиционном и альтернативных видах моторного топлива.

Методы исследования базируются на фундаментальных физических законах, основных положениях теории двигателей. Теоретические исследования основаны на сочетании методов математической статистики и математического моделирования, анализе и синтезе.

Достоверность полученных результатов обеспечивается четкостью методологических позиций и использованием комплекса современных теоретических методов, применяемых в работе. Достоверность полученных результатов подтверждается верификацией данных математического моделирования по разработанным моделям в сравнении с результатами расчетных оценок из различных источников.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Создан комплекс математических моделей единичных процессов, стадий и полного жизненного цикла в целом силовых установок, использующих различные альтернативные моторные топлива, полученные из природного газа. Исследован вклад каждого единичного процесса, стадии в полный жизненный

цикл и их влияние на энергетические, экологические и экономические показатели силовых установок при использовании различных альтернативных топлив, полученных из природного газа.

2. Результатами расчетных исследований подтверждена целесообразность применения альтернативных моторных топлив, полученных из природного газа, для снижения выбросов токсичных веществ и парниковых газов, уменьшения расхода природных ресурсов и энергии в полном жизненном цикле.

3. Решена задача учета комплекса затрат на реализацию всех стадий полного жизненного цикла, путем разработки комплексной методики оценки эколого-экономического эффекта в полном жизненном цикле силовых установок городских автобусов, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы:

1. Разработанный комплекс математических моделей позволяет рассчитывать энергетические и материальные потоки в полном жизненном цикле силовых установок, определять расход затрачиваемых природных ресурсов, энергии, выбросы токсичных веществ и парниковых газов в окружающую среду, сравнивать различные варианты топлив и выбирать наиболее эффективные с учетом полного жизненного цикла.

2. Разработанная комплексная методика оценки эколого-экономического эффекта в полном жизненном цикле позволяет проводить оценку негативного воздействия на окружающую среду различных типов силовых установок городских автобусов и других транспортных средств, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа.

3. Результаты проведенных расчетных исследований могут быть использованы при подготовке технико-экономического обоснования применения альтернативных топлив и оценке конкурентоспособности силовых установок, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа.

На защиту выносятся:

1. Комплекс математических моделей единичных процессов, стадий и полного жизненного цикла в целом силовых установок, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа: КПГ, СПГ, метаноле, ДМЭ, синтетическом ДТ и водороде.

2. Инвентаризационные данные для различных единичных процессов в полном жизненном цикле.

3. Комплексная методика оценки эколого-экономического эффекта в полном жизненном цикле силовых установок городских автобусов, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа.

4. Результаты расчетных исследований показателей силовых установок в полном жизненном цикле при использовании альтернативных моторных топлив, полученных из природного газа.

Реализация работы. Основные положения работы используются при проведении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок, а также внедрены в практику проведения научно-исследовательских

и опытно-конструкторских работ в НТЦ ПАО «КАМАЗ» и ФГУП «НАМИ», что подтверждается актами внедрения. Диссертационная работа выполнялась в рамках проекта по теме «Создание семейств однотопливных газовых двигателей и двутопливных газодизельных двигателей на базе дизеля КАМАЗ-910 с высокими энергетическими и экономическими показателями» по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.626.21.0005 от 23.10.2017 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI62617X0005. Результаты диссертационного исследования были использованы в ряде работ ФГУП «НАМИ» при финансовой поддержке государства в лице Минпромторга России и Минобрнауки России по государственным контрактам: № 12411.0810200.20.B25 от 24.07.2012 г. шифр «ГАЗ», № 12411.0816900.20.112 от 04.06.2012 г. шифр «АВТ-12-011», № 13411.1370399.20.006 от 14.06.2013 г. шифр «Раскол», Соглашению о предоставлении субсидии: № 14.624.21.0005 от 08.09.2014 г. шифр «Нейтрализатор», уникальный идентификатор проекта RFMEFI62414X0005.

Апробация работы. Основные результаты исследования доложены и обсуждены на XII и XIII Международных Автомобильных Научных Форумах «МАНФ-2014» и «МАНФ-2016» (г. Москва, ФГУП «НАМИ», октябрь 2014 г. и 2016 г.), 88-ой Международной научно-технической конференции (далее - МНТК) (г. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, октябрь 2014 г.), 90-ой и 99-ой МНТК ААИ (г. Иркутск, ИРНИТУ, апрель 2015 г. и 2017 г.), IX и X-ой Международных научно-практических конференциях (г. Протвино, АО «НПО «Турботехника», июнь - июль 2016 г. и июнь 2017 г.), 96-ой МНТК (г. Тольятти, ОАО «АВТОВАЗ», сентябрь 2016 г.), МНТК молодых ученых (г. Могилев, Беларусь, ГУВПО «Белорусско-Российского Университета», октябрь 2016 г.), 95-ой, 100-ой и 101-ой МНТК ААИ (г. Москва, п. Автополигон, Центр испытаний НАМИ, 2016 г. и 2017 г.), МНТК «Двигатель-2017» и «Двигатель-2018» (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, январь 2017 г. и октябрь 2018 г.), XXVI-ой Международной научной конференции «Trans and MOTAUTO» (г. Бургас, Болгария, июнь 2018 г.), МНТК (г. Москва, МАДГТУ (МАДИ), январь 2019 г.), II-ой Международной конференции (г. Москва, май 2019 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, 1 статья в журнале, индексируемом в базе данных Scopus, 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка использованной литературы (99 наименований) и 1 приложения. Объем диссертационной работы изложен на 168 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц и 80 иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе исследования изучено состояние вопроса и проведен анализ перспектив использования альтернативных топлив, полученных из

природного газа, для снижения выбросов токсичных веществ и парниковых газов, уменьшения расхода природных ресурсов и энергии.

Исследовано состояние автобусного парка на природном газе в мире и в Российской Федерации, проанализирован опыт по производству АТС с двигателями, работающими на альтернативных видах топлива, полученных из природного газа.

Выявлена необходимость оценки объекта исследования в полном жизненном цикле (ПЖЦ), которая позволяет наиболее полно учитывать экологически опасные факторы производства, эксплуатации и утилизации силовых установок и топлив. Проведенный анализ показал, что автомобильная промышленность обладает многолетним и обширным опытом применения методик оценки продукции по ПЖЦ. Наиболее значимыми являются методики GREET (США), GHGenius (Канада), BioGrace (ЕС), работы зарубежных исследователей M.Q. Wang, H.-S. Huang, N.-O. Nylund, J. Ally, X. Ou и др., а также отечественные работы по оценке ПЖЦ автотранспорта под руководством В.А. Звонова, В.Ф. Кутенева, В.Н. Луканина, Ю.В. Трофименко и др.

В то же время, в современных научных публикациях недостаточно внимания уделено комплексной оценке показателей силовых установок в ПЖЦ при использовании альтернативных моторных топлив, полученных из природного газа, от добычи природных ресурсов до использования топлива на АТС и утилизации, с учетом затрат энергии, выбросов токсичных веществ и экономики его использования, а также оценки выброса парниковых газов.

В соответствии с этим определены цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей полного жизненного цикла силовых установок, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа. В диссертационной работе были приняты во внимание следующие моторные топлива: компримированный природный газ; сжиженный природный газ; метанол; диметиловый эфир; синтетическое дизельное топливо и водород. На основании анализа технологий получения и использования рассматриваемых топлив из природного газа были выделены единичные процессы в ПЖЦ для каждого вида топлива, которые объединены в стадии и включены в комплекс математических моделей.

Первым шагом при построении комплекса математических моделей являлась разработка функциональных моделей (по методологии IDEF0 применительно к анализу ПЖЦ силовых установок), которые, в свою очередь, разбиты на стадии и затем на единичные процессы. Функциональные модели визуально показывают входные и выходные материальные и энергетические потоки между единичными процессами, стадиями и ПЖЦ в целом.

На рисунке 1 представлена функциональная модель ПЖЦ силовой установки (СУ), работающей на СПГ. Аналогичные функциональные модели разработаны для каждого рассматриваемого в данной работе моторного топлива.

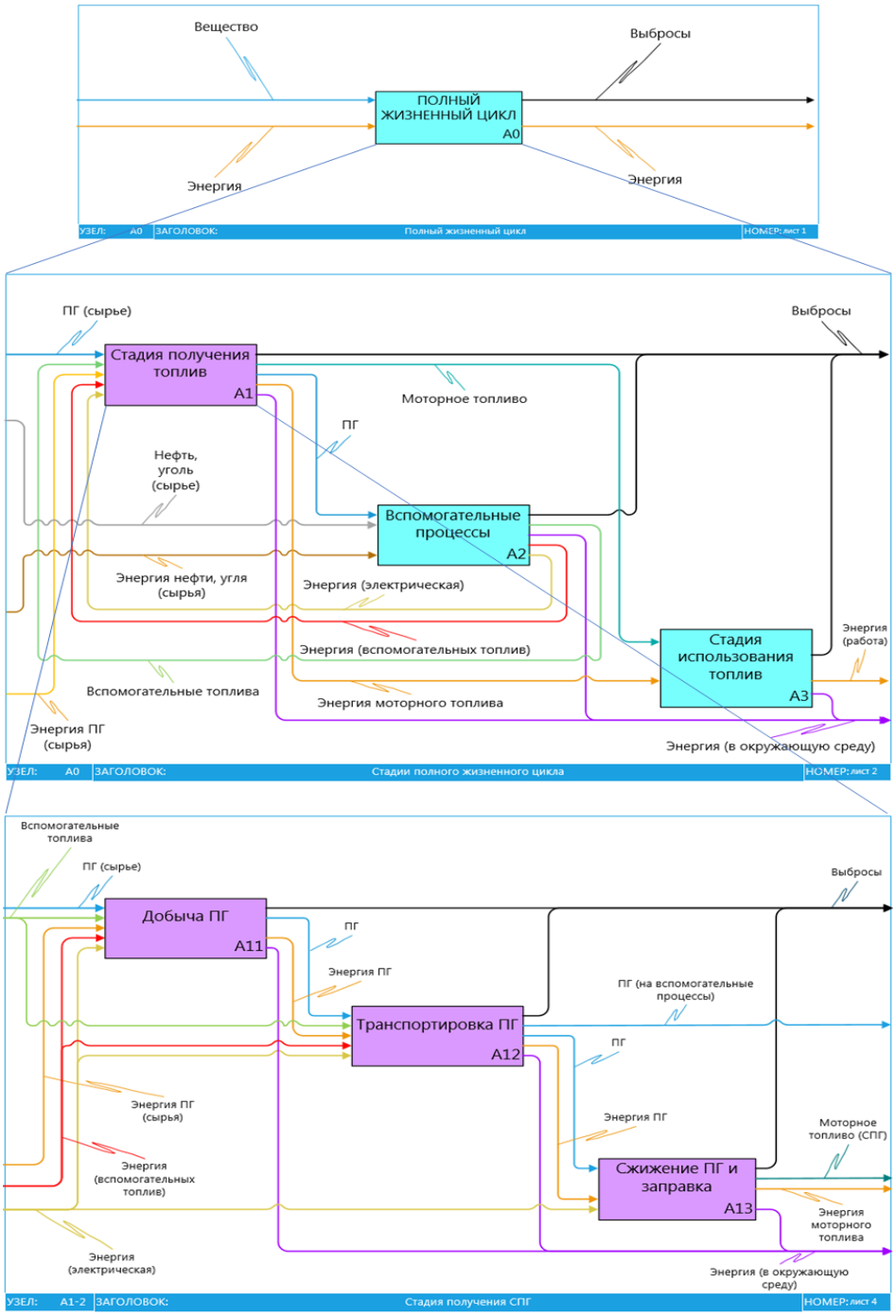

Рисунок 1 - Функциональная модель ПЖЦ СУ, работающей на СПГ

На основе созданных функциональных моделей разработан комплекс математических моделей процессов, стадий и полного жизненного цикла в целом силовых установок, использующих в качестве топлива: КПГ, СПГ, метанол, ДМЭ, синтетическое ДТ и водород. ПЖЦ силовых установок, работающих на данных топливах, включает в себя единичные процессы добычи природного газа (ПГ), его транспортировки, компримирование ПГ, сжижение ПГ, получение синтез-газа, получение метанола, диметилового эфира, синтетического ДТ, водорода, а также получение вспомогательных топлив и электроэнергии, необходимые для осуществления ПЖЦ, и процесс использования топлив, которые объединены в три стадии: получение топлив, вспомогательные процессы и использование топлив. Стадии вспомогательных процессов и

использования топлив для рассматриваемых силовых установок идентичны по функциональному моделированию и математическому описанию.

Далее представлены фрагменты математической модели ПЖЦ силовой установки, работающей на ДМЭ.

Процесс синтеза диметилового эфира

Входные потоки

Количество метанола, поступающее на процесс синтеза ДМЭ, кг:

$$M^{СМ}_{СД,метанол} = m_{СД,метанол} M^{СД}_{ИТ,ДМЭ}, \quad (1)$$

где $m_{СД,метанол}$ - удельный расход метанола на получение 1 кг ДМЭ; $M^{СД}_{ИТ,ДМЭ}$ - количество ДМЭ, поступающее на процесс использования топлив, кг (см. формулу (8)).

Тепловая энергия метанола на процесс синтеза ДМЭ, МДж:

$$E^{СМ}_{СД,метанол} = Hu_{метанол.} M^{СМ}_{СД,метанол}, \quad (2)$$

где $Hu_{метанол}$ - низшая теплота сгорания метанола, МДж/кг.

Количество природного газа, поступающее на процесс синтеза ДМЭ, кг:

$$M^{ТР}_{СД,ПГ} = \left(1 + g_{СД,ПГ}\left(\frac{1}{\eta_{СД}} - 1\right)\right) M^{СД}_{ИТ,ДМЭ}, \quad (3)$$

где $g_{СД,ПГ}$ - относительный расход ПГ на процесс синтеза ДМЭ, $\eta_{СД}$ - КПД процесса синтеза ДМЭ.

Тепловая энергия ПГ на процесс синтеза ДМЭ, МДж:

$$E^{ТР}_{СД,ПГ} = Hu_{ПГ} M^{ТР}_{СД,ПГ}, \quad (4)$$

где $Hu_{ПГ}$ - низшая теплота сгорания природного газа, МДж/кг.

Электрическая энергия на процесс синтеза ДМЭ, МДж:

$$E^{ЭЛ}_{СД,эл.эн.} = \left(\frac{1}{\eta_{СД}} - 1\right) g_{СД,эл.эн.} Hu_{ДМЭ} M^{СД}_{ИТ,ДМЭ}, \quad (5)$$

где $g_{СД,эл.эн.}$ - относительный расход электрической энергии на процесс синтеза ДМЭ; $Hu_{ДМЭ}$ - низшая теплота сгорания ДМЭ, МДж/кг.

Выходные потоки

Количество выбросов токсичных веществ в окружающую среду при осуществлении процесса синтеза ДМЭ, кг:

$$M^{СД}_{вых,ВВ} = \sum_k \sum_i \left[E^{СМ}_{СД,метанол}\left(1 - \eta_{СД}\right) g_{СД,метанол} e_{СД,k} + M^{СД}_{вых,CH_4}\right], \quad (6)$$

где $g_{СД,метанол}$ - относительный расход метанола на процесс синтеза ДМЭ, $e_{СД,k}$ - удельный выброс k-го токсичного вещества при осуществлении процесса синтеза ДМЭ, кг/МДж; $M^{СД}_{вых,CH_4}$ - выброс метана при осуществлении процесса синтеза ДМЭ, кг:

$$M^{СД}_{вых,CH_4} = e_{СД,CH_4} M^{СД}_{ИТ,ДМЭ} Hu_{ДМЭ}, \quad (7)$$

где $e_{СД,CH_4}$ - удельный выброс метана, обусловленный особенностями технологического процесса и утечками, кг/МДж.

Количество ДМЭ как моторного топлива, поступающее на процесс использования топлив, кг:

$$M_{ИТ,ДМЭ}^{СД} = Wm_{ИТ,ДМЭ} \quad , \tag{8}$$

где W - работа двигателя, кВт·ч; $m_{ИТ,ДМЭ}$ - удельный расход ДМЭ как моторного топлива на 1 кВт·ч работы силовой установки, кг/кВт·ч.

Тепловая энергия ДМЭ как моторного топлива, МДж:

$$E_{ИТ,ДМЭ}^{СД} = Hu_{ДМЭ} M_{ИТ,ДМЭ}^{СД} \quad . \tag{9}$$

Рассеивание тепловой энергии в окружающую среду для осуществления процесса синтеза ДМЭ, МДж:

$$E_{вых,эн.вОС}^{СД} = E_{СД,эл.эн.}^{ЭЛ} + E_{СД,ПГ}^{ТР}\left(1-\eta_{СД}\right)g_{СД,ПГ} \quad . \tag{10}$$

Стадия получения топлив (ДМЭ) в целом

Входные потоки

ПГ (сырья), кг:

$$M_{СПТ,ПГ}^{вх} = M_{ДО,ПГ}^{вх} \quad . \tag{11}$$

Вспомогательных топлив, кг:

$$M_{СПТ,всп.т.}^{СВП} = M_{ДО,всп.т.}^{ВТ} + M_{ТР,всп.т.}^{ВТ} \quad . \tag{12}$$

Энергии ПГ (сырья), МДж:

$$E_{СПТ,ПГ}^{вх} = E_{ДО,ПГ}^{вх} \quad . \tag{13}$$

Энергии вспомогательных топлив, МДж:

$$E_{СПТ,всп.т.}^{СВП} = E_{ДО,всп.т.}^{ВТ} + E_{ТР,всп.т.}^{ВТ} \quad . \tag{14}$$

Электроэнергии, МДж:

$$E_{СПТ,эл.эн.}^{СВП} = E_{ДО,эл.эн.}^{ЭЛ} + E_{ТР,эл.эн.}^{ЭЛ} + E_{СГ,эл.эн.}^{ЭЛ} + E_{СМ,эл.эн.}^{ЭЛ} + E_{СД,эл.эн.}^{ЭЛ} \quad . \tag{15}$$

Выходные потоки

Моторного топлива (ДМЭ), кг:

$$M_{СИТ,ДМЭ}^{СПТ} = M_{ИТ,ДМЭ}^{СД} \quad . \tag{16}$$

ПГ (на вспомогательные процессы), кг:

$$M_{СВП,ПГ}^{СПТ} = M_{ВТ,ПГ}^{ТР} + M_{ЭЛ,ПГ}^{ТР} \quad . \tag{17}$$

Токсичных веществ, в том числе утечки метана, кг:

$$M_{вых,ВВ}^{СПТ} = M_{вых,ВВ}^{ДО} + M_{вых,ВВ}^{ТР} + M_{вых,ВВ}^{СГ} + M_{вых,ВВ}^{СМ} + M_{вых,ВВ}^{СД} \quad . \tag{18}$$

Энергии моторного топлива (ДМЭ), МДж:

$$E_{СИТ,ДМЭ}^{СПТ} = E_{ИТ,ДМЭ}^{СД} \quad . \tag{19}$$

Энергии в окружающую среду, МДж:

$$E_{вых,эн.вОС}^{СПТ} = E_{вых,эн.вОС}^{ДО} + E_{вых,эн.вОС}^{ТР} + E_{вых,эн.вОС}^{СГ} + E_{вых,эн.вОС}^{СМ} + E_{вых,эн.вОС}^{СД} \quad . \tag{20}$$

Математическая модель ПЖЦ силовой установки, работающей на ДМЭ в целом

Входные потоки

Сырьевых ресурсов, кг:

$$M^{вх}_{ПЖЦ} = M^{вх}_{СПТ,ДМЭ} + M^{вх}_{СВП,сырье}. \quad (21)$$

Энергии, МДж:

$$E^{вх}_{ПЖЦ} = E^{вх}_{СПТ,ДМЭ} + E^{вх}_{СВП,сырье}. \quad (22)$$

Выходные потоки

Загрязняющих веществ, кг:

$$M^{ПЖЦ}_{вых} = M^{СПТ}_{вых,ВВ} + M^{СВП}_{вых,ВВ} + M^{СИТ}_{вых,ВВ}. \quad (23)$$

Энергии в окружающую среду, МДж:

$$E^{ПЖЦ}_{вых.эн.вОС} = E^{СПТ}_{вых,эн.вОС} + E^{СВП}_{вых,эн.вОС} + E^{СИТ}_{вых,эн.вОС}. \quad (24)$$

Энергии (полезной работы), МДж:

$$E^{ПЖЦ}_{вых,работа} = E^{СИТ}_{вых,работа}. \quad (25)$$

Аналогичные математические модели разработаны для каждого рассматриваемого в данной работе моторного топлива.

Разработанный комплекс функциональных и математических моделей ПЖЦ силовых установок, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа, является основой для проведения инвентаризационного анализа ПЖЦ. В данной главе представлена разработанная методика проведения инвентаризационного анализа ПЖЦ.

В третьей главе выполнена верификация разработанного комплекса математических моделей ПЖЦ силовых установок, а также осуществлен сбор и анализ инвентаризационных данных, изложены результаты расчетных исследований показателей силовых установок в полном жизненном цикле при использовании альтернативных топлив, полученных из природного газа. Так как выполнение прямых измерений таких показателей силовых установок как расход энергии, расход природных ресурсов, выбросы токсичных веществ и парниковых газов в полном жизненном цикле не представляется возможным, то верификация проведена путем сравнения данных математического моделирования по разработанным моделям с опубликованными данными расчетных оценок из различных источников (см. Рис. 2).

В качестве оценочного критерия для верификации полученных результатов используется среднеквадратическое отклонение.

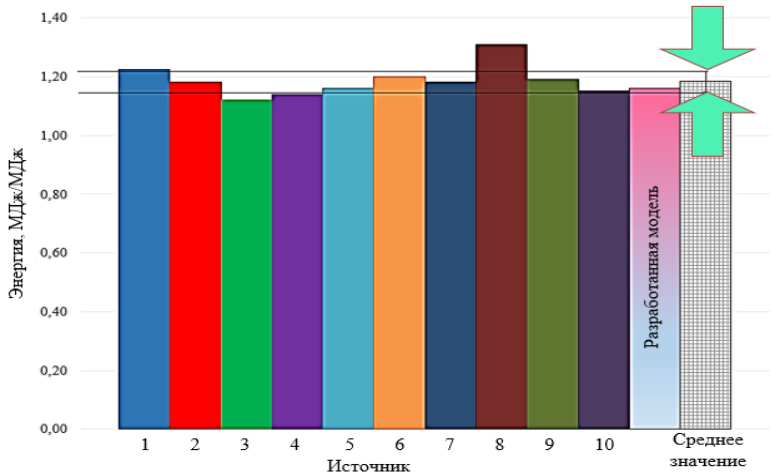

Рисунок 2 - Затраты энергии на стадии получения топлива (КПГ)

Верификация показала, что результаты расчетов укладываются в диапазон доверительного интервала по расходам природных ресурсов, расходам энергии, выбросам токсичных веществ и парниковых газов.

Для проведения расчетных исследований технико-эколого-экономических показателей силовых установок в ПЖЦ при использовании альтернативных топлив, полученных из природного газа, были определены расходы затрачиваемых природных ресурсов, расходы энергии, валовые выбросы токсичных веществ и выбросы парниковых газов в окружающую среду, а также приведенные выбросы токсичных веществ и парниковых газов как на каждой стадии ПЖЦ в отдельности, так и в целом.

В качестве объекта исследования (базового варианта для сравнения) была принята дизельная силовая установка городского автобуса ЛИАЗ номинальной мощностью рядного шестицилиндрового двигателя 176,5 кВт при 2300 мин$^{-1}$. Максимальный крутящий момент равен 900 Нм при 1300-1600 мин$^{-1}$. Использовались данные испытаний двигателя во ФГУП «НАМИ».

Помимо базового варианта, в настоящем исследовании рассматривались силовые установки, работающие на КПГ, на СПГ, по газодизельному циклу (КПГ+ДТ), на метаноле, на ДМЭ, на синтетическом ДТ, на водороде, на водороде на базе водородного топливного элемента (ТЭ). Все расчеты показателей в ПЖЦ выполнялись в пересчете на 1 кВт·ч полезной работы на валу двигателя/энергии на выходе ТЭ. Для подготовки исходных данных использовались результаты испытаний двигателей в рамках проектов «ГАЗ», «Раскол» и «Нейтрализатор».

На рисунке 3 представлены результаты расчетных исследований затрат энергии в ПЖЦ на каждой стадии.

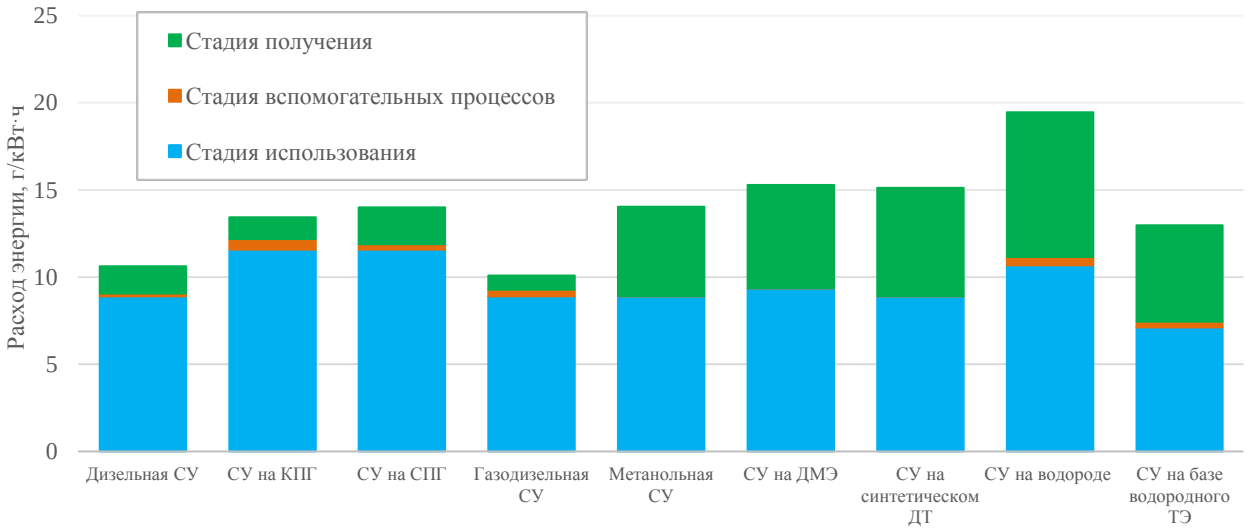

Рисунок 3 - Затраты энергии в ПЖЦ силовых установок

Из рисунка 3 видно, что наименьшие затраты энергии в ПЖЦ у СУ, работающей по газодизельному циклу (на 5% ниже по сравнению с дизельной СУ). Наибольшее количество энергии в ПЖЦ потребляется при работе водородной силовой установки (на 83% выше дизельной СУ). За ПЖЦ по всем видам рассматриваемого топлива (за исключением КПГ, СПГ и топлива для

газодизельной СУ, где расход энергии на стадии получения составляет до 15%) заметно, что большое количество энергии потребляется на стадии получения топлива - от 40% и более.

На рисунке 4 представлены результаты расчетных исследований приведенного выброса токсичных веществ за ПЖЦ.

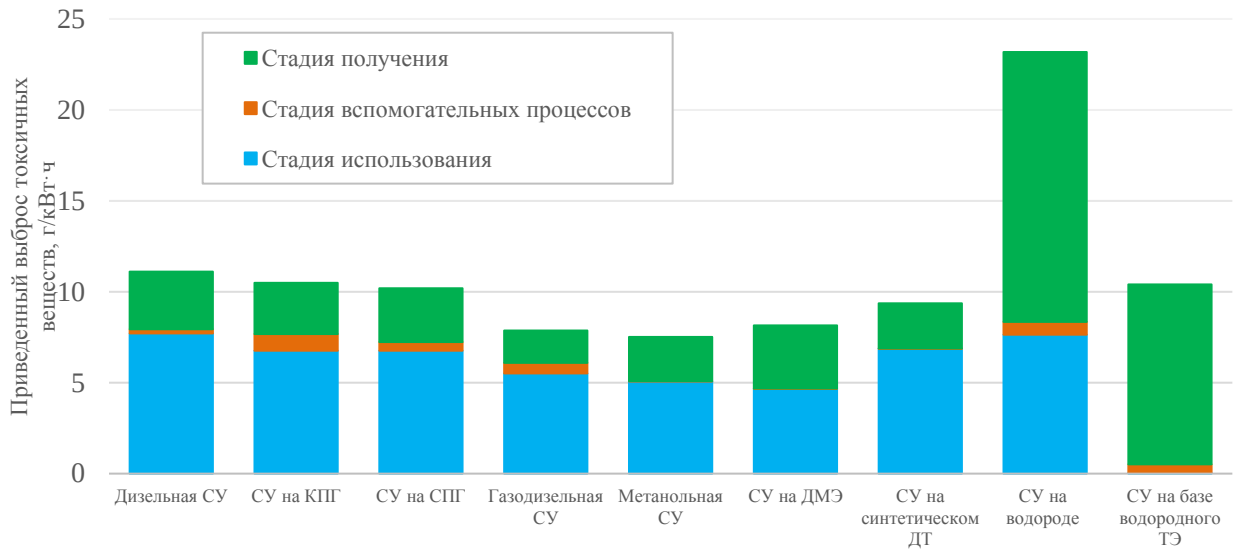

Рисунок 4 - Приведенный выброс токсичных веществ в ПЖЦ силовых установок

Из рисунка 4 видно, что в сравнении с ДТ, применение метанола в качестве моторного топлива способствует снижению приведенного выброса токсичных веществ в ПЖЦ на 32%, работа СУ по газодизельному циклу - на 29%, применение КПГ и СПГ - на 6-8%. При применении водорода в качестве топлива приведенный выброс токсичных веществ в ПЖЦ увеличивается в 2 раза по сравнению с дизельной СУ. Доля приведенного выброса токсичных веществ на стадии получения ДМЭ составляет более 40%, водорода и водородного ТЭ - более 60%. Приведенный выброс токсичных веществ у СУ, работающей на базе водородного топливного элемента, на стадии использования - нулевой.

Результаты расчетных исследований приведенного выброса парниковых газов за ПЖЦ показали, что работа СУ по газодизельному циклу обеспечивает его снижение на 19%, на метаноле - на 12%, на КПГ и СПГ - до 4% по сравнению с СУ, работающей на ДТ. При работе СУ на водороде, приведенный выброс парниковых газов за ПЖЦ выше на 57%, чем при работе на ДТ. Приведенный выброс парниковых газов у СУ, работающей на базе водородного топливного элемента, на стадии использования - нулевой.

Четвертая глава посвящена разработке комплексной методики оценки эколого-экономического эффекта в полном жизненном цикле силовых установок городских автобусов, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа (далее - Комплексная методика), учитывающей энергетические, экологические и экономические показатели.

Комплексная методика основана на Методике технико-экономической и экологической оценки эффективности мероприятий по снижению вредных

выбросов от автотранспорта, разработанной во ФГУП «НАМИ», которая позволяет провести эколого-экономическую оценку лишь на одной стадии ПЖЦ автомобиля – стадии эксплуатации, тогда как разработанная Комплексная методика позволяет провести оценку эколого-экономического эффекта по всем единичным процессам, по каждой из трех стадий в отдельности, и ПЖЦ в целом.

Разработанная Комплексная методика включает:

1. Новую разработанную методику проведения инвентаризационного анализа ПЖЦ (представлена во второй главе диссертации).

2. Усовершенствованную методику оценки негативного воздействия на окружающую среду за ПЖЦ СУ, работающих на традиционных и альтернативных топливах, основанную на «Временной методике определения предотвращенного экологического ущерба», утвержденной Государственным комитетом РФ по охране окружающей среды в 1999 г., с учетом ее адаптации для проведения расчетов применительно к автомобилям, их компонентам и топливам, выполненной во ФГУП «НАМИ» (представлена в данной главе). Воздействие оценивается путем расчета экологического ущерба от выбросов вредных веществ и парниковых газов на всех стадиях ПЖЦ СУ в атмосферу.

3. Усовершенствованную методику технико-экономической оценки ПЖЦ СУ, работающих на традиционных и альтернативных топливах, основанную на методе оценки прямых экономических затрат на стадии эксплуатации автотранспорта (представлена в данной главе). Методика позволяет рассчитывать затраты за ПЖЦ с учетом экологического ущерба, наносимого окружающей среде при осуществлении всех стадий ПЖЦ и проводить сравнительный анализ силовых установок по критерию эколого-экономической эффективности.

Совокупные затраты за ПЖЦ будут определяться по формуле:

$$З_{ПЖЦ} = З_{СУ} + З_{инф.} + \sum_{i=1}^{n}\sum^{t}(З_{т} + З_{эм} + З_{рем} + З_{хп} + З_{ут})\cdot\left(\frac{1}{(1+r)^{t}}\right), \quad (26)$$

где $З_{СУ}$ - затраты на приобретение силовой установки, руб.; $З_{инф.}$ - затраты на модернизацию инфраструктуры, руб.; $З_{т}$ - затраты на топливо, руб.; $З_{эм}$ - затраты на эксплуатационные материалы (моторное масло, консистентные смазки, охлаждающую жидкость и т.п.), руб.; $З_{рем}$ - затраты на периодическое техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт (ТОиР), руб.; $З_{хп}$ - затраты на холостые пробеги, руб.; $З_{ут}$ - затраты на утилизацию, руб.; r – ставка нормы дисконта; t – расчетный год; n – период использования, лет.

Эколого-экономический эффект в ПЖЦ при использовании силовых установок городских автобусов, работающих на различных видах моторного топлива, определяется по формуле:

$$Э = \left(\sum_{T} З^{т}_{ПЖЦ} - \sum_{T} З^{а}_{ПЖЦ}\right) + \left(\sum_{T} У^{т}_{ПЖЦ} - \sum_{T} У^{а}_{ПЖЦ}\right), \quad (27)$$

где $З_{ПЖЦ}$ – затраты на всех стадиях ПЖЦ, руб.; $У_{ПЖЦ}$ – ущерб, наносимый окружающей среде на всех стадиях ПЖЦ, руб.; T – период, включающий все этапы жизненного цикла силовой установки - от добычи природных ресурсов до

использования СУ в составе АТС и утилизации, лет; здесь и далее индексы относятся к традиционному варианту моторного топлива – *m*, альтернативному варианту моторного топлива – *a*.

Оценка эколого-экономического эффекта в ПЖЦ проводилась по разработанной Комплексной методике для силовых установок, работающих на: КПГ, СПГ, метаноле, ДМЭ, синтетическом ДТ, водороде, а также СУ, работающей по газодизельному циклу, и СУ, работающей на водороде на базе водородного ТЭ. В расчетах учтены затраты на переоборудование дизельной СУ для работы на данных видах топлива.

Срок службы силовых установок – 7 лет. Годовой пробег - 60 000 км. Периодичность смены моторного масла - 15 000 км. Затраты на утилизацию силовых установок транспортных средств категорий N3 (включая транспортные средства повышенной проходимости категории G) полной массой от 12 до 20 тонн равны 1 508 656,4 руб. По данным ГУП «Мосгортранс», затраты на ТОиР одной дизельной силовой установки составляют 242 820 руб./год, а СУ, работающей на КПГ - 385 920 руб./год, средняя ежемесячная заработная плата водителя составляет 68 783 руб.

Исходные данные для эколого-экономической оценки ПЖЦ силовых установок представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные для эколого-экономической оценки ПЖЦ

Параметр	Вид топлива / тип силовой установки									
	ДТ	КПГ	СПГ	Газодизельная СУ		Метанол	ДМЭ	Синте-тическое ДТ	Водород	СУ на базе водородного топливного элемента
				КПГ	ДТ					
Стоимость двигателя, руб.	664812	478640	478640	771320		670612	669312	664812	481640	11250000
Стоимость СНОГ, руб.	193581	111343	111343	218000		105814	105814	193581	175675	0
Эксплуатационный расход топлива,										
л/100 км	36,33	-	-	-	3,64	-	-	36,33	-	-
$м^3$/100 км	-	48,07	-	33,43	-	-	-	-	-	-
кг/100 км	-	-	34,13	-	-	65,63	47,85	-	13,12	8,76
Средний расход топлива в испыт. цикле, г/кВт·ч	209,5	231,5	231,5	161,0	21,0	445,2	324,6	209,5	89,0	59,4
Затраты на Ad-Blue в месяц, руб.	6840	-	-	-	6840	-	-	6840	6840	-
Стоимость топлива,										
руб./л	45,50	-	-	-	45,50	-	-	48,50		
руб./$м^3$	-	17,50	-	17,50	-	-	-	-	-	-
руб./кг	-	-	22,10	-	-	20,00	32,65	-	368,84	368,84
Стоимость моторного масла, руб./л	255,6	426,0	426,0	426,0		426,0	255,6	255,6	426,0	-

Для анализа экономической эффективности рассматриваемых силовых установок рассчитаны затраты по статьям и экономический эффект в целом. Для анализа экологической эффективности выполнен расчет приведенных выбросов токсичных веществ с отработавшими газами, приведенных выбросов парниковых газов и ущерб окружающей среде.

Структура затрат с учетом экологического ущерба за ПЖЦ силовых установок представлена на рисунке 5.

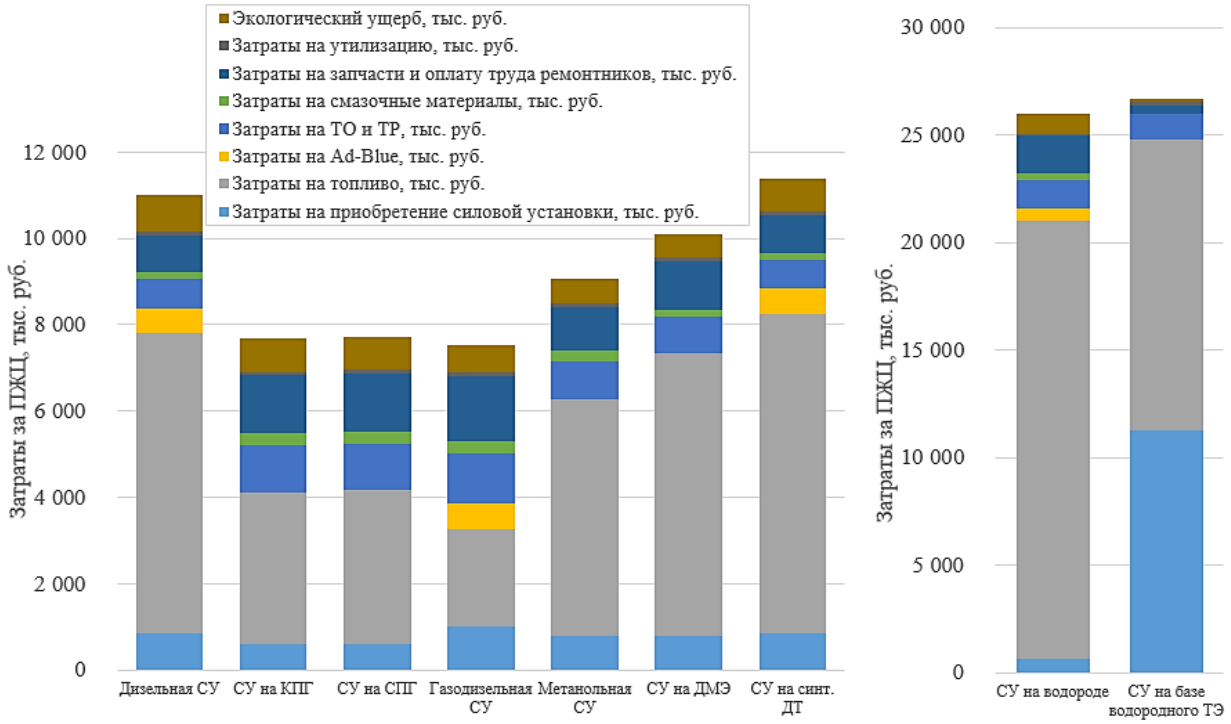

Рисунок 5 - Эколого-экономические затраты в ПЖЦ силовых установок

В сравнении с дизельной СУ, использование газодизельной СУ и СУ, работающих на КПГ и СПГ, позволяет снизить экономические затраты с учетом экологического ущерба в ПЖЦ на 32% за счет меньших (на 50-70%) затрат на топливо. Эколого-экономические затраты в ПЖЦ СУ, работающих на водороде и на водороде на базе водородных ТЭ, существенно выше остальных. Затраты на приобретение СУ на базе водородного ТЭ относительно высоки и составляют 42% от общей суммы затрат. В сравнении с дизельной СУ, экологический ущерб в ПЖЦ от СУ, работающей на базе водородных топливных элементов, ниже на 84%; от СУ, работающей на метаноле - на 33%, при работе по газодизельному циклу - на 28%, КПГ и СПГ - на 12%, тогда как при работе на водороде - выше на 10%. Результаты расчета эколого-экономического эффекта в ПЖЦ рассматриваемых силовых установок в сравнении с СУ, работающей на ДТ, представлены на рисунке 6.

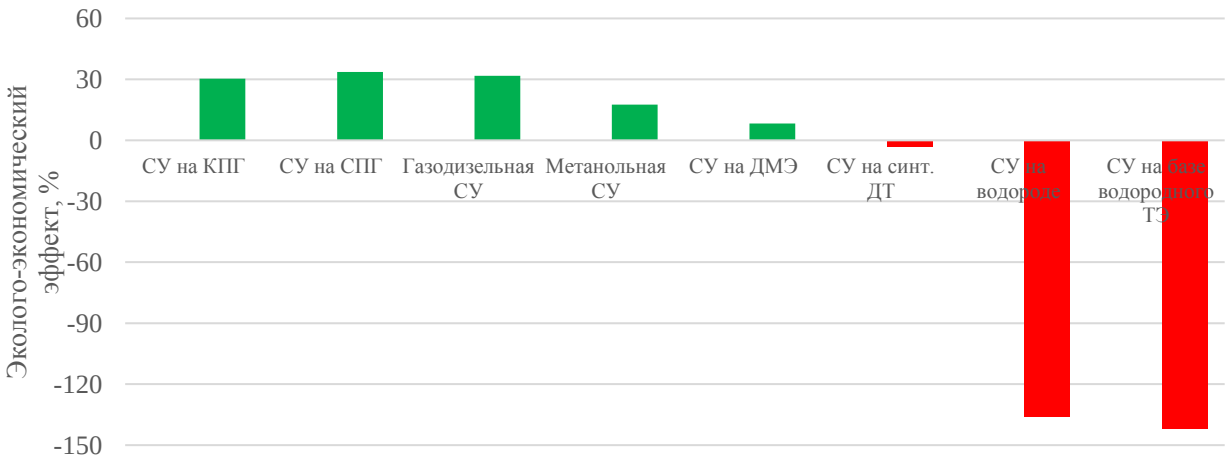

Рисунок 6 - Относительный эколого-экономический эффект в ПЖЦ

Положительный эколого-экономический эффект в ПЖЦ получен от применения силовых установок, работающих: на КПГ в размере 3,3 млн руб.; на СПГ в размере 3,7 млн руб.; по газодизельному циклу в размере 3,5 млн руб. в сравнении с СУ, работающей на дизельном топливе. Наибольший отрицательный эколого-экономический эффект в ПЖЦ получен от применения СУ, работающей на базе водородного ТЭ, в размере -15,7 млн руб. в сравнении с дизельной СУ. Несмотря на максимальный положительный экологический эффект в ПЖЦ, затраты на отдельных стадиях – производство и хранение водорода, стоимость энергоустановки и пр. – существенно превышают таковые у дизельной СУ.

Полученные результаты использованы при выполнении проекта по теме «Создание семейств однотопливных газовых двигателей и двутопливных газодизельных двигателей на базе дизеля КАМАЗ-910 с высокими энергетическими и экономическими показателями», а также могут быть использованы при подготовке технико-экономического обоснования применения альтернативных топлив и оценке конкурентоспособности силовых установок, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа. Применение разработанной Комплексной методики позволит предприятиям производить оценку энергетической эффективности, а также негативного воздействия на окружающую среду различных типов силовых установок городских автобусов и других транспортных средств, работающих на альтернативных моторных топливах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1) В диссертационной работе решена значимая и актуальная научно-техническая задача комплексной оценки экологической безопасности, энергоэффективности и экономической эффективности силовых установок, работающих на альтернативных топливах, полученных из природного газа, в полном жизненном цикле, включающем добычу природных ресурсов, использование СУ в составе АТС и их утилизацию. В результате теоретических и расчетных исследований определены требования к комплексной методике оценки эколого-экономического эффекта в ПЖЦ и математическим моделям ПЖЦ для оценки показателей СУ.

2) Разработан комплекс математических моделей полного жизненного цикла силовых установок, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа: КПГ, СПГ, метаноле, ДМЭ, синтетическом ДТ и водороде. При осуществлении математического моделирования на основе законов сохранения массы и энергии были учтены единичные процессы добычи природного газа, его транспортировки, компримирования ПГ, сжижения ПГ, получения синтез-газа, получения метанола, диметилового эфира, синтетического ДТ, водорода, а также получения вспомогательных топлив и электроэнергии, необходимых для осуществления жизненного цикла, и процесс использования топлив. Математические модели позволяют рассчитывать энергетические и материальные потоки в ПЖЦ силовых установок, определять расход затрачиваемых природных ресурсов, энергии, выбросы токсичных

веществ и парниковых газов в окружающую среду, сравнивать различные варианты топлив и выбирать наиболее эффективные с учетом ПЖЦ. Разработанные математические модели могут быть использованы для оценки полного жизненного цикла силовых установок городских автобусов и других транспортных средств, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа.

3) Путем сопоставления данных математического моделирования по разработанным моделям с опубликованными данными расчетных оценок из различных источников выполнена верификация комплекса разработанных математических моделей. Верификация показала, что результаты расчетов по расходам природных ресурсов, энергии, приведенным выбросам токсичных веществ и парниковых газов укладываются в диапазон доверительного интервала.

4) С помощью разработанных математических моделей, с учетом собранных инвентаризационных данных на основе анализа отечественных и зарубежных источников были проведены расчетные исследования показателей силовых установок в ПЖЦ при использовании альтернативных моторных топлив, полученных из природного газа, для сравнительной оценки и выбора наиболее перспективных видов моторных топлив по критериям энергетической эффективности и уровню загрязнения окружающей среды токсичными веществами и парниковыми газами. Результаты расчетных исследований по сравнению с дизельной СУ показали, что применение СУ, работающих на КПГ и СПГ, способствует снижению приведенного выброса токсичных веществ в ПЖЦ на 6-8% и приведенного выброса парниковых газов в ПЖЦ на 4%; применение газодизельной СУ позволяет сократить затраты энергии на осуществление ПЖЦ на 5%, способствует снижению приведенного выброса токсичных веществ в ПЖЦ на 29%, а приведенного выброса парниковых газов в ПЖЦ - на 19%; применение СУ, работающей на метаноле, способствует снижению приведенного выброса токсичных веществ в ПЖЦ на 32% и приведенного выброса парниковых газов в ПЖЦ на 12%. Полученные результаты позволяют рассматривать силовые установки, работающие на КПГ и СПГ (с принудительным зажиганием), по газодизельному циклу, на метаноле, как наиболее перспективные в полном жизненном цикле.

5) Предложена Комплексная методика и проведена оценка эколого-экономического эффекта в ПЖЦ силовых установок городских автобусов, работающих на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа. С помощью разработанных математических моделей Комплексная методика позволяет провести инвентаризационную оценку материальных и энергетических потоков в ПЖЦ СУ и расчет эколого-экономического эффекта на всех стадиях полного жизненного цикла силовой установки путем исследования экономической эффективности и расчета предотвращенного экологического ущерба, наносимого окружающей среде в результате применения альтернативных топлив. Методика может быть полезна для оценки СУ автобусов и других АТС, работающих на альтернативных топливах.

6) В результате оценки эколого-экономического эффекта в ПЖЦ силовых установок по разработанной Комплексной методике получен положительный эколого-экономический эффект от применения силовых установок, работающих: на КПГ в размере 3,3 млн руб.; на СПГ в размере 3,7 млн руб.; по газодизельному циклу в размере 3,5 млн руб. в сравнении с СУ, работающей на дизельном топливе.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

1. Козлов А.В. Методика расчета затрат на утилизацию транспортных средств, вышедших из эксплуатации / А.В. Козлов, А.С. Теренченко, Е.А. Миренкова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 4 (106). – С. 306-312. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

2. Козлов А.В. Анализ эколого-экономической эффективности автобусов, работающих на нефтяном и газовом топливах, в полном жизненном цикле / А.В. Козлов, А.С. Теренченко, В.А. Лукшо, Е.А. Миренкова // Труды НАМИ. – 2014. – № 259. – С. 38-49. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

3. Козлов А.В. Анализ путей использования природного газа в качестве моторного топлива на основе эколого-экономической оценки в полном жизненном цикле / А.В. Козлов, А.С. Теренченко, Е.А. Миренкова, А.Г. Ветошников // Труды НАМИ. – 2017. – № 2 (269). – С. 77-86. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

4. Козлов А.В. Математические модели полного жизненного цикла силовой установки, работающей на альтернативных моторных топливах, полученных из природного газа / А.В. Козлов, Е.А. Миренкова // Труды НАМИ. – 2017. – № 4 (271). – С. 14-24. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

5. Luksho V.A. Mathematical modeling of power units operating on natural gas, with a mono- and dual-fuel working process in total life cycle / V.A. Luksho, A.V. Kozlov, A.S. Terenchenko, E.A. Mirenkova // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2018. – V. 9. – № 7. – P. 1405-1415. **Издание входит в перечень Scopus.**

6. Козлов А.В. Оценка эффективности применения компримированного природного газа в качестве топлива для автобусов с улучшенными экологическими и энергетическими характеристиками в полном жизненном цикле / А.В. Козлов, А.С. Теренченко, В.А. Лукшо, Е.А. Миренкова // Материалы 90-й международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров «Автомобиль для Сибири и крайнего Севера: конструкция, эксплуатация, экономика». – Иркутск, 2015. – С. 188-199.

7. Козлов А.В. Исследование равномерности работы электрогидравлических форсунок, используемых на газодизельном двигателе / А.В. Козлов, А.С. Теренченко, А.Г. Ветошников, Е.А. Миренкова // Наукоград наука производство общество. – Протвино, 2016. – № 2. – С. 20-22.

8. Козлов А.В. Использование природного газа в качестве топлива как способ повышения энергоэффективности ДВС / А.В. Козлов, А.С. Теренченко, Е.А. Миренкова, А.Г. Ветошников // В сборнике: Интеллектуальные

транспортные системы повышения энергоэффективности и безопасности движения. – Москва, 2016. – С. 220-228.

9. Ветошников А.Г. Оценка энергоэффективности двигателей внутреннего сгорания при использовании природного газа в качестве топлива / А.Г. Ветошников, А.В. Козлов, Е.А. Миренкова, А.С. Теренченко // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции Двигатель-2017, посвященной 110-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2017. – С. 47-48.

10. Миренкова Е.А. Эффективность различных вариантов использования газового топлива для автотранспорта в полном жизненном цикле / Е.А. Миренкова, А.В. Козлов, А.Г. Ветошников // Материалы 99-й Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров «Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации». – Иркутск, 2017. – С. 232-239.

11. Mirenkova E.A. Mathematical modelling and simulation of power unit working of motor fuels derived from natural gas in total life cycle / E.A. Mirenkova, A.V. Kozlov, A.S. Terenchenko // Industry 4.0. – Bulgaria, 2018. – V. 3. – № 2. – P. 69-72.

12. Миренкова Е.А. Расчетная оценка эффективности применения компримированного природного газа в качестве моторного топлива в полном жизненном цикле / Е.А. Миренкова, А.В. Козлов, А.С. Теренченко // Материалы VII Международной научной конференции «Проблемы механики современных машин». – Улан-Удэ, 2018. – С. 157-162.

13. Миренкова Е.А. Альтернативные моторные топлива из природного газа: энергетическая эффективность и экологические показатели в полном жизненном цикле // В сборнике: 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса Сборник трудов Международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 144-152.

14. Патент РФ на полезную модель № 165395, 2016. Устройство подачи наддувочного воздуха в двигатель внутреннего сгорания (в соавторстве).