

На правах рукописи

ЗАЯЦ Юрий Александрович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
ТЕХНИКИ ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ
В СИСТЕМЕ ТОПЛИВОПОДАЧИ ДИЗЕЛЕЙ**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в
сельском хозяйстве

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина» Министерства сельского хозяйства

Научный консультант:

Гайдар Сергей Михайлович доктор технических наук, доцент профессор кафедры «Надежность и ремонт машин» ФГБОУ ВПО МГАУ

Официальные оппоненты:

Казанцев Сергей Павлович доктор технических наук, профессор декан факультета «Технический сервис в АПК» ФГБОУ ВПО МГАУ

Неговора Андрей Владимирович доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили» ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ

Волков Владимир Сергеевич доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой «Автомобили и сервис» ФГБОУ ВПО Воронежская государственная лесотехническая академия

Ведущая организация: Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии)

Защита состоится «___»_____2013 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д. 006.034.01 при ГОСНИТИ по адресу: 109428, г. Москва, 1-й Институтский пр., д.1, ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОСНИТИ.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 109428, г. Москва, 1-й Институтский пр., д.1, ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии, ученому секретарю диссертационного совета Д.006.034.01.

Автореферат разослан «___»_____2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Р.Ю. Соловьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время актуальность обеспечения работоспособности автотракторной техники агропромышленного комплекса страны обусловлена старением машинно-тракторного парка, низкой укомплектованностью техникой хозяйств. Так, при обеспеченности хозяйств тракторами и уборочными машинами от 45 до 58 % их коэффициент технической готовности в напряженные периоды сельскохозяйственных работ не превышает 0,82 единицы. Повышенная нагрузка на имеющуюся технику приводит к увеличению отказов, простоям техники, невозможности качественно провести техническое обслуживание. Оценка последствий таких отказов связана с нарушением сроков агротехнических работ и превышает в 3–4 раза затраты на восстановление работоспособности. Следует отметить, что многие модели выпускаемой сегодня техники устарели. Около 80 % тракторов, 65 % комбайнов и 60 % других сельскохозяйственных машин проектировались более 15–18 лет назад. По ряду эксплуатационных показателей отечественная техника уступает своим зарубежным аналогам. Нарботка на отказ отечественных тракторов ниже нормативной от 2 до 3 раз.

Характерным для сельскохозяйственной техники является хранение автомобилей и тракторов на открытых площадках, их сезонное использование и наличие значительной доли времени, в течение которого техника находится в режиме длительного хранения. Следствием этого является обводнение топлива и интенсивный коррозионно-механический износ плунжерных пар топливного насоса высокого давления. Это приводит к высокому проценту отказов плунжерных пар по причине заклинивания (34 % от всех неисправностей насосов высокого давления). Отказы топливной аппаратуры составляют от 25 до 30 % отказов дизеля и приводят, как правило, к прекращению транспортно-технологического процесса, необходимости восстановления работоспособного состояния в условиях стационарной ремонтной базы.

В настоящее время показатели надежности топливной аппаратуры для установленных требованиями условий эксплуатации достаточно высоки, однако их трудно спрогнозировать при изменении условий эксплуатации. Например, при применении загрязненного или нештатного топлива выход из строя плунжерной пары может произойти за несколько часов работы, чрезмерная затяжка насосной секции при некачественном техническом обслуживании топливного насоса приведет к отказу дизеля, длительная работа на режимах малых нагрузок и холостого хода приводит к выходу из строя форсунок. Повышение требований к показателям надежности с учетом всех возможных условий эксплуатации экономически нецелесообразно. В данном случае особую роль приобретает свойство объекта сохранять полную или ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации. Не менее важным для сельскохозяйственной техники является свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых элементов. Однако в настоящее время отсутствует методологический аппарат и научно обоснованные рекомендации по расширению области надежности и работоспособности дизеля.

Известно, что одним из направлений повышения надежности и работоспособно-

сти техники является резервирование. Однако это понятие применяется и ассоциируется с термином «дублирование». Дублирование или структурное резервирование как метод повышения надежности экономически может быть оправдан лишь на ограниченном классе объектов и систем. Другие методы резервирования: функциональное, временное, информационное, нагрузочное – развиты слабо и в дизелях применяются крайне ограниченно. Основной причиной такого положения дел является отсутствие единых концептуальных подходов и сложность разработки как технических решений, направленных на резервирование, так и в целом технологий их реализации. В то же время потенциал функционального резервирования достаточно высок и может обеспечить не только работоспособность дизеля при возникновении отказа, но и предотвратить отказ, а также повысить эффективность эксплуатации дизеля в нормальных и особых условиях.

Таким образом, в настоящее время сложилось *противоречие* между необходимостью обеспечения работоспособности дизеля (сохранения ограниченной работоспособности) при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойства дизеля сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых элементов и отсутствием научно обоснованных рекомендаций для достижения этих целей.

Поэтому решение *проблемы* разработки и обоснования концепции обеспечения работоспособности дизелей как совокупности определенных методов и математических моделей, схем и условий, технических решений, отражающих объективные закономерности в системе топливоподачи дизелей, актуально.

Цель исследования: развитие методологии резервирования в системе топливоподачи дизелей для обеспечения работоспособности сельскохозяйственной техники.

Гипотеза: проблема разработки и обоснования концепции обеспечения работоспособности дизелей сельскохозяйственной техники может быть решена на основе разработки и исследования способов параметрического и функционального резервирования в системе топливоподачи дизелей.

Научная концепция: концепция обеспечения работоспособности дизелей сельскохозяйственной техники состоит в параметрическом и функциональном резервировании основных функций и параметров топливной аппаратуры, характеристик дизеля и базируется на следующих концептуальных положениях:

- о применении параметрического резервирования в качестве способа расширения области работоспособности объекта созданием запаса параметра как для непрерывных показателей на определенных интервалах (скоростной характеристики крутящего момента, характеристики впрыскивания топлива), так и воздействием на основные рабочие параметры какого-либо процесса, результатом которого является изменение качества (пусковые качества дизеля, физико-химические свойства топлива);

- о применении функционального резервирования в системе топливоподачи как способа обеспечения работоспособности дизеля при возникновении отказа, предотвращения отказа, а также повышения эффективности эксплуатации дизеля в нормальных и особых условиях.

Объект исследования: транспортный дизель с объемным смесеобразованием и топливной аппаратурой разделенного типа.

Предмет исследования: процесс формирования основных функций и парамет-

ров топливной аппаратуры, характеристик дизеля при параметрическом и функциональном резервировании.

Задачи исследования:

- разработать концепцию новых принципов резервирования в системе топливоподачи дизелей;
- разработать и обосновать методы функционального и параметрического резервирования в системе топливоподачи дизелей;
- исследовать резервирование функции подачи топлива в цилиндр дизеля как метод обеспечения ограниченной работоспособности дизеля (при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых элементов) при отказе топливной форсунки;
- определить параметры электрогидравлических систем для топливоподачи в дизелях при различных методах резервирования: функциональном резервировании топливного насоса высокого давления, параметрическом резервировании пусковых качеств, параметрическом резервировании характеристики впрыскивания и разработать состав и структуру электрогидравлической системы топливоподачи для реализации функционального и параметрического резервирования;
- разработать модели исследуемых процессов: модель газонасыщения топлива с использованием невозвратного клапана при параметрическом резервировании крутящего момента в зоне низких и высоких частот вращения; отбора тяжелых примесей с использованием невозвратного клапана при функциональном резервировании системы очистки топлива; рабочего процесса дизеля при переменном способе смесеобразования и параметрическом резервировании крутящего момента в зоне низких и высоких частот вращения и функциональном резервировании устройства впрыскивания топлива;
- оценить изменения технико-экономического уровня транспортного средства при реализации мероприятий резервирования в системе топливоподачи дизелей, направленных на обеспечение работоспособности.

Ограничения и допущения:

- в работе рассматривается обеспечение работоспособности дизелей сельскохозяйственной техники в части, касающейся возможностей топливной аппаратуры, а именно функциональное и параметрическое резервирование в системе топливоподачи дизеля, а также параметрическое резервирование энергетических характеристик дизеля как следствие технических решений в топливной аппаратуре;
- в работе не ставится цель расчета показателей надежности дизеля и его систем, в то же время предполагается, что при выходе из строя (отказе, повреждении) основной системы ее функции выполняются в режиме ограниченной работоспособности дизеля, достаточной для выполнения технологической операции и минимизации ущерба от отказа или повреждения;
- рассмотренный в работе комплекс технических решений не является консервативным и может быть дополнен другими техническими решениями, направленными на резервирование других или тех же параметров или функций в рамках сохранения предлагаемой концепции резервирования.

Научная новизна исследования:

- разработана концепция обеспечения работоспособности дизелей, представляющая новое научное направление по исследованию функционального и параметри-

ческого резервирования в системах топливоподачи дизелей и разработке новых способов реализации этих направлений резервирования;

- разработана методология резервирования как совокупность методов функционального и параметрического резервирования, а именно функционального резервирования: функции подачи топлива в цилиндр дизеля, очистки топлива, топливного насоса высокого давления; параметрического резервирования: крутящего момента в области низких и высоких частот вращения, характеристики впрыскивания, пусковых качеств;

- разработаны структурно-логическая и математическая модель резервирования и модели исследованных процессов: модель газонасыщения топлива с использованием невозвратного клапана при параметрическом резервировании крутящего момента в зоне низких и высоких частот вращения; отбора тяжелых примесей с использованием невозвратного клапана при функциональном резервировании системы очистки топлива; рабочего процесса дизеля при переменном способе смесеобразования и параметрическом резервировании крутящего момента в зоне низких и высоких частот вращения и функциональном резервировании устройства впрыскивания топлива;

- разработаны новый метод и система топливоподачи в дизелях, основанные на использовании электрогидравлического разряда в топливе, выполнено обоснование состава, структуры и параметров электрогидравлических систем при функциональном резервировании топливного насоса высокого давления, параметрическом резервировании пусковых качеств, параметрическом резервировании характеристики впрыскивания;

- разработаны способы (технические решения), а также схемы систем топливоподачи, реализующие технологии функционального и параметрического резервирования.

Практическая значимость:

- разработаны новые технические решения, определены границы и режимы их применения, обеспечивающие резервирование параметров, характеристик дизеля, основных функций топливной аппаратуры;

- исследована работоспособность дизеля при резервировании функции подачи топлива в цилиндр дизеля и доказано свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при отказе топливной форсунки;

- впервые разработан экспериментально-лабораторный комплекс исследования электрогидравлического разряда применительно к системам топливоподачи дизелей.

На защиту выносятся:

- концепция обеспечения работоспособности дизелей, которая состоит в параметрическом и функциональном резервировании основных функций и параметров топливной аппаратуры, характеристик дизеля;

- методология резервирования как совокупность методов функционального и параметрического резервирования, а именно: резервирования функций топливной форсунки, очистки топлива, топливного насоса высокого давления; параметрического резервирования крутящего момента в области низких и высоких частот вращения, характеристики впрыскивания, пусковых качеств;

- новый метод и система топливоподачи, основанные на электрогидравлическом разряде в топливе, состав, структура, параметры электрогидравлической системы при различных методах резервирования;

- структурно-логическая и математическая модель резервирования и модели исследованных процессов: модель газонасыщения топлива с использованием невозвратного клапана при параметрическом резервировании крутящего момента в зоне низких и высоких частот вращения; отбора тяжелых примесей с использованием невозвратного клапана при функциональном резервировании системы очистки топлива; рабочего процесса дизеля при переменном способе смесеобразования и параметрическом резервировании крутящего момента в зоне низких и высоких частот вращения и функциональном резервировании устройства впрыскивания топлива.

Достоверность исследования: достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, основывается на том, что анализ состояния и путей решения поставленной научной проблемы разработки и обоснования концепции обеспечения работоспособности дизелей как совокупности определенных методов и математических моделей, схем и условий, требований и технических решений, отражающих объективные закономерности в системе топливоподачи дизелей, проведен с учетом ее актуальности и необходимости решения. При формировании единого научно-методического подхода, составляющего основу решаемой проблемы, использованы методологические принципы, разработанные в трудах известных ученых в области двигателестроения. При получении результатов теоретического значения использованы основополагающие теории гидродинамики, электродинамики, волновой динамики, которые лежат в основе создания детерминированных моделей. Достоверность полученных результатов подтверждается логическим обоснованием принципов и положений концепции, выносимой на защиту, строгой формулировкой задач исследования.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивались достаточным объемом экспериментов: получением скоростных характеристик дизеля, индентификацией рабочего процесса и процесса топливоподачи, исследованием характеристик невозвратного клапана, а также экспериментами, направленными на поиск параметров электрогидравлического разряда в системе топливоподачи. В работе применены современные методы исследования и измерительная аппаратура, контроль погрешностей и систематическая проверка результатов, статистическая обработка экспериментальных данных с использованием ЭВМ. Научные положения, выводы и практические рекомендации обоснованы результатами аналитических и экспериментальных исследований, полученными в ходе выполнения данной работы.

Реализация результатов: в научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе АМО «ЗИЛ» (г. Москва, 2002 г.), в научно-исследовательской работе ФГУП «21 НИИИ Минобороны России» «Ежик-2» (г. Бронницы, 2005 г.); в опытно-конструкторской деятельности НТЦ ОАО «КАМАЗ» (г. Набережные Челны, 2005 г., 2010 г.), в научно-исследовательской работе «Совершенствование конструкции военной автомобильной техники и системы автотехнического обеспечения», РВАИ (г. Рязань, 2009 г.), в научно-исследовательской работе «Анализ системы управления эксплуатации техники воинских спасательных формирований постоянной готовности МЧС России», ФГБОУ «Академия гражданской защиты МЧС России» (г. Химки, 2010 г.), в учебном процессе военных вузов г. Рязани, в опытно-конструкторской деятельности инженерно-конструкторского центра (ИКЦ) ОАО «Автодизель» (г. Ярославль, 2011 г.), в поисковой научно-исследовательской работе по государственному контракту № 14.740.11.0983 в рамках федеральной целевой программы «На-

учные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по лоту шифр «2011-1.4-507-006» «Проведение поисковых научно-исследовательских работ в целях развития общероссийской мобильности в области технических и инженерных наук» по теме: «Научные и инженерные основы повышения качества функционирования транспортно-технологических систем» – 2011 г.

Апробация работы: основные положения диссертационного исследования обсуждены и одобрены на XXXI международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров России, МГТУ «МАМИ» (г. Москва, 2000 г.), на XXXVI научно-методической конференции Рязанской радиотехнической академии (г. Рязань, 2000 г.), на региональном научно-практическом семинаре «Перспективы развития двигателей внутреннего сгорания» (г. Рязань, 2001 г.) на 1-й международной научно-технической конференции «Эксплуатация и методы исследования систем и средств автомобильного транспорта», ТуЛГУ (г. Тула, 2006 г.) на II, IV, V, VIII Московском международном салоне инноваций и инвестиций (г. Москва, 2002, 2004, 2005, 2008 гг.), на салоне «Неделя высоких технологий в Санкт-Петербурге» (г. Санкт-Петербург, 2004 г.), на салоне промышленной собственности «Архимед-2005», «Архимед-2009», «Архимед-2012» (г. Москва, 2005, 2009, 2012 гг.), на международной специализированной выставке «БЕЛПРОМЭКСПО-2005» (г. Минск, Республика Беларусь, 2005 г.), на 7-й межрегиональной выставке «Энергетика, газификация и энергоресурсосбережение-2009» (г. Рязань, 2009 г.), на международном научном симпозиуме МГТУ «МАМИ» (г. Москва, 2009 г.), на научной конференции в МГТУ им Н.Э. Баумана (г. Москва, 2009 г.), на Всероссийском НТС по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок им. проф. В.И. Крутова, МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2009 г.), на международной научно-практической конференции Рязанского высшего воздушно-десантного командного училища (военного института) (г. Рязань, 2008 г.), на XXXIV Всероссийской научно-технической конференции Рязанского высшего военного командного училища связи (г. Рязань, 2009 г.), на научно-методических конференциях Рязанского военного автомобильного института (1994–2009 гг.), на II и III межрегиональной специализированной выставке «Энергосбережение и энергоэффективность» (г. Рязань, 2011–2012 г.), на международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса» 17–18 мая 2011 г. в Государственном университете – учебно-научно-производственном комплексе (г. Орел, 2011 г.).

Публикации: 96 изданий, в том числе 3 монографии, 16 изданий по перечню ВАК, 41 статья, 36 патентов. Общий объем публикаций – более 40 печатных листов, личный авторский вклад – 26 печатных листов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и приложений. Общий объем – 370 страниц, основного текста – 295 страниц, приложений – 75 страниц, имеется 105 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 259 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены общие сведения о диссертации.

В первой главе определены и проанализированы актуальные проблемы резервирования в системе топливоподачи дизелей транспортных средств агропромышленного комплекса. Актуальность темы определяется повышением требований к транспортным средствам, которые обусловлены особенностями эксплуатации и расширением сферы их применения. Следует отметить, что на долю грузового автотранспорта на предприятиях агропромышленного комплекса приходится более 90 % объемов внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственной продукции и доставки ее к местам реализации. Несмотря на то, что доля автомобилей КамАЗ в сельскохозяйственных предприятиях составляет около 25 %, объем перевозимого груза этими автомобилями составляет для разных хозяйств от 50 до 75 %. При этом себестоимость транспортировки груза этими автомобилями является наименьшей. В целом система машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства предусматривает снабжение сельского хозяйства основными базовыми моделями грузовых автомобилей, среди которых КамАЗ-5320, Урал-5557(семейство двигателей КамАЗ-740).

На современном этапе развития двигателестроения достигнута высокая надежность топливоподающей аппаратуры и ее эффективность по экономическим и экологическим показателям. Проблемам совершенствования топливной аппаратуры посвятили свои труды известные ученые И.В. Астахов., Д.Н. Вырубов, В.И. Крутов, А.С. Орлин, Б.Н. Фанлейб, В.М. Эфрос, Н.А. Иващенко, В.А. Марков, Л.В. Грехов, Н.Х. Дьяченко, Е.К. Мазинг, В.Р. Бурячко, Л.Н. Голубков и многие другие. Вопросы надежности топливной аппаратуры дизелей машин освещены в трудах известных ученых: И.И. Габитова, В.Е. Горбаневского, Б.П. Загородских, С.П. Казанцева, А.В. Неговоры, Е.А. Пучина, С.Н. Шарифуллина, и др.

Проведенный анализ условий эксплуатации сельскохозяйственной техники, особенностей режимов работы дизелей, показал, что широкий спектр условий эксплуатации, свойственный для машин агропромышленного комплекса, включает в себя эксплуатацию в тяжелых дорожных условиях, хранение техники на открытых площадках, низкое качество топлива, отсутствие квалифицированного технического обслуживания (особенно для фермерских хозяйств), длительную работу дизеля на нерасчетных режимах, в том числе на режимах холостого хода при погрузочно-разгрузочных работах и других технологических операциях. Следствием этого является наличие характерных отказов топливной аппаратуры (ТА), таких как:

- закоксовывание и обрыв распылителей форсунок;
- зависание иглы и поломка пружины форсунки;
- выход из строя плунжерных пар топливного насоса высокого давления (ТНВД);
- засорение фильтрующих элементов воздушных и топливных фильтров.

Проведенный анализ скоростных характеристик отечественных и зарубежных дизелей позволяет сделать вывод об отсутствии резервирования энергетических показателей на низких частотах, актуальных для дизелей, эксплуатирующихся на сельскохозяйственной технике в тяжелых дорожных условиях.

Рассмотрены проблемы резервирования в системе топливоподачи дизелей, дан

понятийный аппарат и определены причины ограниченности применения структурного резервирования в системе топливоподачи.

На основе анализа состояния проблемы и поставленной цели сформулированы задачи и выдвинута рабочая гипотеза исследования.

Во второй главе рассматривается обоснование направлений резервирования в системе топливоподачи дизелей и представлена программа и методы исследований. Обоснованы направления резервирования: функциональное резервирование функций ТНВД, форсунки и очистки топлива; параметрическое резервирование энергетических и экономических показателей.

Переменный способ смесеобразования в дизелях, представленный в патентах [48, 49] и основанный на изменении способа смесеобразования в дизеле с объемного на предкамерное и обратно, можно рассматривать как эффективное направление как параметрического, так и функционального резервирования, как способ формирования скоростных характеристик дизеля, а также как одно из направлений расширения видов применяемых топлив.

При этом параметрическое резервирование реализуется:

- в достижении более высоких эффективных показателей дизеля на низких и высоких частотах вращения за счет использования предкамерного способа смесеобразования, где использование газодинамического перетекания через дросселирующее отверстие из предкамеры в основную камеру сгорания позволяет более качественно распылить топливо и распределить его по объему камеры сгорания;

- уменьшении давления впрыскивания топлива при использовании предкамеры и увеличении ресурса деталей топливной аппаратуры;

- форсировании дизеля по частоте вращения без значительного ухудшения эффективных показателей за счет меньшего влияния скоростного режима двигателя на процессы смесеобразования, что позволяет увеличить скоростной диапазон на фиксированной передаче, уменьшить количество переключений передач на единицу пути, снизить утомляемость водителя;

- улучшении тягово-динамических характеристик автотракторной техники в целом;

- уменьшении жесткости работы.

Дизель с предкамерным смесеобразованием обеспечивает функциональное резервирование впрыскивания при возникновении неисправностей топливной аппаратуры, таких как: зависание иглы форсунки, закоксовывание распылителя и обрыв его носика. Организация рабочего процесса с объемным смесеобразованием в случае такой неисправности форсунки крайне затруднительна из-за неудовлетворительного качества распыливания топлива.

Дизель с предкамерным смесеобразованием допускает подачу в цилиндр нештатных топлив и обеспечивает функциональное резервирование фракционного состава применяемых топлив за счет дополнительного распыливания топлива горячими газами.

В развитие работ Н.Н. Патрахальцева обоснована возможность применения невозвратного клапана для отбора тяжелых примесей из топливного бака, а также совершенствования скоростных характеристик дизелей с объемным смесеобразованием. Принцип действия невозвратного клапана основан на воздействии волны разряжения, сформированной в линии высокого давления.

Идея создания беспрецизионной топливной аппаратуры, основанной на электро-

гидравлическом эффекте (ЭГЭ), высказывалась в работах Л.А. Юткина и Б.Н. Фанлейба. Проведенный анализ условий получения электрогидравлического разряда, действующих факторов, выполненных в этом направлении научных исследований, позволяют выдвинуть идею о создании беспрецизионной топливной аппаратуры, основанной на ЭГЭ, работающей в режиме активного резервирования ТНВД, а также ТА для интенсификации, корректирования процесса топливоподачи. Однако в настоящее время нет научно обоснованных параметров таких систем, их состава и структуры, а решение этой научной задачи является актуальным.

Исследована взаимосвязь направлений резервирования в системе топливоподачи дизелей с обоснованием эксплуатационно-технологических требований к транспортным средствам агропромышленного комплекса. Показано наличие и многогранность причинно-следственных связей методов резервирования и эксплуатационных свойств транспортных средств (рисунок 1).

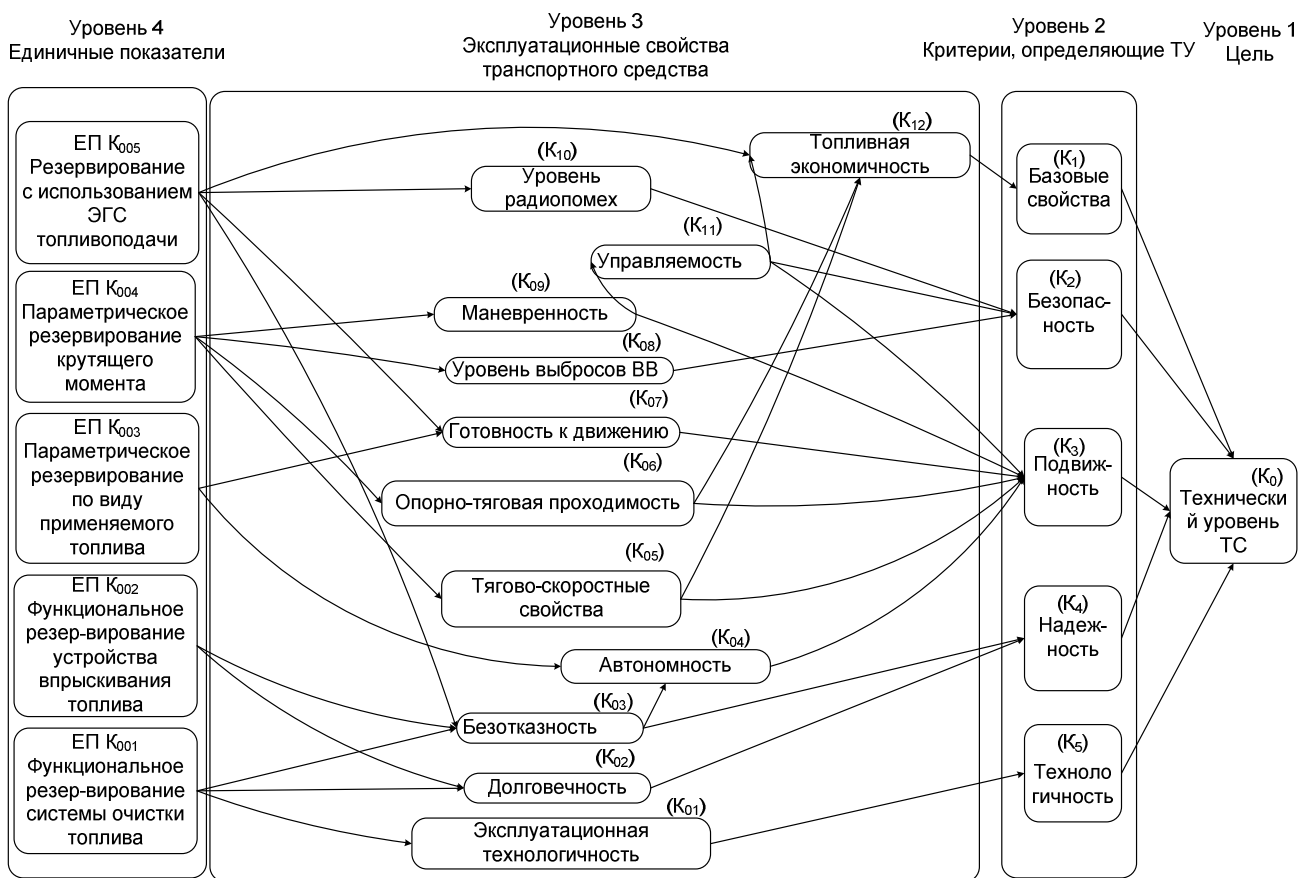


Рисунок 1– Влияние резервирования на эксплуатационные свойства транспортного средства

Программа исследования технологий резервирования в системе топливоподачи дизелей базируется на обосновании и разработке параметрических и функциональных методов резервирования, разработке детерминированных моделей, а также экспериментальных стендовых и лабораторных исследованиях, свойственных для исследования процессов в дизелях и их характеристик. Логически программа состоит из двух этапов. На первом этапе проводятся теоретические исследования, связанные с обоснованием направлений резервирования, поиском методов реализации направлений резер-

вирования, разработкой технических решений, направленных на реализацию параметрического и функционального резервирования, разработкой детерминированных моделей физических процессов.

Второй этап связан с экспериментальными исследованиями и состоит из цикла работ по подготовке образцов, экспериментального оборудования, проведению экспериментов и обработки полученных данных. Основными методами исследований являются методы теоретического анализа с использованием детерминированных моделей и экспериментальные методы исследования предлагаемых технических решений.

Экспериментальные методы исследования систем топливоподачи дизелей связаны с определением скоростных характеристик топливоподачи, индицированием процесса топливоподачи, определением скоростных характеристик дизеля, индицированием рабочего процесса дизеля, а также проведением серии лабораторных экспериментов на созданной лабораторной установке по исследованию электрогидравлической системы топливоподачи.

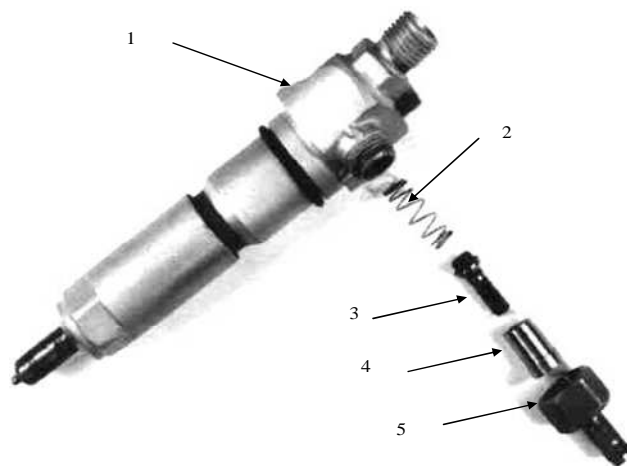
В третьей главе приведено исследование методов параметрического резервирования при формировании скоростных характеристик дизеля с целью обоснования эксплуатационных требований к транспортным средствам, касающихся опорно-тяговой проходимости и тягово-скоростных свойств.

Для проведения исследований разработана форсунка с невозвратным клапаном, который выполнен из штатного нагнетательного клапана, без отсасывающего разгрузочного объема. Особенность разработанной схемы состоит в расположении клапана непосредственно в форсунке (рисунок 2), что значительно сокращает увеличение объема топливной магистрали по сравнению с установкой отдельного невозвратного клапана (3 % по сравнению с 10–12 %).

Для подачи нескольких рабочих сред через невозвратный клапан (как жидких так и газообразных) разработана система подачи топлива [44], особенностью которой является возможность подачи одновременно нескольких видов топлива по нескольким подпитывающим магистралям. Клапан монтируется между форсункой и трубопроводом высокого давления, а воздействие волны разряжения осуществляется на эластичный элемент.

Для описания процессов, происходящих при работе невозвратного клапана, оценки конструктивных особенностей и их приемлемости разработана математическая модель.

Моделирование процесса газонасыщения топлива позволило установить, что при массе клапана $m_k = 4 \cdot 10^{-3}$ кг, жесткости пружины $\delta_k = 60$ Н/м, площади сечения $f_k'' = 4 \cdot 10^{-5}$ м² и атмосферном давлении в магистрали подпитки содержание газовой фазы в топливе может быть увеличено на 0,94 %



1 – корпус форсунки с клапанным колодцем и ограничителем хода невозвратного клапана; 2 – пружина невозвратного клапана; 3 – невозвратный клапан; 4 – седло невозвратного клапана; 5 – штуцер невозвратного клапана

Рисунок 2 – Форсунка с невозвратным клапаном

при 800 об/мин кулачкового вала ТНВД, а при понижении частоты вращения до 600 об/мин – на 1,52 %. Увеличение частотного диапазона до 1000 об/мин увеличивает содержание газовой фазы на 2,4 %. Учитывая, что мгновенные значения давления топлива в форсунке P_T получены из индикаторных диаграмм процесса топливоподачи, где на частоте 800 об/мин волновые процессы в топливопроводе минимальны, величина 0,94 % вполне объяснима. В этой области частот вращения крутящий момент максимален, а влияние газонасыщения незначительно ввиду хорошего качества распыливания топлива.

Экспериментальные исследования скоростных характеристик дизеля, оснащенного форсунками с невозвратными клапанами, проведены при подаче воздуха с давлениями от небольшого разряжения $P_g < 0,1$ до давления $P_g = 0,5$ МПа.

Принципиальное отличие скоростных характеристик исследуемого дизеля с экспериментальными форсунками, оснащенными невозвратными клапанами состоит в том, что в зоне низких частот вращения наблюдается увеличение крутящего момента. Так, при частоте вращения коленчатого вала от 650 до 800 об/мин при нагрузке $D = 0,75 \cdot D_{max}$ наблюдается увеличение крутящего момента M_k до 650 Н·м, что больше штатных показателей на 100–150 Н·м, с последующем падением до 500 Н·м на частоте 1000 об/мин, при этом мощность в данном диапазоне частот остается постоянной.

При подаче в форсунку воздуха под давлением $P_g = 0,5$ МПа и при атмосферном давлении $P_g = 0,1$ МПа показатели дизеля отличаются увеличением крутящего момента и мощности при $P_g = 0,5$ МПа в диапазоне регуляторной характеристики. Сопоставляя скоростные характеристики процесса топливоподачи и частичные скоростные характеристики дизеля, можно сделать выводы:

- при насыщении воздухом топлива происходит увеличение крутящего момента в диапазоне низких частот вращения коленчатого вала. С одной стороны это происходит из-за увеличения цикловой подачи, которое получено за счет повышения начального давления впрыскивания невозвратным клапаном, а с другой – за счет интенсификации процесса распыливания топлива при насыщении его воздухом при высоком давлении;
- для насыщения топлива воздухом достаточно атмосферного давления в магистрали подпитки для реализации эффекта в зоне низких частот вращения. Давление выше атмосферного целесообразно в случаях, когда необходимо улучшение параметров в зоне высоких частот вращения.

Сравнение удельных показателей расхода топлива g_e показывает смещение минимального удельного расхода топлива в зону более низких частот вращения коленчатого вала двигателя и находится в диапазоне 1000–1200 об/мин.

На основании проведенных экспериментальных исследований обоснован способ параметрического резервирования крутящего момента в области низких и высоких частот вращения с использованием газонасыщения топлива воздухом в линии высокого давления через невозвратный клапан, а эксплуатационные требования к опорно-тяговой проходимости, определяемые в том числе величиной крутящего момента на низких частотах вращения коленчатого вала, могут быть обоснованно повышены. Учитывая, что тяговые качества пропорциональны крутящему моменту двигателя, можно ожидать с учетом КПД трансмиссии их увеличение до 15 %.

Проведенные исследования позволяют обосновать тягово-скоростные требования, связанные с величиной крутящего момента на низких частотах вращения коленча-

того вала, обеспечивающие уменьшение минимально допустимой скорости движения.

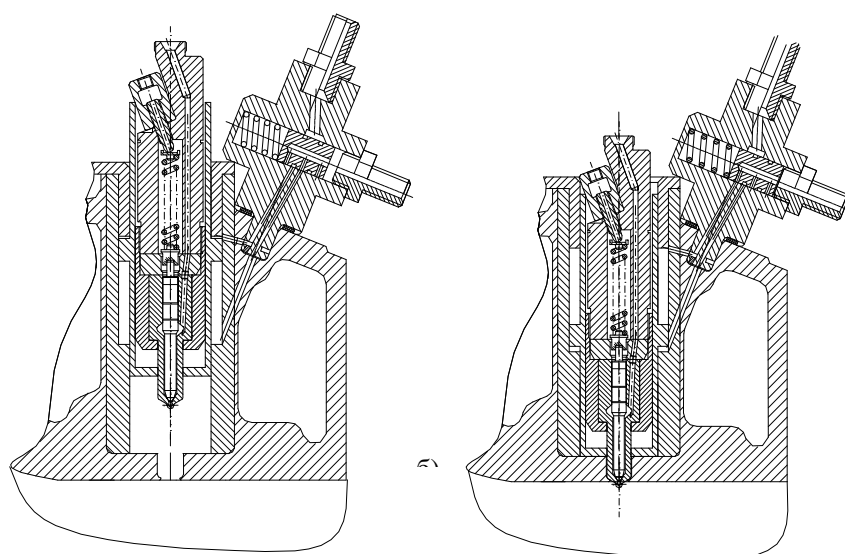
Параметрическое резервирование крутящего момента исследовано при формировании скоростных характеристик дизеля с использованием переменного способа смесеобразования. Характер структурных изменений системы впрыскивания топлива представлен на рисунке 3.

Решение задачи по обоснованию мероприятий при оптимизации рабочего процесса дизеля требует проведения всестороннего анализа влияния конструкции камеры сгорания, температурного режима деталей, характеристик впрыскивания топлива, давления воздушного заряда на внутрицилиндровые процессы во всем поле эксплуатационных режимов работы. В связи с большим объемом предполагаемых исследований, сопровождающих разработку физической модели и последующие ее испытания, первичная оценка влияния параметров процессов смесеобразования на показатели рабочего процесса выполнена с помощью уточненной, применительно к объекту исследования, математической моделью процессов энергопреобразования в дизеле.

В результате моделирования на заданном режиме определяются показатели рабочего процесса и эксплуатационные характеристики: значения параметров рабочего тела в любой момент времени при его нахождении во впускной системе, в рабочей полости цилиндров двигателя, в выпускной системе, а также среднее индикаторное давление, составляющие технических потерь, среднее эффективное давление и соответствующие ему крутящий момент, мощность и удельный эффективный расход топлива.

Разработанные ранее модели рабочих процессов дизелей не могут быть использованы в неизменном виде для решения всех задач, поставленных в данном исследовании, так как в их содержании отсутствует математическое описание влияния способа смесеобразования на показатели рабочего процесса. При этом наиболее трудоемким и наиболее значимым, в целях обеспечения требуемой степени адекватности математической модели процессов энергопреобразования их реальному протеканию в объекте моделирования, является описание процесса сгорания в связи с первостепенной его ролью в окончательном формировании эксплуатационных характеристик дизеля.

Существующая однозонная математическая модель рабочего процесса четырехтактного поршневого двигателя представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Она дополнена тремя уравнениями, позволяющими более корректно описать закон тепловыделения и тем самым уменьшить отклонение расчетных



а

б

а – предкамерное смесеобразование;
б – объемное смесеобразование

Рисунок 3 – Схема изменения способа смесеобразования

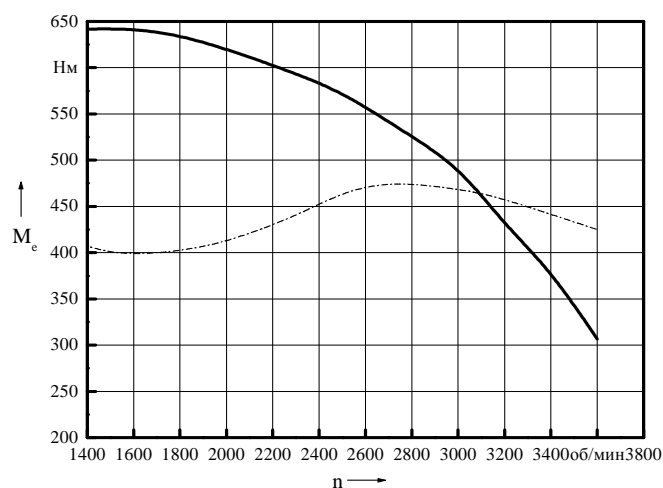
и экспериментальных данных. Результаты моделирования рабочего процесса с предкамерным смесеобразованием позволяют прогнозировать форсирование дизеля по частоте вращения (рисунок 4).

Результаты экспериментальных исследований скоростных характеристик дизеля при объемном и предкамерном способах смесеобразования позволили установить, что в области частичных нагрузок эффективные показатели дизеля при предкамерном способе смесеобразования значительно уступают показателям при объемном смесеобразовании. В области высоких частот вращения эффективные показатели при предкамерном способе смесеобразования приближаются к показателям объемного смесеобразования (рисунок 5).

При работе дизеля в зоне частот вращения ниже 1000 об/мин наблюдается увеличение крутящего момента при предкамерном способе смесеобразования за счет более качественного смесеобразования в предкамере и возможности использования меньших коэффициентов избытка воздуха без значительного дымления. Увеличение крутящего момента составило при 800 об/мин 75 Н·м, а при 700 об/мин – более 150 Н·м (рисунок 5).

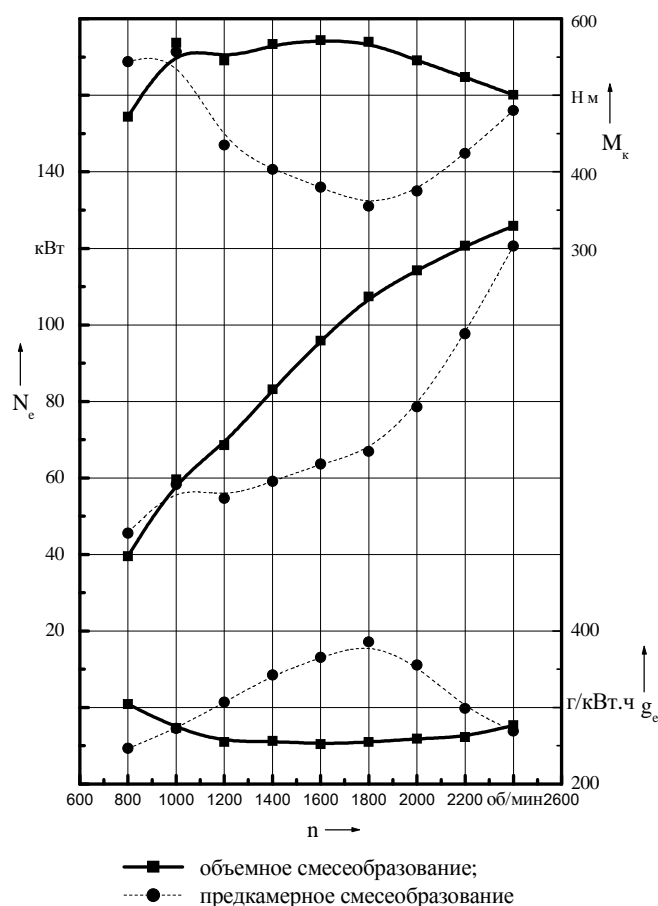
В настоящем исследовании степень сжатия равна 14,542 единицы при объеме предкамеры $V_{пред} = 1,539 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$.

Снижение степени сжатия дизеля позволяет улучшить эффективные показатели приближением к оптимальным степеням сжатия, лежащим в пределах от 12 до 13. Относительный объем предкамеры, составляющий 15,4 % от общего объема камеры сгорания, несколько ниже, чем у существующих предкамерных дизелей (от 20 до 40 % от общего объема камеры сгорания). Регулировочная характеристика по объему предкамеры представлена на рисунке 6.



— объемное смесеобразование;
 предкамерное смесеобразование

Рисунок 4 – Результаты численного эксперимента при форсировании дизеля по частоте вращения



—■— объемное смесеобразование;
●..... предкамерное смесеобразование

Рисунок 5 – Внешние скоростные характеристики дизеля КамАЗ-740 при объемном и предкамерном способах смесеобразования

Таким образом, исследование представленных двух способов параметрического резервирования крутящего момента доказывает возможность формирования скоростной характеристики дизеля с увеличением крутящего момента на низких частотах вращения до 20 % от $M_{кmax}$.

Представленные методы обосновывают улучшение тягово-скоростных свойств по показателю минимально устойчивой скорости движения и максимальной скорости движения, опорно-тяговой проходимости – по показателю максимальный динамический фактор.

Представленные два метода резервирования обладают рядом функциональных свойств, исследование которых приведено в **четвертой главе**.

На основе форсунки с невозвратным клапаном разработана система подачи топлива с забором тяжелых примесей, позволяющая выполнять в том числе отбор воды из топливного бака и подачу ее в форсунку, минуя ТНВД (рисунок 7).

Разработанная математическая модель отбора тяжелых примесей (1) дополняет известную ранее модель подачи различных топлив через невозвратный клапан в линию высокого давления системой уравнений, в которой учитывается изменение разрежения на входе сечения 3–3 (рисунок 8), создаваемое невозвратным клапаном (уравнения 7–9 системы 1) в процессе работы. На основе моделирования разрежения в магистрали подпитки за один цикл (один оборот кулачкового вала ТНВД) от частоты вращения кулачкового вала ТНВД и по результатам экспериментальных исследований построены зависимости при номинальной нагрузке дизеля (рисунок 9). Расчетная зависимость смещена относительно экспериментальной, однако обе зависимости показывают наличие устойчивого минимума разрежения в области частоты вращения кулачкового вала 800 об/мин (рисунок 9).

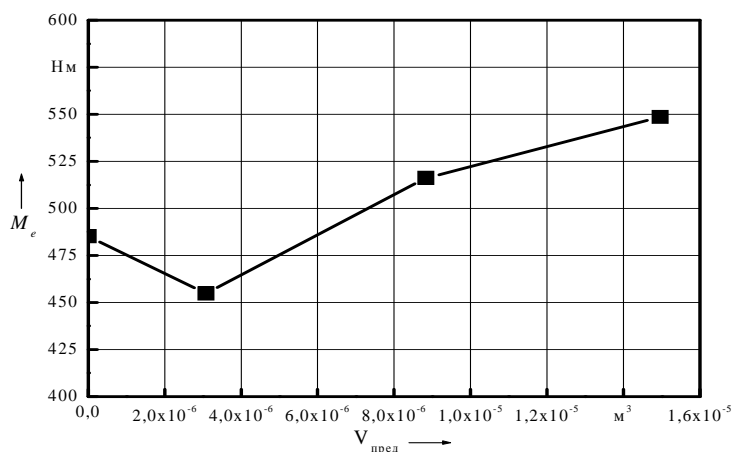
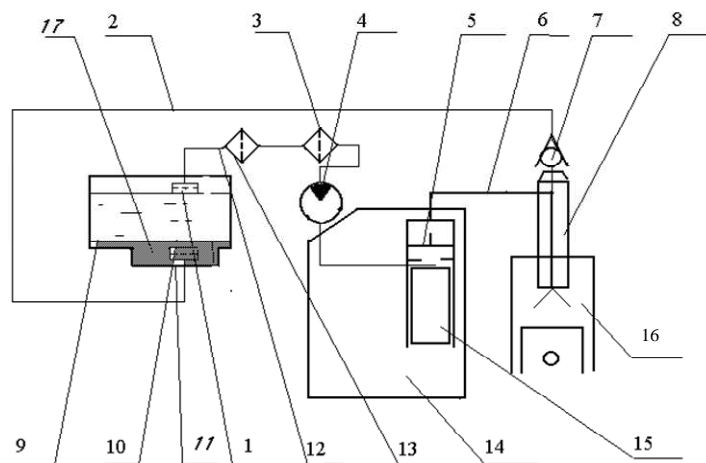


Рисунок 6 – Регулировочная характеристика по объему предкамеры при $n=800$ об/мин и полной нагрузке



1 – основной топливозаборник плавающего типа; 2 – подпитывающая магистраль; 3 – фильтр тонкой очистки; 4 – топливopодкачивающий насос; 5 – нагнетательный клапан; 6 – топливopровод высокого давления; 7 – невозвратный клапан; 8 – форсунка; 9 – топливный бак; 10 – топливозаборник тяжелых примесей; 11 – отстойник топливного бака; 12 – топливopровод низкого давления; 13 – фильтр грубой очистки; 14 – топливный насос высокого давления; 15 – плунжер; 16 – цилиндр дизеля; 17 – тяжелые примеси в топливе

Рисунок 7 – Система топливоподачи дизеля с отбором тяжелых примесей

$$\left\{ \begin{array}{l}
 m_k \cdot \frac{d^2 h_k}{dt^2} + \delta_k \cdot h_k + \delta_k \cdot h_0 = f_k''(P_3 - P_T) + f_k'(P_1 - P_T), \\
 G_2 = \mu_1 \cdot f_1 \cdot \frac{P_1}{\sqrt{R \cdot T_1}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_T}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_T}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} + \frac{dh_k}{dt} \cdot f_k' \cdot \frac{P_1}{R \cdot T_1}, \\
 G_3 = \mu_2 \cdot f_2 \cdot \frac{P_2}{\sqrt{R \cdot T_2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} + \frac{dh_k}{dt} \cdot f_k'' \cdot \frac{P_2}{R \cdot T_2}, \\
 G_1 = \alpha_m \cdot V_T \cdot \frac{dp_T}{dt} \cdot \rho_m + f_T \cdot c_T \cdot \rho_m, \\
 G_3 = \mu_3 \cdot f_3 \cdot \frac{P_3}{\sqrt{R \cdot T_3}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_3} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_3} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \\
 G_1 = \mu_1 \cdot f_1 \cdot \frac{P_1}{\sqrt{R \cdot T_1}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_T}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_T}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \\
 P_3 = \frac{P_{амм} \cdot m(t) \cdot V_0}{m_0 \cdot V(t)}, \\
 V(t) = V_0 - \left(\frac{P_3 - P_{амм}}{\rho_{np} \cdot g} \right) \cdot \frac{\pi d_m^2}{4}, \\
 \frac{dm(t)}{dt} = G_1.
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где m_k – масса невозвратного клапана, кг; h_k – ход невозвратного клапана, м; h_0 – начальная деформация пружины невозвратного клапана, м; δ_k – жесткость пружины невозвратного клапана, Н/м; f_k' – площадь конуса клапана (сечение № 1), м²; f_k'' – площадь поперечного сечения клапана (сечение № 2), м²; P_T – давление топлива в форсунке, Па; α_m – коэффициент сжимаемости топлива, Па⁻¹; ρ_{np} , ρ_m – плотность примеси и топлива, кг/м³; c_T – скорость топлива, м/с; V_T – объем топливопровода, м³; f_T – площадь проходного сечения топливопровода, м²; G_1 , G_2 , G_3 – расход воздуха через сечения № 1, № 2, № 3, кг/с; T_1 – температура воздуха в

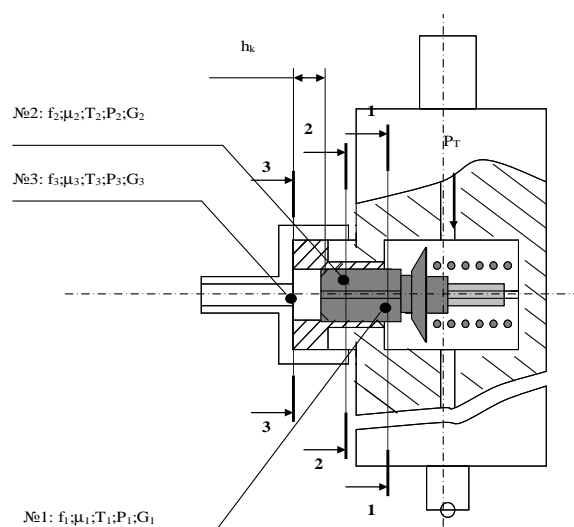


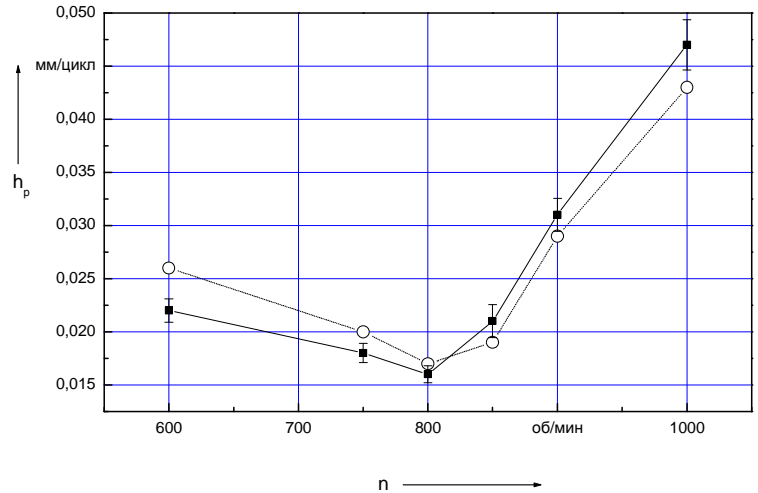
Рисунок 8 – Расчетная схема работы невозвратного клапана

сечении № 1, К; T_2 – температура воздуха в сечении № 2, К; T_3 – температура воздуха в сечении № 3, К; P_1 – давление воздуха под конусом невозвратного клапана (полость № 1), Па; P_2 – давление воздуха после входа в невозвратный клапан (полость № 2), Па; P_3 – давление воздуха до входа в невозвратный клапан (полость № 3), Па; $m_0, m(t)$ – начальная и текущая масса воздуха в магистрали подпитки, кг; $V_0, V(t)$ – начальный и текущий объем воздуха в магистрали подпитки, м³; $P_{атм}$ – начальное давление воздуха в магистрали подпитки, Па; k – показатель адиабаты; R – газовая постоянная (для воздуха) Дж/(кг·К); μ_3 – коэффициент расхода полости в зазоре № 3; f_3 – площадь проходного сечения № 3, м²; μ_2 – коэффициент расхода полости в зазоре № 2; f_2 – площадь проходного сечения № 2, м²; μ_1 – коэффициент расхода полости в зазоре № 1; f_1 – площадь проходного сечения № 1, м².

Эта зона может смещаться как в ту, так и в другую сторону по оси абсцисс и зависит от многих параметров топливной аппаратуры, влияющих на волновые процессы в линии высокого давления. Данная частота соответствует частоте вращения коленчатого вала при максимальном крутящем моменте. Волновые явления, как показывают экспериментальные исследования, на этой частоте минимальны. Такой вид скоростной характеристики разряжения в невозвратном клапане накладывает определенный отпечаток и на внешнюю скоростную характеристику двигателя. На этой частоте разряжение составляет 0,016 мм/цикл.

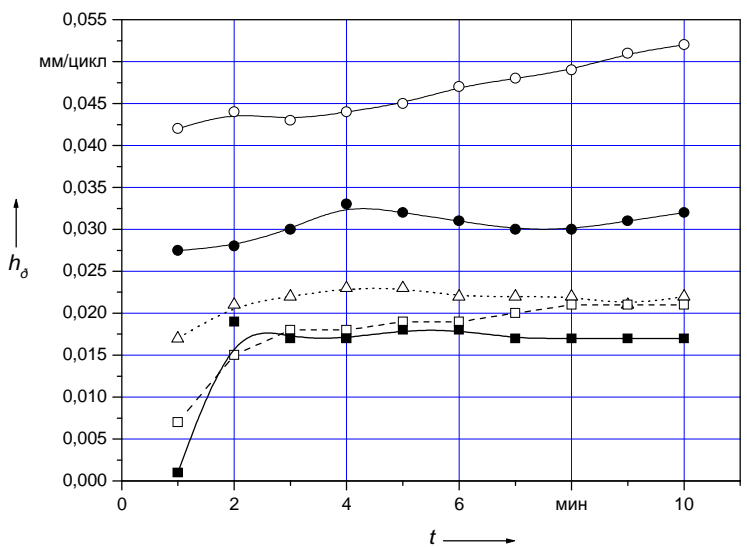
Максимальные значения циклового разряжения в зоне низких частот вращения (менее 600 об/мин) составляют 0,023 мм/цикл, а в зоне высоких частот вращения (более 1000 об/мин) – 0,045 мм/цикл.

Динамика изменения разряжения в магистрали подпитки по времени представлена на рисунке 10. Характерно, что первые 4 минуты поведение функции h_p различно на разных режимах, однако с течением времени



○ – расчет по модели; ■ – эксперимент.

Рисунок 9 – Разряжение в магистрали подпитки за цикл от частоты вращения кулачкового вала ТНВД



○ – нагрузка D_{max} ; ● – нагрузка $0,75 D_{max}$; △ – нагрузка $0,5 D_{max}$; □ – нагрузка $0,25 D_{max}$; ■ – режим холостого хода, $D=0$

Рисунок 10 – Динамика изменения разряжения в магистрали подпитки при различной нагрузке двигателя

поведение стабилизируется. Такое изменение циклового разряжения связано с характером волновых явлений и поведением клапана при наличии даже небольшого разряжения. При этом за 10 минут работы на номинальной подаче и частоте вращения кулачкового вала ТНВД 1000 об/мин разряжение, созданное форсункой с невозвратным клапаном, составило 518 мм водяного столба.

Анализ этих зависимостей показывает однозначное влияние нагрузки на величину создаваемого разряжения, а, следовательно, цикловую подачу тяжелых примесей, с одной стороны, и на время начала подачи тяжелых примесей в топливную магистраль, если магистраль подпитки была заполнена воздухом, – с другой. В работе выполнен анализ скоростных характеристик топливоподачи и невозвратного клапана при различных положениях рейки ТНВД.

Характерной особенностью экспериментальной топливной аппаратуры является увеличение цикловой подачи во всем диапазоне частот вращения кулачкового вала ТНВД при любом положении рычага управления цикловой подачей топлива, что достигается за счет корректирующего действия невозвратного клапана. Наиболее значительное приращение цикловой подачи (до 50 %) наблюдается в диапазоне частот от 300 до 400 об/мин и нагрузке свыше 50 %. Таким образом, стабильно высокие значения разряжения за каждый цикл топливоподачи находятся в области низких и высоких частот вращения и высоких нагрузок. Следовательно, в области низких частот целесообразна подача воздуха для улучшения качества распыливания и повышения эффективности смесеобразования, а от частот вращения 600–650 об/мин до $n_{\text{ном}}$ кулачкового вала ТНВД целесообразно подавать тяжелые примеси или какие-либо альтернативные топлива. В этом случае дизель будет менее чувствителен к цикловой добавке примесей. Функциональное резервирование системы очистки топлива на основе системы поциклового отбора тяжелых примесей из топливного бака обеспечивает защиту прецизионных пар насоса высокого давления не только от влаги при обводнении топлива, но и частиц пыли, попадающей в топливный бак.

Разработанный метод функционального резервирования системы очистки топлива позволяет сформулировать практические рекомендации по повышению технологичности и снижению трудоемкости технического обслуживания топливной аппаратуры:

- исключить технологическую операцию слив отстоя из топливного бака при выполнении ТО1;
- исключить технологическую операцию слив отстоя из корпусов фильтра тонкой очистки топлива при выполнении ТО1;
- исключить технологическую операцию слив отстоя из корпуса фильтра грубой очистки топлива при выполнении ТО1;
- технологическую операцию снятия и промывки корпуса фильтра грубой очистки топлива выполнять при каждом втором ТО2;
- технологическую операцию снятия и промывки корпусов фильтров тонкой очистки топлива выполнять при каждом втором ТО2;
- технологическую операцию замены фильтрующих элементов выполнять при каждом втором ТО2;
- технологическую операцию слив отстоя из топливного бака выполнять при каждом втором ТО2.

При исследовании переменного способа смесеобразования выдвинута и подтверждена гипотеза о расширении области работоспособности дизеля при возникновении неисправности форсунки. Согласно поставленным задачам исследования в настоящей работе предусмотрены два вида отказов форсунки: зависание иглы форсунки и обрыв носка распылителя.

Результаты исследований дизеля с зависшей иглой форсунки можно со значительной долей уверенности распространить и на поломку или ослабление пружины форсунки. При исследовании работы дизеля на нештатном топливе принята наиболее неблагоприятная для работы дизеля смесь, состоящая из 30 % дизельного топлива и 70 % бензина А-80.

Скоростные характеристики дизеля при зависании иглы форсунки, имеющем место при длительном питании дизеля топливом расширенного фракционного состава с преобладающей частью легких фракций или наличием воды в топливном баке, представлены на рисунке 11.

Зависание иглы форсунки сопровождается значительным искажением характеристик топливоподачи. Форма протекания заднего фронта дифференциальной характеристики приближается к характеристике форсунки открытого типа – к пологой убывающей кривой, что свидетельствует о выдавливании из форсунки плохо распыленного топлива. При объемном способе смесеобразования цилиндр с отказавшей форсункой исключается из работы. При выходе из строя двух и более форсунок мощности дизеля недостаточно для выполнения технологической операции.

Сравнительный анализ скоростных характеристик при разных способах смесеобразования при зависшей игле форсунки (поломке пружины форсунки) показывает, что крутящий момент у дизеля с предкамерным способом смесеобразования от 50 до 100 % выше чем у дизеля с объемным.

Как уже указывалось выше, в результате длительной работы дизеля без нагрузки часто наблюдается закоксовывание распылителей форсунок и их обрыв. Обрыв носка распылителя обычно проходит через оси его сопел, таким образом, впрыскивание топлива происходит вдоль оси иглы непосредственно в днище поршня. Если при зависании иглы форсунки ухудшение смесеобразования происходит в основном за счет снижения крутизны переднего фронта характеристики впрыскивания, то в данном случае топливо испаряется со стенок и за счет разбрызгивания от стенок камеры сгорания.

Так, анализ скоростных характеристик дизеля КамАЗ-740 при обрыве распылителей форсунок (рисунок 12) показывает, что на малых частотах вращения (менее

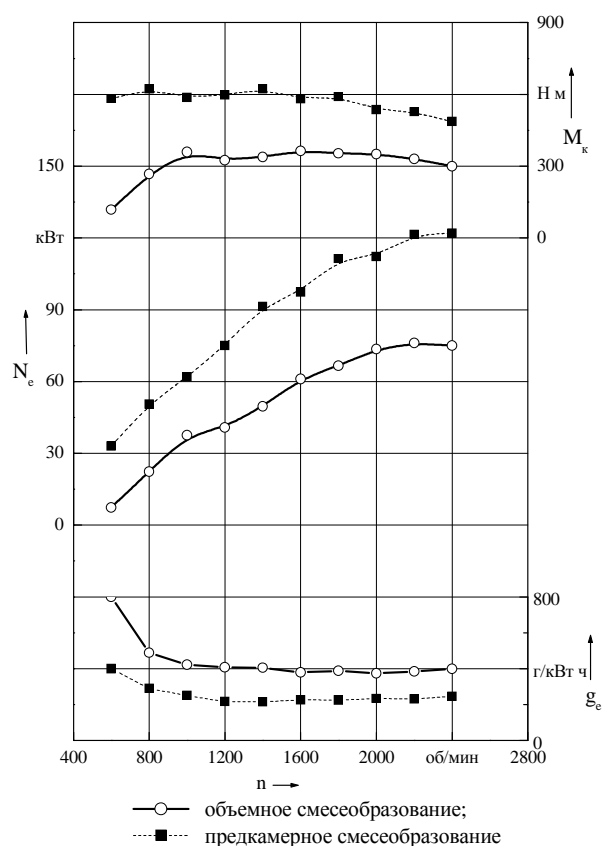


Рисунок 11 – Внешние скоростные характеристики дизеля КамАЗ-740 при зависании игл форсунок

800 об/мин) организация рабочего процесса с объемным смесеобразованием крайне затруднительна. Работа дизеля с объемным смесеобразованием с указанной неисправностью возможна только при поддержании минимальной частоты вращения не менее 800 об/мин, то есть фактически с момента возникновения неисправности до первой остановки дизеля.

Анализ скоростных характеристик при предкамерном способе смесеобразования выявляет значительный прирост эффективного крутящего момента по сравнению с объемным смесеобразованием при данном типе отказа форсунки. В соответствии с рисунком 12 особенно это проявляется на малых частотах вращения.

Результаты исследований показателей дизеля с предкамерным способом смесеобразования и форсункой без носка распылителя позволяют сделать вывод о работоспособности двигателя, хотя и со значительными ухудшениями параметров, в том числе и на режиме пуска дизеля.

Таким образом, функциональное резервирование функции подачи топлива в цилиндр дизеля с использованием переменного способа смесеобразования можно обоснованно рассматривать как метод обеспечения ограниченной работоспособности дизеля при отказе топливной форсунки.

Работа дизеля КамАЗ-740 при предкамерном смесеобразовании на наиболее неблагоприятной для работы дизеля смеси, состоящей из 30 % дизельного топлива и 70 % бензина, характеризуется резким повышением крутящего момента на низких частотах вращения и падением мощности во всем остальном диапазоне частот вращения. Это связано с тем, что изменение вида топлива при объемном смесеобразовании влечет за собой увеличение количества топлива, поданного в цилиндр за период задержки воспламенения, следствием чего является ухудшение эффективных показателей и повышение жесткости работы дизеля. Предкамерный способ смесеобразования менее подвержен этому отрицательному эффекту за счет использования энергии газодинамического перетекания заряда между камерами, а не за счет повышения давлений впрыскивания и уменьшения диаметров сопел.

Пятая глава диссертационной работы посвящена исследованию возможности функционального и параметрического резервирования топливного насоса высокого давления с использованием электрогидравлического эффекта. Несмотря на предположения о возможности применения ЭГЭ в топливной аппаратуре дизелей, сделанные в середине прошлого столетия Л.А. Юткиным, к настоящему времени нет научного

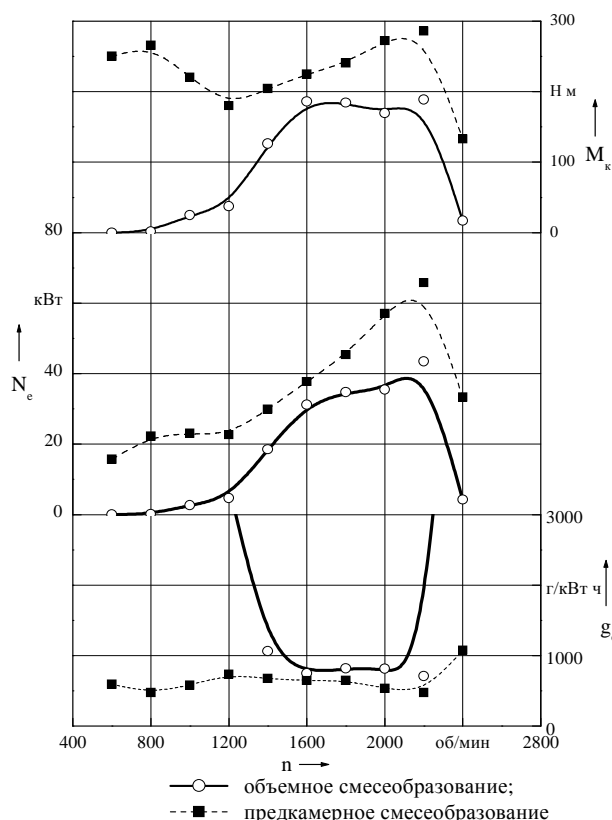


Рисунок 12 – Внешние скоростные характеристики при объемном и предкамерном способах смесеобразования при обрыве распылителей форсунок

обоснования состава, структуры и параметров таких систем. Не были реализованы на практике установки, работающие с частотой генерации импульсов, соответствующей частоте подачи топлива в цилиндры дизеля.

В работе выполнен анализ физических процессов, происходящих в жидкости при электрогидравлическом разряде. Согласно исследованиям, выполненным учеными Л.А. Юткиным, В.П. Севастьяновым, С.А. Ракитиным и другими, при электрогидравлическом ударе (ЭГУ) на формирование волны сжатия затрачивается от 15 до 20 % энергии, на формирование кавитационных пузырьков – от 20 до 25 %, нерассеявшейся энергии в кавитационном пузырьке остается от 18 до 25 %. Потери энергии в электрической цепи, потери на формирование электрического пробоя, потери на излучение, тепловые потери составляют в сумме от 32 до 40 %.

На основе теории, разработанной В.П. Севастьяновым, уточнена математическая модель и проведены расчетные исследования. Определены значения напряжения разряда, длины разрядного промежутка, емкости конденсатора при функциональном резервировании системы топливоподачи. Анализ результатов вычислительного эксперимента показал возможность применения электрогидравлических систем (ЭГС) для топливоподачи в дизелях:

- при увеличении начального напряжения от 25 кВ до 30 кВ, но при уменьшении емкости конденсаторов от 0,01 мкФ до 0,003 мкФ и межэлектродном расстоянии в разрядной камере 10 мм разряда не происходит. Уменьшение межэлектродного расстояния в разрядной камере до 6 мм позволяет получать разряд при невысоких величинах давления и цикловой подачи;

- дальнейшее увеличение начального напряжения от 30 до 40 кВ при емкости конденсаторов 0,01 мкФ и межэлектродном расстоянии в разрядной камере 10 мм позволяет получать разряды с создаваемым давлением от 42,5 до 73,4 МПа при цикловой подаче от 24,3 до 52,3 мм³. При начальном напряжении 40 кВ и при изменении величины емкости конденсаторов от 0,003 (ниже разряда не происходит) до 0,0055 мкФ разряды создают небольшие давления от 45 до 48 МПа при изменении цикловой подачи от 11,8 до 34 мм³.

Одной из проблем дизелей с топливной аппаратурой разделенного типа является снижение максимального давления впрыскивания топлива на режимах с пониженной частотой вращения и невысокой нагрузкой, а также на переходных режимах. С использованием математической модели проверена гипотеза о возможности корректирования характеристики впрыскивания топлива электрогидравлическим разрядом. При емкости конденсатора 0,009 мкФ и расстоянии между электродами в разрядной камере 10 мм, при варьировании начальным напряжением от 28 до 38 кВ возможно получение максимального давления в интервале от 43 до 73,4 МПа с фронтом волны давления 870 мкс (рисунок 13).

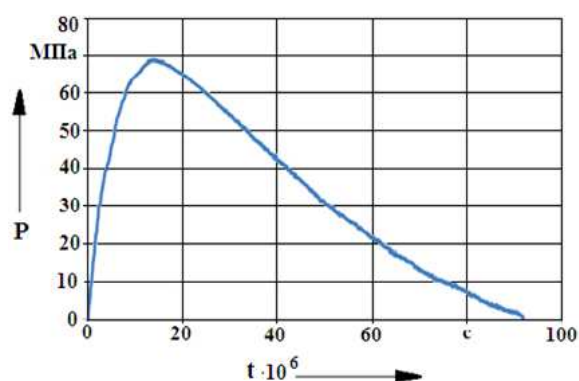


Рисунок 13 – Расчетное изменение давления ЭГУ при $U = 28$ кВ, $C = 0,009$ мкФ, $l = 10$ мм

Причем дальнейшее увеличение начального напряжения от 38 до 42 кВ незначительно увеличивает величину давления до 79 МПа.

Результаты осциллографирования высоковольтного разряда в дизельном топливе в целом подтверждают результаты моделирования:

- при $C = 0,0033$ мкФ, $l = 10$ мм и $U_{\text{нач}}$ ниже 40 кВ разряд отсутствует, вся запасенная энергия преобразуется в тепловую (рисунок 14);

- при увеличении $U_{\text{нач}}$ до 40 кВ разряд происходит, но при емкости конденсатора менее 0,01 мкФ до 60 % энергии теряется в момент развития стримеров, что, в свою очередь, вызывает понижение величины давления при ЭГ разряде (рисунок 15);

- получение «качественного» высоковольтного разряда, а соответственно, и максимального давления в дизельном топливе возможно при $U_{\text{нач}} = 40$ кВ, $C = 0,01$ мкФ, $l = 10$ мм (рисунок 16).

Экспериментальные исследования зависимости изменения давления, создаваемого электрогидравлическим разрядом, от параметров разряда позволили установить закономерности, представленные на рисунках 17–18.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования доказали возможность применения ЭГЭ и обосновывают состав и структуру электрогидравлической системы топливоподачи дизелей с целью:

- обеспечения резервирования штатной системы топливоподачи дизеля;
- корректирования процесса топливоподачи;
- облегчения пуска дизеля в условиях низких температур.

Структура системы топливоподачи с использованием ЭГЭ представлена на рисунке 19. Она содержит следующие элементы: блок синхронизации, блок управления характеристиками и частотой генерации разряда,

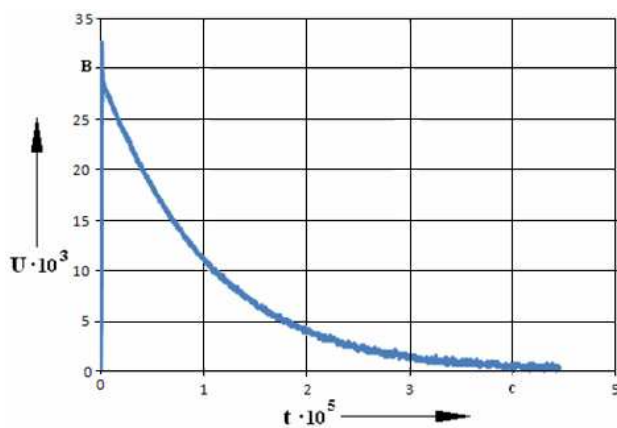


Рисунок 14 – Осциллограмма напряжения разряда при $U_{\text{нач}} = 33$ кВ, $C = 0,0033$ мкФ и $l = 10$ мм

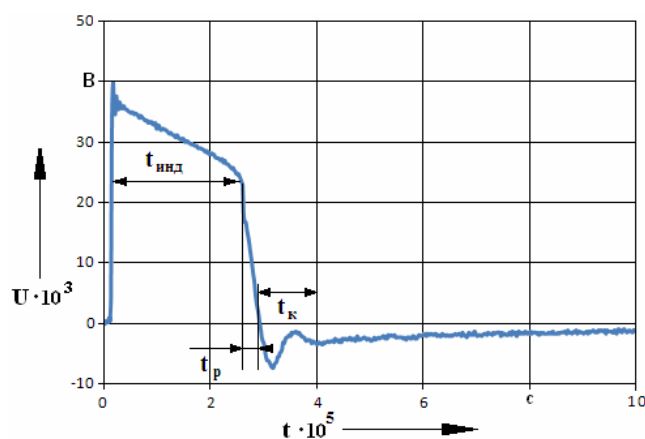


Рисунок 15 – Осциллограмма напряжения разряда при $U_{\text{нач}} = 40$ кВ, $C = 0,0033$ мкФ и $l = 10$ мм

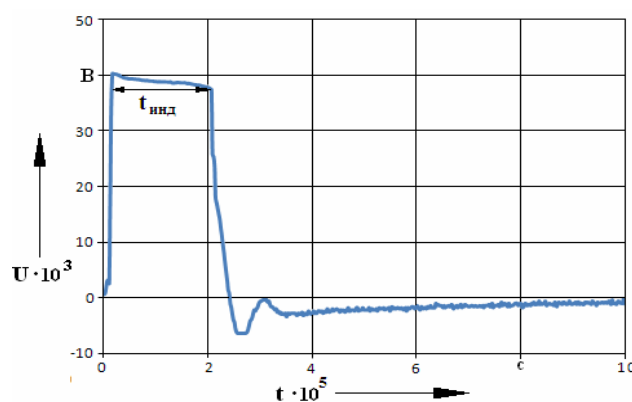


Рисунок 16 – Осциллограмма напряжения разряда при $U_{\text{нач}} = 40$ кВ, $C = 0,01$ мкФ и $l = 10$ мм

высоковольтный блок, блок формирования параметров задающего импульса, разрядная камера.

Таким образом, обоснован состав и структура электрогидравлической системы топливоподачи для применения в ТА дизеля, а также получены параметры высоковольтного разряда для отдельных режимов эксплуатации автомобиля КамАЗ-4310, а именно:

- для корректирования впрыскивания топлива изменением начального напряжения разряда от 30 до 40 кВ при емкости конденсаторов 0,01 мкФ и расстоянии между электродами в разрядной камере 10 мм изменяем величину давления от 45 до 77 МПа;

- для резервирующей (беспрецизионной) системы топливоподачи при $U_{нач} = 40$ кВ, межэлектродном расстоянии в разрядной камере 10 мм и емкости конденсаторов от 0,0033 до 0,01 мкФ возможно изменение величины давления от 45 до 77 МПа и цикловой подачи от 12,8 до 56,5 мм³;

- при обеспечении пусковых качеств в условиях низких температур для нагрева топлива необходимы следующие условия: начальное напряжение – 40 кВ, емкость конденсатора – до 0,002 мкФ и межэлектродное расстояние в разрядной камере – 10 мм.

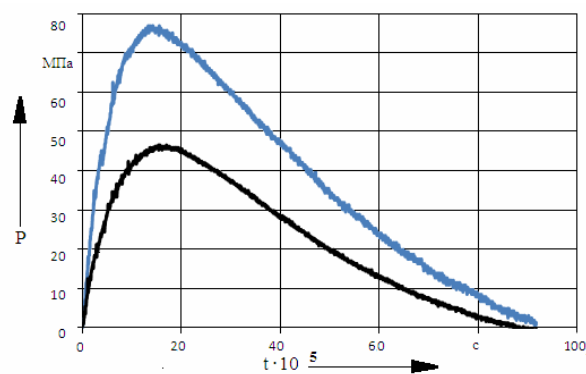
В работе выполнена оценка условий реализации и формирование требований к электрогидравлическим установкам в топливной аппаратуре дизелей.

Для эффективного применения в топливной аппаратуре дизелей электрогидравлических систем необходимо выполнение следующих условий:

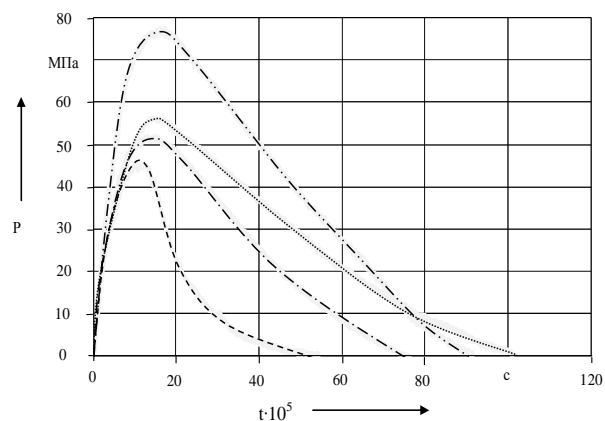
а) мощность, развиваемая в процессе ЭГУ, должна обеспечивать давление до 200 МПа. Это требование характерно для всех ЭГС, за исключением случаев их применения для экстремальных воздействий на топливо;

б) вытеснение топлива при разряде как за счет расширения канала разряда, так и за счет колебательных процессов, должно обеспечивать цикловые подачи пусковых режимов и режимов работы дизеля, соответствующих холостому ходу;

в) частота следования разрядов при четырехтактном рабочем процессе должна соответствовать половине частоты вращения коленчатого вала двигателя. Исключение могут составлять случаи использования ЭГС в качестве насоса в топливной аппаратуре типа «Common Rail». Для двигателя с номинальной частотой вращения 2600 об/мин эта величина составляет около 22 разрядов в секунду. Если ЭГС является системой рас-



при $U_{нач} = 40$ кВ; — при $U_{нач} = 30$ кВ
Рисунок 17 – Характеристика $P_{ЭГЭ}$ от $U_{нач}$ при $l = 10$ мм; $C = 0,01$ мкФ



— · · · — $l = 10$ мм; · · · · · $l = 6$ мм при $U_{нач} = 40$ кВ; $C = 0,01$ мкФ;
- - - - $l = 10$ мм; - · · - $l = 6$ мм при $U_{нач} = 40$ кВ; $C = 0,0033$ мкФ

Рисунок 18 – Характеристика давления $P_{ЭГЭ}$ от l

пределительного типа, то частота следования разрядных импульсов должна увеличиваться в n раз, где n – количество цилиндров;

г) ЭГС должна обладать хорошей воспроизводимостью электрогидравлических разрядов, надежностью, простотой в обслуживании.

На основании проведенных исследований сформулированы общие требования к электрогидравлическим системам топливоподачи дизелей.

Учитывая, что состав системы топливоподачи с использованием ЭГЭ в значительной мере зависит от целей, для достижения которых он используется, разработана классификация состава электрогидравлических устройств по целям их применения в системах топливоподачи дизелей (рисунок 20).

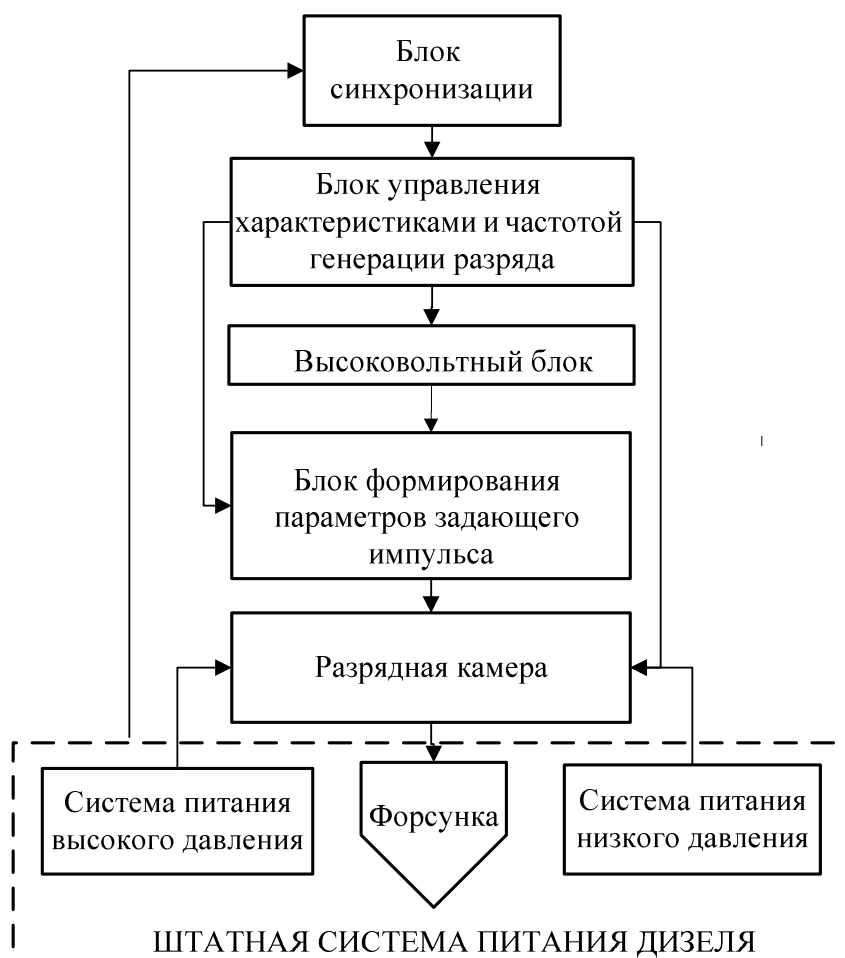


Рисунок 19 – Структура системы топливоподачи с использованием ЭГЭ

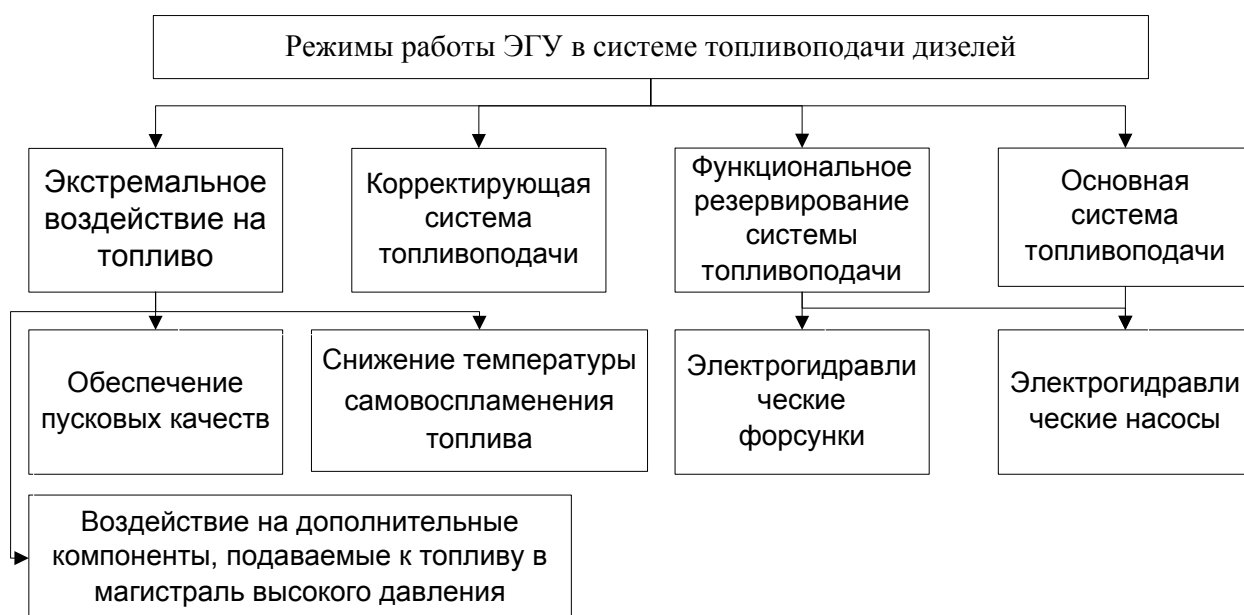


Рисунок 20 – Функциональная классификация электрогидравлических устройств в системе топливоподачи дизелей

Данная классификация показывает широкие возможности применения ЭГЭ в топливоподающей аппаратуре дизелей.

В шестой главе диссертации выполнена оценка технико-экономической эффективности предлагаемых технических решений, а также изменения технического уровня транспортного средства. Основу методики оценки технико-экономической эффективности составляет тягово-динамический расчет автомобиля у учетом предлагаемых технических решений (на примере автомобиля КамАЗ-4310 5 класса грузоподъемности). Расчеты показывают, что применение невозвратного клапана с подачей воздуха приводит к увеличению крутящего момента на низких частотах и уменьшению числа переключений передач, что увеличивает среднюю скорость движения автомобиля в тяжелых дорожных условиях до 7 %. Подачу воздуха в форсунки рекомендуется производить также при маневрировании в стесненных дорожных условиях, при этом возможны минимальные скорости движения без остановки двигателя и пробуксовки сцепления: 3 км/ч – на первой передаче в коробке передач и второй – в раздаточной коробке; 1,5 км/ч – на первой передаче в коробке передач и в раздаточной коробке.

Применение системы отбора тяжелых примесей экономически оценивается, исходя из следующих составляющих: экономии топлива при обслуживании фильтров, экономии фильтров, снижения трудоемкости ТО. Для расчета годового экономического эффекта используем нормы времени на технологические операции из сборника норм времени: слив отстоя из топливного бака и из корпуса фильтра грубой очистки топлива – по 0,2 ч, слив отстоя из корпусов фильтров тонкой очистки топлива, замена фильтрующих элементов – по 0,22 ч, снятие и промывка корпуса фильтра грубой и тонкой очистки топлива – по 0,36 ч. Нормы расхода топливных фильтрующих элементов применены из расчета 1170 фильтров на 100 автомобилей в год. Стоимость нормочаса при техническом обслуживании 400 р. Потери топлива при сливе конденсата из фильтров и топливного бака приняты 1 литр. Стоимость 1 литра дизельного топлива – 30 рублей. На основании представленных исходных данных годовой экономический эффект от применения функционального резервирования системы очистки топлива составляет более 10000 рублей в год на одну единицу техники без учета снижения износа плунжерных пар. При этом снижение трудоемкости ТО происходит до 12,5 %.

Тягово-динамический расчет автомобиля КамАЗ-4310 с дизелем с переменным способом смесеобразования, форсированным по частоте вращения до 3500 об/мин, показал значительное улучшение тягово-динамических характеристик: улучшение времени и пути разгона автомобиля полной массы – на 8,3 и 11,5 % соответственно, увеличение максимальной скорости движения по шоссе на 6,1 %. Применение предкамерного способа смесеобразования в случае обрыва распылителей форсунок позволит автомобилю КамАЗ-4310 полной массы выполнять транспортно-технологическую операцию. Годовой экономический эффект при параметрическом резервировании крутящего момента за счет применения переменного способа смесеобразования составляет не менее 8 тыс. руб. на автомобиль.

Анализ тягово-динамической характеристики при функциональном резервировании топливного насоса высокого давления показывает, что в эксплуатационных условиях при выходе из строя ТНВД или в случае обрыва (течи) топливопровода высокого давления при работе беспрецизионной (резервирующей) ЭГС топливоподачи работоспособность дизеля транспортного средства сохраняется с возможностью выполнения

транспортной или технологической операции.

Не менее важным фактором является облегчение пуска двигателя в условиях низких температур. Предлагаемая топливная аппаратура позволяет не только увеличить давление впрыскивания до 77 МПа, но и осуществлять нагрев топлива «стекающим» разрядом.

Оценка изменения технического уровня по показателю увеличения скорости движения, выполненная по методу иерархий Саати, позволяет сделать следующие выводы:

- параметрическое резервирование применением невозвратного клапана увеличивает технический уровень (ТУ) транспортного средства на величину от 0,002 до 0,003 единиц;
- параметрическое резервирование применением переменного способа смесеобразования увеличивает величину ТУ от 0,004 до 0,006 единиц;
- параметрическое резервирование пусковых качеств применением электрогидравлической системы топливоподачи в режиме слабонагруженного резерва увеличивает величину ТУ от 0,007 до 0,012 единиц.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана концепция обеспечения работоспособности дизелей транспортных средств, сущность которой состоит в применении параметрического резервирования как способа расширения области работоспособности объекта созданием запаса параметра и функционального резервирования основных функций топливной аппаратуры как способа обеспечения работоспособности.

2. Разработаны, обоснованы и экспериментально подтверждены методы параметрического резервирования в системе топливоподачи дизелей транспортных средств. Параметрическое резервирование крутящего момента за счет подачи воздуха в линию высокого давления через невозвратный клапан обеспечивает увеличение крутящего момента в диапазоне низких частот вращения коленчатого вала, в частности при $n = 700$ об/мин, – на 100–110 Н·м.;

Параметрическое резервирование крутящего момента применением переменного способа смесеобразования в области низких частот вращения обеспечивает увеличение крутящего момента при $n = 800$ об/мин по внешней скоростной характеристике на 75 Н·м, а при снижении частоты до 700 об/мин – более чем на 150 Н·м.

Представленные методы обосновывают улучшение тягово-скоростных свойств по показателю минимально устойчивой скорости движения и опорно-тяговой проходимости – по показателю максимального динамического фактора.

3. Разработан, обоснован и экспериментально подтвержден метод функционального резервирования системы очистки топлива путем последовательного поциклового отбора тяжелых примесей из топливного бака с использованием невозвратного клапана для обеспечения работоспособности дизеля. Показано, что на частотах вращения от 600–650 об/мин до $n_{\text{ном}}$ кулачкового вала ТНВД целесообразно подавать тяжелые примеси. В этом случае дизель менее чувствителен к цикловой добавке примесей, величина которой может составить до 17 %. Практическая реализация метода позволяет повысить технологичность обслуживания:

- исключить технологическую операцию слив отстоя из топливного бака при выполнении ТО1. Выполнять операцию при каждом втором ТО2;
- исключить технологическую операцию слив отстоя из корпусов фильтра тонкой и грубой очистки топлива при выполнении ТО1;
- технологическую операцию снятия и промывки корпусов фильтров грубой и тонкой очистки топлива выполнять при каждом втором ТО2;
- технологическую операцию замены фильтрующих элементов выполнять при каждом втором ТО2.

4. Исследована работоспособность дизеля с резервированием функции подачи топлива в цилиндр дизеля при отказе топливной форсунки и применением переменного способа смесеобразования. Сравнительный анализ скоростных характеристик предкамерного и объемного способов смесеобразования при зависшей игле форсунки показывает превышение показателей дизеля с предкамерным способом от 1,5 раз в области высоких частот вращения до 4 раз в области низких.

Результаты исследований показателей дизеля с предкамерным способом смесеобразования и форсункой без носка распылителя позволяют сделать вывод о частичной работоспособности двигателя со значительным ухудшением параметров, в том числе и пусковых качеств. Дизель с предкамерным смесеобразованием при обрыве носка распылителя значительно превосходит по эффективным показателям дизель с объемным способом во всем диапазоне частот вращения коленчатого вала.

5. Определены параметры электрогидравлических систем для топливоподачи в дизелях при функциональном резервировании топливного насоса высокого давления, параметрическом резервировании пусковых качеств и характеристики впрыскивания и разработаны состав и структура электрогидравлической системы топливоподачи для этих методов резервирования, а именно:

- для корректирования давления впрыскивания топлива в пределах от 45 до 77 МПа необходимо изменение начального напряжения разряда от 30 до 40 кВ при емкости конденсаторов 0,01 мкФ и расстоянии между электродами в разрядной камере 10 мм;

- для резервирующей (беспрецизионной) системы топливоподачи при $U_{нач} = 40$ кВ, межэлектродном расстоянии в разрядной камере 10 мм и емкости конденсаторов от 0,0033 до 0,01 мкФ возможно изменение величины давления от 45 до 77 МПа и цикловой подачи от 12,8 до 56,5 мм³;

- при обеспечении пусковых качеств в условиях низких температур для нагрева топлива необходимы следующие условия: начальное напряжение – 40 кВ, емкость конденсатора – до 0,002 мкФ и межэлектродное расстояние – 10 мм, что обосновывает параметрическое резервирование пусковых качеств за счет реализации стекающего разряда и подогрева топлива.

6. Разработаны структурно-логическая и математическая модель резервирования и модели исследуемых процессов. Модель газонасыщения топлива с использованием невозвратного клапана при параметрическом резервировании крутящего момента в зоне низких и высоких частот вращения показала возможность увеличения газосодержания топлива от 0,94 % при 800 об/мин кулачкового вала ТНВД до 1,52 % и 2,4 % при 600 и 1000 об/мин соответственно.

Разработана математическая модель отбора тяжелых примесей из топливного ба-

ка при функциональном резервировании системы очистки топлива. Установлены закономерности изменения расхода топлива через невозвратный клапан в зависимости от скоростного режима. На номинальной подаче разряжение имеет ярко выраженный минимум при $n = 800$ об/мин кулачкового вала ТНВД.

Разработана математическая модель рабочего процесса дизеля с предкамерным способом смесеобразования в дизеле с изменяющимся способом смесеобразования и позволяет прогнозировать форсирование дизеля по частоте вращения. Номинальная частота вращения для дизеля КамАЗ-740 может быть увеличена до 3600 об/мин, мощность дизеля с предкамерным смесеобразованием при частоте вращения 3600 об/мин практически равна номинальной мощности серийного дизеля с объемным смесеобразованием.

Уточнена математическая модель электрогидравлического разряда в топливе. Параметрический анализ электрогидравлической системы топливоподачи, выполненный с использованием математической модели, показал:

- в режиме корректирования процесса топливоподачи, при изменении начального напряжения от 28 до 38 кВ, при емкости конденсатора 0,009 мкФ и расстоянии между электродами 10 мм, возможно получение максимального давления в интервале от 43 до 73,4 МПа с фронтом волны давления 870 мкс;

- в режиме резервирующей (беспрецизионной) системы топливоподачи изменение начального напряжения от 30 до 40 кВ при межэлектродном расстоянии 10 мм и емкости конденсаторов 0,01 мкФ увеличивает диапазон изменения максимального давления от 45 до 77 МПа и цикловой подачи от 24,3 до 52,3 мм³ с фронтом давления от 500 до 900 мкс при генерации разрядов до 20 Гц.

7. Оценка технико-экономической эффективности предлагаемых технических решений при реализации мероприятий резервирования в системе топливоподачи дизелей, направленных на обеспечение работоспособности, дает основание сделать следующие выводы:

- применение невозвратного клапана с подачей воздуха приводит к улучшению опорно-тяговой проходимости и тягово-скоростных свойств, что уменьшает число переключений передач и увеличивает среднюю скорость движения автомобиля в тяжелых дорожных условиях до 7 %;

- анализ тягово-динамического расчета автомобиля КамАЗ-4310 с дизелем с переменным способом смесеобразования, форсированным по частоте вращения до 3600 об/мин, показал улучшение тягово-динамических характеристик: улучшение времени и пути разгона автомобиля полной массы на 8,3 и 11,5 % соответственно, увеличение максимальной скорости движения по шоссе на 6,1 %, что обосновывает улучшение тягово-скоростных свойств по показателю максимальной скорости движения;

- годовой экономический эффект при параметрическом резервировании крутящего момента за счет применения переменного способа смесеобразования составляет не менее 8 тыс. рублей на автомобиль. Экономический эффект от применения системы отбора тяжелых примесей с использованием невозвратного клапана составляет до 10 тыс. рублей в год на один автомобиль без учета снижения износа плунжерных пар;

- применение переменного способа смесеобразования обеспечивает ограниченную работоспособность автомобиля при выходе из строя элементов топливной аппаратуры (поломка пружины, зависание иглы форсунки, обрыв носика распылителя), но

средняя скорость транспортного средства снижается в среднем на 15 %.

Анализ изменения технического уровня по показателю увеличения средней скорости и готовности к движению позволяет сделать следующие выводы:

- параметрическое резервирование применением невозвратного клапана увеличивает ТУ транспортного средства на величину от 0,002 до 0,003 единиц;
- параметрическое резервирование применением переменного способа смесеобразования увеличивает величину ТУ от 0,004 до 0,006 единиц;
- параметрическое резервирование пусковых качеств применением электрогидравлической системы топливоподачи в режиме слабонагруженного резерва увеличивает величину ТУ от 0,007 до 0,012 единиц.

8. В результате проведенного исследования показана плодотворность концепции обеспечения работоспособности дизелей транспортных средств, построенной на принципах функционального и параметрического резервирования. Реализация предложенных в диссертационной работе методов и технических решений, в конечном счете, способствует развитию технологий резервирования не только систем топливоподачи дизелей, но и других технических систем, созданию систем с повышенной надежностью.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. **Заяц, Ю.А.** Двигатели внутреннего сгорания. Нетрадиционные схемы и рабочие процессы [Текст] : монография / Ю.А. Заяц, Е.Д. Сулов. – Рязань : РВАИ, 2005. – 120 с. ISBN 5-98942-004-8.
2. **Голубев, Д.С.** Резервирование систем топливоподачи дизелей военной автомобильной техники [Текст]: монография / Д.С.Голубев, Ю.А.Заяц. – Рязань: РВВДКУ, 2012. – 138 с. ISBN 978-5-4331-0031-2.
3. **Заяц, Ю.А.** Теория и математические методы планирования эксплуатации вооружения и военной техники с использованием информационных технологий [Текст]: монография / Ю.А. Заяц, Т.М. Заяц. – Рязань : РВАИ, 2011. – 102 с. ISBN 978-5-4331-0005-3.

Учебные пособия

4. **Заяц, Ю.А.** Тепловой расчет поршневых двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие [Текст] / Ю.А. Заяц. – Рязань : ВАИ, 2001. – 97с.
5. **Заяц, Ю.А.** Поршневые двигатели внутреннего сгорания: основные направления развития и совершенствования : учебное пособие [Текст]/ Ю.А.Заяц, А.А. Кочуров. – Рязань : ВАИ, 2002. – 96 с.
6. **Заяц, Ю.А.** Основы теории надежности: учебник [Текст] / Ю.А. Заяц. – Рязань : РВВДКУ, 2013. – 283 с.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

7. **Бойков, В.А.** Экспериментальные исследования характеристик дизелей при подаче воздуха в форсунку [Текст] / В.А. Бойков, Ю.А. Заяц // Изв. ТулГУ : серия «Автомобильный транспорт». – Тула : Изд-во ТулГУ, 2001. – Вып. 5.

8. **Заяц, Ю.А.** Дизель. Распыл топлива соударением струй [Текст] / Ю.А. Заяц // Автомобильная промышленность. – 2001. – № 9. – С. 13–14.

9. **Заяц, Ю.А.** Тяжелые примеси в топливе не снижают надежность дизеля [Текст] / Ю.А. Заяц, В.А. Бойков // Автомобильная промышленность 2000. – № 6. – С. 25.

10. **Заяц, Ю.А.** Невозвратный клапан – надежное средство очистки топлива от влаги [Текст] / Ю.А. Заяц, В.А. Бойков, О.А. Курис // Автомобильная промышленность. – 2002. – № 1. – С. 22–23.

11. **Заяц, Ю.А.** Электрогидравлический разряд как способ повышения эксплуатационных свойств дизеля [Текст] / Ю.А. Заяц, Д.С. Голубев // Автомобильная промышленность. – 2009. – № 9. – С. 10–11.

12. **Заяц, Ю.А.** Результаты экспериментальных исследований электрогидравлического разряда в топливе [Текст] / Ю.А. Заяц, Д.С. Голубев // Изв. ТулГУ. Технические науки. – Вып. 4. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2011. – С. 123–129.

13. **Заяц, Ю.А.** Состав системы топливоподачи с использованием электрогидравлического эффекта [Текст] / Ю.А. Заяц, Д.С. Голубев, П.И. Строков // Известия МГТУ МАМИ. – 2009. – № 2 (8). – С. 92–102.

14. **Заяц, Ю.А.** Топливоподача с использованием электрогидравлического эффекта: особенности лабораторной установки [Текст] / Ю.А. Заяц, Д.С. Голубев // Техника и технология. – 2009. – № 3. – С. 14–17.

15. **Заяц, Ю.А.** Двухконтурная система питания топливом дизеля [Текст] / Ю.А. Заяц, П.Н. Ткаченко // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 12. – С. 25.

16. **Заяц, Ю.А.** Четвертый способ смесеобразования в дизеле [Текст] / Ю.А. Заяц, В.Н. Шапран // Автомобильная промышленность. – 1999. – № 3. С. 16–17.

17. **Заяц, Ю.А.**, Предпосылки создания одноконтурных рабочих процессов [Текст] / Ю.А. Заяц, Е.Д. Суслов // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 12. – С. 25.

18. **Заяц, Ю.А.** Способ формирования характеристик впрыскивания топлива с использованием электрогидравлического эффекта [Текст] / Ю.А. Заяц, П.Н. Ткаченко // Техника и технология. – 2005. – № 4. – С. 15–17.

19. **Заяц, Ю.А.** Параметрический анализ структуры электрогидравлической установки для функционального резервирования системы топливоподачи дизелей [Текст] / Ю.А. Заяц, Д.С. Голубев // Мир транспорта и технологических машин. – Орел : Изд-во ОрГТУ, 2011. – № 3. – С. 21–24.

20. **Заяц, Ю.А.** Устройство для регулирования давления наддува двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Ю.А. Заяц, С.В. Бугаев // Естественные и технические науки. – 2006. – № 1. – С. 167–168.

21. **Суслов, Е.Д.**, Методика испытаний дизеля КамАЗ-740 с модернизированной ЦПГ [Текст] / Е.Д. Суслов, Ю.А. Заяц // Автомобильная промышленность. – 2005. – № 6. – С. 33–34.

22. **Ткаченко, П.Н.** Эксплуатация аварийно-спасательных машин в условиях низких температур [Текст] / П.Н. Ткаченко, Ю.А. Заяц, Т.М. Заяц // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты / Академия гражданской защиты МЧС России. – Химки, 2012. – № 1. – С. 15–18.

23. **Голубев, Д.С.** Анализ способов совершенствования топливной аппаратуры дизелей [Текст] / Ю.А. Заяц, Д.С. Голубев // Науч.-техн. сб. № 1 / 21-й науч.-исслед. испыт. ин-т. – Бронницы, 2009. – С. 61–76.

24. **Заяц, Ю.А.** Способ формирования характеристик впрыскивания топлива в дизель [Текст] / Ю.А. Заяц, В.А. Бойков, П.Н. Ткаченко : науч.-техн. сб. / 21 НИИАТ МО РФ, 2004. – № 3. – С. 47–52.

25. **Заяц, Ю.А.** Совершенствование смесеобразования двигателей внутреннего сгорания путем расслоения заряда [Текст] / Ю.А. Заяц, К.А. Чутков ; Ряз. воен. автомоб. ин-т. – Рязань, 2000. – Деп. в ЦСИФ МО РФ 09.03.2000 № 10787, инв. № В 4235.

26. **Заяц, Ю.А.** Регулирование степени сжатия с использованием вспомогательного поршня [Текст] / Ю.А. Заяц, Е.Д. Суслов, С.В. Полиненко, В.А. Бойков // Науч.-техн. сб. / 21 НИИАТ МО РФ. – 2004. – № 3. – С. 43–46.

27. **Заяц, Ю.А.** Обоснование корректирования характеристики впрыскивания [Текст] / Ю.А. Заяц, П.Н. Ткаченко / сборник научных трудов № 16 Рязань : РВАИ, 2005. – С. 8–11.

28. **Заяц, Ю.А.** Лабораторные исследования влияния эксплуатационных и конструктивных факторов на процессы топливоподачи [Текст] : тез. докл. XXIV науч.-метод. конф. воен. автомоб. ин-та / Ю.А. Заяц, А.Н. Патрин. – Рязань : ВАИ, 2000. – С. 169–171.

29. **Заяц, Ю.А.** Нетрадиционные способы топливоподачи и актуальность их применения в дизелях военной автомобильной техники [Текст] : тез. докл. XXXI межд. науч.-технич. конф. Ассоциации автомобильных инженеров России / Ю.А. Заяц. – М. : МАМИ. 2000.

30. **Заяц, Ю.А.** Обоснование целесообразности применения клапана регулирования начального давления на дизелях ВАТ [Текст] : тез. докл. XXX науч.-метод. конф. воен. автомоб. ин-та / Ю.А. Заяц, В.А. Бойков. – Рязань : РВАИ, 2002. – С. 188–190.

31. **Заяц, Ю.А.** Формирование структуры топливного факела [Текст] / Ю.А. Заяц // Известия ТулГУ, серия Автомобильный транспорт, вып. 10 : материалы 1-й международной научно-технической конференции «Эксплуатация и методы исследования систем и средств автомобильного транспорта». – Тула : Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 104–106.

32. **Голубев, Д.С.** Особенности применения электрогидравлических установок в топливной аппаратуре дизелей [Текст] / Д.С. Голубев, Ю. А. Заяц, П.И. Строков // Всероссийский НТС по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок им. проф. В.И. Крутова : Информация / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2009. – № 4 (77). – С. 121.

33. **Голубев, Д.С.** Состав и структура промышленных систем с реализацией электрогидравлического удара [Текст] : тез. докл. XXXIX науч.-метод. конф «Информационные технологии в образовательном процессе института» / Д.С. Голубев, Ю.А. Заяц. – Рязань : РВАИ, 2009. – С. 126–127.

34. **Заяц, Ю.А.** Система регулирования степени сжатия [Текст] : материалы регионального научн. техн. семинара / Ю.А. Заяц, М.А. Кузнецов. – Рязань: РВАИ, 2001. – С. 17–20.

35. **Заяц, Ю.А.** Экспериментальные исследования работы невозвратного клапана для очистки топлива [Текст] : материалы регионального научн. техн. семинара / Ю.А. Заяц, В.А. Бойков, О.А. Курис. – Рязань: РВАИ, 2001. – С. 20–22.

36. **Заяц, Ю.А.** Топливоподача с использованием электро-гидравлического эффекта [Текст] : материалы международной науч.-практ. конф. «Проблемы и основные направления развития военного образования ВДВ» в 2 ч. / Ю. А. Заяц, Д. С. Голубев.– Ряз. воен. возд-десант. ком. училище. – Рязань, 2008. – Ч. 1. – С. 201–205.

37. **Заяц, Ю.А.** Проблемы резервирования в системе топливоподачи дизелей [Текст] : матер. науч.-практ. конф. 17–18 мая 2011 г. «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса» / Ю.А. Заяц.– ФГОУ ВПО «Государственный университет учеб.-науч.-производственный комплекс». – Орел, 2011. – С. 78–80.

Патенты

38. **Пат. 2184265 Российская Федерация, МПК F 02 M 55/00.** Система подачи топлива в дизель [Текст] / Заяц Ю.А.; Бойков В. А. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. – №2000108810/06; заявл. 07.04.2000; опубл. 27.06.2002, Бюл. № 18. – 6 с. : ил.

39. **Пат. 2157913 Российская Федерация, МКИ F 02 M 57/02.** Насос-форсунка [Текст] / Заяц Ю.А. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. ; опубл. 20.10.00, Бюл. № 29. – 6 с. : ил.

40. **Пат. 2187672 Российская Федерация, С2 МКИ F 02 B 75/04, F 02 D 15/04.** Двигатель внутреннего сгорания с регулируемой степенью сжатия [Текст] / Заяц Ю.А., Кузнецов М.А. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т.; опубл. 20.08.02, Бюл. № 23. – 6 с. : ил.

41. **Пат. 2291974 Российская Федерация.** Поршневой двигатель внутреннего сгорания с регулируемой степенью сжатия [Текст] / Заяц Ю.А., Камышенцев Ю.И., Сухоруков А.К.; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т.; опубл. 20.01.2007, Бюл. № 3.– 5 с. : ил.

42. **Пат. 2293192 Российская Федерация.** Двигатель внутреннего сгорания с вращающимся поршнем [Текст] / Заяц Ю.А., Чудников Д.Н., Полинченко С.В. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. ; опубл. 10.02.2007, Бюл. № 4.– 5 с. : ил.

43. **Пат. 2293872 Российская Федерация.** Устройство для регулирования наддува двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Буробина Г.Н., Бугаев С.В., Заяц Ю.А., Петров К.Н. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. ; опубл. 20.02.2007, Бюл. № 5.– 4 с. : ил.

44. **Пат. 2321763 Российская Федерация, МПК F 02 M 43/00.** Система подачи топлива в дизель [Текст] / Заяц Ю.А.; Полинченко С.В. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. – № 2006120037/06 ; заявл. 07.06.2006 ; опубл. 10.04.2006, Бюл. № 10. – 5 с. : ил.

45. **Пат. 2269662 Российская Федерация, МПК F 02 B 55/02.** Система подачи топлива в дизель [Текст] / Заяц Ю.А. Ткаченко П.Н.; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. – № 2002125419/06 ; заявл. 10.04.2004 ; опубл. 10.02.2006, Бюл. № 4. – 4 с. : ил.

46. Пат. **2269670 Российская Федерация, МПК F 02 M 55/02.** Система подачи топлива в дизель [Текст] / Заяц Ю.А., Ткаченко П.Н., Бобов П.А. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. – № 2002125420/06 ; заявл. 10.04.2004 ; опубл. 10.02.2006, Бюл. №4. – 4 с. : ил.

47. Пат. **2312995 Российская Федерация, МПК F 02 B 75/02.** Способ организации рабочего цикла ДВС и устройство для его реализации [Текст] / Заяц Ю.А., Суслов Е.Д. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. – № 2003112584/06 ; заявл. 28.04.2003 ; опубл. 20.12.2007, Бюл. № 35. – 4 с. : ил.

48. Пат. **2289700 Российская Федерация, МПК F 02 B 19/06.** Поршневой двигатель внутреннего сгорания. [Текст] / Заяц Ю.А.; Зайцев А.С. заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. – № 2002126018/06 ; заявл. 30.09.2002 ; опубл. 20.12.2006, Бюл. № 36. – 6 с. : ил.

49. Пат. **2291318 Российская Федерация, МПК F 02 M 61/16.** Система подачи топлива в дизель. [Текст] / Заяц Ю.А., Телешов А.П., Суслов Е.Д. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. – № 2004105383/06 ; заявл. 24.02.2004 ; опубл. 10.01.2007, Бюл. № 1. – 6 с. : ил.

50. Пат. **2321764 Российская Федерация, МПК F 02 M 59/46.** Насосная секция топливного насоса высокого давления дизеля [Текст] / Заяц Ю.А., Сорокин А.С. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. – № 2006117151/06; заявл. 18.05.2006; опубл. 10.04.2008, Бюл. № 10.– 4с.: ил.

51. Пат. **2406869 Российская Федерация, МПК F 02 M 59/00.** Насосная секция топливного насоса высокого давления дизеля [Текст] / Вавилов П.А.; Заяц Ю.А. заявитель и патентообладатель ФГУ 21 НИИИ МО РФ. – № 2009124861 ; заявл. 29.06.2009; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35.– 4с.: ил.

52. Пат. **76603 Российская Федерация, МПК B60K 15/03.** Топливный бак наземного транспортного средства [Текст] / Заяц Ю.А.; Голубев Д.С., Цыбизов Е.И., Козлов Д.Ю., Сухинин В.А., Бакушин А.С. ; заявитель и патентообладатель Ряз. воен. автомоб. ин-т. – № 2008117858/22 ; заявл. 04.05.2008 ; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27. – 4с. : ил.

53. Пат. **86669 Российская Федерация, МПК F 02 M 55/00.** Система подачи топлива в дизель [Текст] / Голубев Д.С., Заяц Ю. А., Цыбизов Е.И., Пузевич Н.Л.; заявитель и патентообладатель Рязанский военный автом. институт. – № 2009116590/22 ; заявл. 30.04.09 ; опубл. 10.09.09, Бюл. № 25. – 3 с. : ил.

