

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
**ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический  
университет»**

Институт «Авиамашиностроения и транспорта»

Кафедра «Автомобильный транспорт»

На правах рукописи



**ЯКИМОВ ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ  
ФОРСУНОК АВТОМОБИЛЯ С ДИЗЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ  
ПО ПАРАМЕТРАМ ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА ТОПЛИВА В  
ОБЩЕЙ ОБРАТНОЙ МАГИСТРАЛИ**

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук по специальности

05.22.10 - Эксплуатация автомобильного транспорта

**Научный руководитель:**

доктор технических наук,

доцент, **Кривцов С. Н.**

Иркутск - 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| АББРЕВИАТУРЫ И СОКРАЩЕНИЯ.....   | 5  |
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 6  |
| 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....  | 13 |
| 1.1. Современные тенденции развития топливоподающих систем дизельных двигателей.....   | 13 |
| 1.2. Обзор математических моделей и программного обеспечения для моделирования гидродинамических процессов аккумуляторных топливоподающих систем.....                                      | 20 |
| 1.3. Анализ работ, посвященных эксплуатации автомобилей с аккумуляторными топливоподающими системами.....  | 25 |
| 1.4. Анализ методов и средств диагностирования аккумуляторных топливоподающих систем.....  | 33 |
| 1.5. Выводы и задачи исследования.....   | 39 |
| 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ФОРСУНОК АВТОМОБИЛЯ С ДИЗЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА ТОПЛИВА В ОБЩЕЙ ОБРАТНОЙ МАГИСТРАЛИ..... | 40 |
| 2.1. Анализ процесса функционирования электрогидравлической форсунки.....  | 40 |
| 2.2. Математическое описание гидродинамических процессов.....  | 44 |
| 2.3. Математическое описание процесса функционирования электрогидравлической форсунки.....   | 49 |
| 2.4. Теоретическое обоснование разработанного метода диагностики электрогидравлических форсунок.....   | 57 |
| 2.5. Выводы по второй главе.....   | 62 |
| 3. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....  | 64 |
| 3.1. Общая методика экспериментального исследования процесса функ-   |    |

|  |     |
|--|-----|
| ционирования ЭГФ при изменении ее технического состояния.....  | 64  |
| 3.2. Методика определения диагностических нормативов исследуемой электрогидравлической форсунки.....   | 66  |
| 3.3. Методика определения исходных данных исследуемой электрогидравлической форсунки.....  | 70  |
| 3.4. Оборудование для контроля функциональных показателей и диагностики электрогидравлических форсунок.....  | 72  |
| 3.4.1. Требования к оборудованию.....  | 72  |
| 3.4.2. Описание стенда для проверки функциональных показателей и диагностики ЭГФ.....  | 73  |
| 3.5. Методика определения взаимосвязи цикловой подачи и расхода топлива на управление с управляющими и структурными параметрами.....                       | 75  |
| 3.6. Методика экспериментального исследования взаимосвязи давления и расхода топлива в общей обратной магистрали с техническим состоянием ЭГФ.....         | 78  |
| 3.7. Оборудование для экспериментального исследования взаимосвязи давления и расхода топлива в общей обратной магистрали с техническим состоянием ЭГФ..... | 83  |
| 3.7.1. Требования к оборудованию.....  | 84  |
| 3.7.2. Описание оборудования.....  | 85  |
| 3.8. Методика тарировки систем измерения.....  | 90  |
| 3.9. Методика обработки диагностического сигнала давления в обратной магистрали.....   | 94  |
| 3.10. Методика оценки погрешности эксперимента.....  | 95  |
| 3.11. Методика планирования экспериментальных исследований.....  | 97  |
| 3.12. Методика оценки адекватности математической модели.....  | 99  |
| 3.13. Выводы по третьей главе.....   | 100 |
| 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....  | 101 |

|                               |   |     |
|-------------------------------|---|-----|
| 4.1.                          | Оценка адекватности математической модели процесса функционирования автомобильной электрогидравлических форсунок дизельного двигателя при износе управляющего клапана в условиях эксплуатации.....        | 101 |
| 4.2.                          | Результаты исследования закономерностей изменения расхода топлива на управление, давления в общей обратной магистрали и цикловых подач электрогидравлических форсунок от износа управляющего клапана..... | 108 |
| 4.3.                          | Результаты исследования процесса формирования диагностических параметров в общей магистрали при изменении технического состояния управляющего клапана и расположения форсунок.....                        | 115 |
| 4.4.                          | Результаты производственной проверки и технико-экономическая оценка результатов исследования.....   | 127 |
| 4.4.1.                        | Технико-экономическая оценка результатов исследования в условиях автотранспортных предприятий (на примере МУП ИркутскАвтоТранс).....  | 127 |
| 4.4.2.                        | Технико-экономическая оценка результатов исследования в условиях специализированных сервисных предприятий.....  | 138 |
| 4.5.                          | Результаты и выводы по четвёртой главе.....   | 140 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....               |   | 142 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... |   | 144 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ.....               |   | 161 |

**Основные принятые сокращения.**

АДТ – аккумулятор давления топлива;

АТП – автотранспортное предприятие;

АТПС – аккумуляторная топливоподающая система;

АТС – автотранспортное средство;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ИТН – индивидуальный топливный насос;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЛВД – линия высокого давления;

РОВ – ремонтно-обслуживающие воздействия;

СТД – средство технической диагностики

ТАВД – топливный аккумулятор высокого давления;

ТНВД – топливный насос высокого давления;

ТПН – топливоподкачивающий насос;

ТПС – топливоподающая система;

ТС – транспортное средство;

ШИМ – широтно – импульсная модуляция;

ЭБУ – электронный блок управления

ЭГФ – электрогидравлическая форсунка;

ЭСУД – электронная система управления двигателем;

APCRS – АТПС с форсунками со встроенным мультипликатором давления;

CR – АТПС – Common Rail.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность научного исследования.** Автомобильный транспорт обладает преимуществами, отличающими его от других видов транспорта, самое значимое из которых - мобильность, возможность доставлять грузы и пассажиров по принципу «от ворот до ворот». Это определяет высокую актуальность его развития и использования, как в настоящем, так и в обозримом будущем.

Развитие мировых экономик приводит к росту количества транспортных средств, что представляет серьёзную проблему для экологии планеты. Такая ситуация направляет усилия учёных и инженеров на решение вопросов компромисса экологических и функциональных показателей силовых установок, путём совершенствования конструкций топливоподающих систем. С этой же целью проводятся исследования о возможности применения на дизельных двигателях альтернативных видов топлива [83, 140].

Основным типом силовых агрегатов автомобилей коммерческого сектора является дизельный двигатель. Такой тип двигателя экономичен, а оснащённые им автомобили успешно эксплуатируются во всех климатических зонах страны. Для реализации высоких экологических требований автомобильные дизели оснащаются современными высокоточными системами топливоподачи. Широко распространённым представителем таких систем является топливоподающая система аккумуляторного типа (АТПС) – Common Rail. Ухудшение технического состояния практически любого ее элемента приводит к значительному ухудшению экологических, а далее и эксплуатационных показателей автомобиля, а потому техническое состояние АТПС должно систематически контролироваться.

Вместе с тем, принимая во внимание накопленный наукой опыт [4, 22, 43, 47, 48, 59, 74, 76, 85, 88, 91], контроль технического состояния этих наукоёмких и технически сложных топливоподающих систем имеет ряд осо-

бенностей, что, в свою очередь, требует новых знаний, методов и решений [2, 3, 9, 34]. Наиболее важными и наименее надежными элементами АТПС являются электрогидравлические форсунки (ЭГФ). В настоящее время диагностика технического состояния ЭГФ является дорогостоящей и трудоемкой процедурой, т.к. выполняется на специализированных стендах и связана с большим объемом разборочно-сборочных работ. В случае, когда форсунки расположены под клапанной крышкой, доступным местом для диагностических проверок является общая обратная магистраль, но существующими методами получается определить только общее техническое состояние и необходимость демонтажа всех ЭГФ [7, 27, 28, 29, 52, 53]. Попытки снизить трудоемкость и повысить информативность контроля технического состояния аккумуляторных топливоподающих систем автомобильных дизелей известными методами [108] наталкиваются на противоречие, вызванное недостатком знаний о закономерностях изменения давления и расхода топлива в общей обратной магистрали аккумуляторных топливоподающих систем при износе ЭГФ. В связи с этим, выполнение научного исследования, направленного на уменьшение трудоемкости и повышение эффективности диагностики электрогидравлических форсунок системы Common Rail, является актуальным.

**Цель исследования.** Снижение трудоемкости и повышение информативности диагностики электрогидравлических форсунок аккумуляторных топливоподающих систем автомобильных дизелей в условиях эксплуатации при использовании разработанного метода по расходу и давлению топлива в общей обратной магистрали.

**Научная гипотеза.** Трудоемкость диагностики электрогидравлических форсунок автомобилей в условиях эксплуатации можно понизить, а информативность повысить, если оценку их технического состояния осуществлять путем определения индивидуальных утечек ЭГФ по параметрам давления и расхода топлива в общей обратной магистрали дизельного двигателя с учетом порядка работы и расположения.

**Объект исследования.** Процесс функционирования автомобильной электрогидравлической форсунки дизельного двигателя при износе управляющего клапана в условиях эксплуатации.

**Предмет исследования.** Закономерности изменения диагностических параметров давления и расхода топлива в общей обратной магистрали и цикловых подач в зависимости от износа управляющего клапана электрогидравлических форсунок.

**Задачи исследования:**

1. Разработать математическую модель процесса функционирования автомобильной электрогидравлической форсунки дизельного двигателя при износе управляющего клапана, позволяющую использовать давление и расход в обратной магистрали в качестве диагностических параметров.
2. Выполнить исследование процесса функционирования электрогидравлических форсунок при изменении их технического состояния и выявить диагностические параметры, характеризующие износ управляющего клапана.
3. Научно обосновать и разработать метод диагностики электрогидравлических форсунок дизельного двигателя по параметрам расхода топлива и давления в общей обратной магистрали.
4. Выполнить производственную проверку результатов исследований и дать им технико-экономическую оценку.

**Научной новизной обладают:**

1. Математическая модель процесса функционирования электрогидравлических форсунок автомобильного дизельного двигателя, отличающаяся тем, что учитывает изменение технического состояния в процессе эксплуатации;
2. Выявленные закономерности, характеризующие изменение давления и расхода топлива в общей обратной магистрали, в зависимости от

технического состояния электрогидравлических форсунок аккумуляторных топливоподающих систем;

3. Метод диагностики электрогидравлических форсунок аккумуляторных топливоподающих систем по расходу и давлению топлива в общей обратной магистрали.

**Теоретическая значимость исследования.** Разработанное математическое описание позволяет выполнять аналитические исследования влияния технического состояния ЭГФ аккумуляторных топливоподающих систем на эксплуатационные характеристики дизелей.

Выявленные закономерности изменения давления и расхода топлива в общей обратной магистрали могут быть использованы для аналитических исследований технического состояния электрогидравлических форсунок аккумуляторных топливоподающих систем.

**Практическая значимость исследования.** Разработанный метод и реализующее его оборудование, на предприятиях, занимающихся эксплуатацией ТО и ремонтом АТПС дизелей, позволят за счёт повышения информативности значительно снизить трудоемкость диагностирования аккумуляторных топливоподающих систем автомобильных дизелей в условиях эксплуатации.

Разработчикам диагностического оборудования, предлагаемый метод позволяет совершенствовать существующие и разрабатывать новые высокоэффективные автоматизированные системы диагностики ЭГФ, в том числе бортовые.

Преподавателям автомобильных специальностей технических ВУЗов результаты исследований позволят повысить качество подготовки специалистов в области технической эксплуатации и диагностики автотранспортных средств.

**Методы исследований:**

- Аналитические исследования проводились при использовании численных методов решения дифференциальных уравнений, методов математического моделирования и анализа;

- Планирование экспериментального исследования, обработку полученных результатов и оценку адекватности математической модели исследуемого процесса осуществляли методами математической статистики и теории вероятности;

- Экспериментальные исследования проведены с помощью серийно – выпускаемого и оригинального, метрологически – поверенного оборудования.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы приняты к внедрению на МУП ИркутскАвтоТранс, в сервисном авторизованном Delphi и Denso «ВИАН-Дизель», а также в учебный процесс ФГБОУ ВО ИРНИТУ при подготовке бакалавров по направлению 23.03.03 и магистров по направлению 23.04.03.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1) При математическом моделировании процесса функционирования электрогидравлической форсунки износ управляющего клапана описывается величиной суммарной неплотности  $\mu f_{\Sigma}$  и изменением геометрической формы запорного конуса.

2) Износ управляющего клапана электрогидравлических форсунок приводит к уменьшению амплитудно-фазовых параметров давления топлива и росту величины расхода на управление в общей обратной магистрали.

3) Выявление индивидуального расхода форсунки через общий расход в обратной магистрали целесообразно выполнять через параметр  $S_i$ , характеризующий изменение давления с учётом износа, взаимного расположения и порядка работы.

**Апробация работы.** Материалы научного исследования доложены и одобрены на:

6-ой международной научно-практической конференции, Новосибирск 2015, СибФТИ; 90-й, 99-й и 106-й Международных научно-технических конференциях Ассоциации автомобильных инженеров, в ИРНИТУ, г. Иркутск (апрель 2015 г., 2017 г., 2019 г.); I и II-й Всероссийских научно-практических конференциях «Наземные транспортно-технологические средства: проектирование,

производство, эксплуатация», ЗабГУ, г. Чита (октябрь 2016 г., 2018 г.); VII и X-й Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири», г. Иркутск (2016 г. и 2018 г.); Научно-практической конференции ВСГУТУ посвящённой 95-летию образования республики Бурятия, г. Улан – Удэ (апрель 2018 г.); II Международная научно-практическая конференция"; Мехатроника, автоматика и робототехника", Новокузнецк, февраль 2018; ФГУП НАМИ, Москва, март 2017.

**Личный вклад автора.** При проведении научного исследования автор лично:

- Разработал математическую модель функционирования электрогидравлической форсунки в системе «форсунка – стенд», позволяющую определять и классифицировать функциональные показатели исследуемой ЭГФ, при изменении её технического состояния;
- Разработал математическую модель функционирования ЭГФ в системе «форсунка – аккумуляторная топливоподающая система», позволяющую выявлять влияние технического состояния ЭГФ на показатели её функциональных параметров, в том числе, на давление в общей обратной магистрали.
- С помощью разработанных математических моделей произвёл расчёты исследуемых процессов и выявил основные зависимости.
- Выполнил аналитические и экспериментальные исследования, позволившие выявить закономерности изменения давления и расхода топлива в общей обратной магистрали АТПС от изменения технического состояния ЭГФ.
- Разработал устройство и метод контроля технического состояния ЭГФ по расходу и давлению топлива в общей обратной магистрали АТПС.

По материалам диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ общим объёмом 5,5 усл. п. л., (автору принадлежит 2,41 усл. п. л.), из них 3 статьи в изданиях из Перечня ВАК РФ и 3 в журналах, индексируемых международной системой цитирования Scopus и WOS.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, основных выводов и результатов, списка использованных ис-

точников, включающего 160 наименований, в том числе 41 на иностранном языке и приложений с материалами результатов исследования и их апробации. Работа представлена на 176 страницах машинописного текста и насчитывает 10 таблиц, 70 рисунков и 6 приложений.

Работа выполнена на кафедре «Автомобильный транспорт», в Иркутском национальном исследовательском техническом университете, в период с 2015 по 2020 гг.

Свою глубокую признательность за непосредственную помощь в период выполнения работы и ценные советы, автор выражает научному руководителю, профессору кафедры «Автомобильный транспорт» Кривцову С.Н. и методическому консультанту, заведующему кафедрой «Автомобильный транспорт» ИРНТУ д.т.н., профессору А.И. Федотову.

## **1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В данной главе проведён обзор научных трудов, посвящённых исследованиям в области топливopодающих систем дизельных двигателей. Рассмотрен принцип функционирования аккумуляторной топливopодающей системы, выявлены её достоинства и недостатки. Приведены факторы, влияющие на техническое состояние АТПС. Выявлены наиболее ответственные компоненты и узлы, влияющие на качество топливopодачи. Выполнен анализ средств и методов контроля технического состояния электрогидравлических форсунок, как ключевых составляющих АТПС.

### **1.1. Современные тенденции развития топливopодающих систем дизельных двигателей.**

Рост населения, улучшение качества жизни, увеличивает потребности людей, это приводит к появлению технологий, определяющих уровень развития человечества. Во главу угла ставятся такие качества, как производительность, экономичность и, что особенно важно, экологические показатели [73, 110]. Автомобильный транспорт, как одна из ключевых отраслей современной экономики, является локомотивом развития технологий [46].

Развитая инфраструктура топливно-энергетического сектора России делает актуальным использование двигателей внутреннего сгорания, среди которых особое место занимает дизель.

Дизельные двигатели обладают рядом значительных преимуществ, история их эксплуатации исчисляется многими десятилетиями. Бесспорно, автомобили с дизельным двигателем в России составляют и будут составлять основу грузопассажирского сектора, сектора строительных и дорожных машин, машин военного назначения, сектора транспортных средств и машин сельскохозяйственной отрасли. Не является исключением и легковой транс-

порт.

Однако, краеугольным камнем при увеличении количества транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, является и рост объёмов выхлопа отработавших газов. В 2015 году введен очередной экологический стандарт Евро-6. Это заставляет производителей автомобилей с дизельными двигателями совершенствовать системы подачи топлива (рис. 1.1).

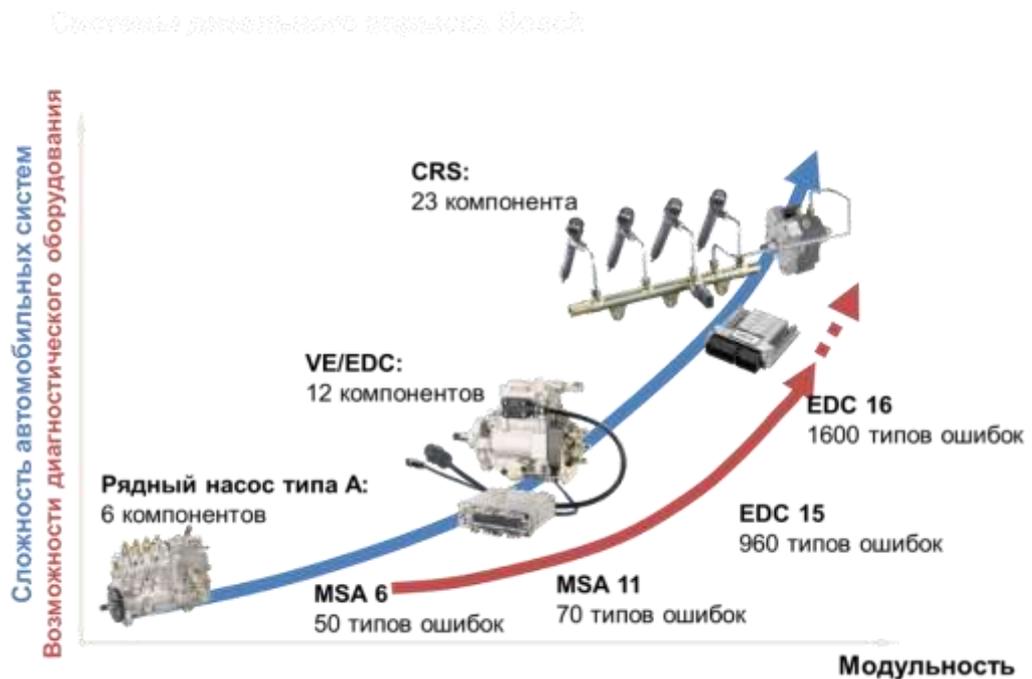


Рис. 1.1. Эволюция систем топливоподачи дизелей.

Дизель, оборудованный АТПС по сравнению с ранними системами топливоподачи [40], имеет более высокие экологические показатели, тягово - скоростные характеристики, высокую экономичность, плавность и малую шумность работы. Поэтому АТПС (CR) получила широкое распространение среди систем топливоподачи дизелей и является одной из самых перспективных на сегодняшний день [39, 112].

Совершенство такой дизельной топливоподающей системы заключается в точности подачи топлива, что позволяет достичь наилучших экологических и эксплуатационных показателей [54, 55]. Этим обусловлен постепенный отказ от механических систем и переход к системам с электронным и электрическим управлением [96, 97, 103, 104]. Причём задача конструкции

сводится к максимальному приближению дозирующего топливоподающего устройства к камере сгорания цилиндра двигателя, для минимизации нежелательных волновых процессов в топливе, влияющих на процесс впрыска. Такой подход, в совокупности с возможностями современной электроники, значительно усиливает точность топливоподачи, например, по сравнению с механической системой, имеющей гидравлически управляемую форсунку и достаточно длинные трубки высокого давления. Однако, при рабочих давлениях в современных АТПС (свыше 250 МПа), роль гидродинамических процессов значительно возрастает [113].

Более высокое рабочее давление, опять же, благодаря современной электронике способствует быстрдействию и точности подачи топлива [75]. Перечисленными качествами обладают серийные современные дизельные ТПС, насос-форсунки, индивидуальные топливные насосы и аккумуляторные системы топливоподачи - Common Rail [95, 127].

Топливоподающие системы с насос-форсунками и индивидуальными топливными насосами отличаются тем, что имеют одноплунжерный насос, как правило, с приводом от кулачкового вала. Давление в таких системах зависит от формы приводящего кулачка (рис. 1.2).

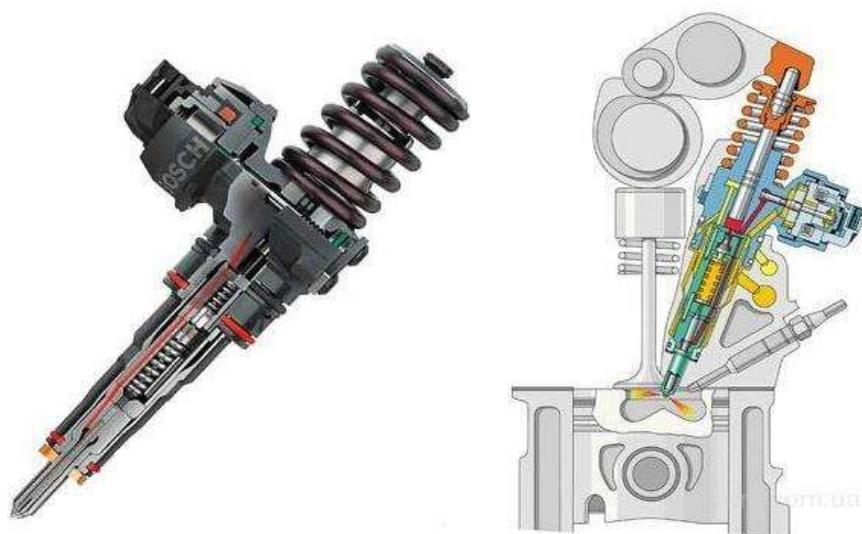


Рис. 1.2. Насос-форсунка.

Отличие Насос-форсунки от ИТН заключается в том, что у насос-форсунки плунжер и распылитель находятся в одном корпусе, а у ИТН насос находится отдельно и соединён с форсункой трубопроводом высокого давления (рис. 1.3). Преимущества насос-форсунок в их компактности, а за счет близости насоса к распылителю, практически отсутствие влияния волновых процессов при впрыскивании. Кроме того, они надежны и долговечны.



Рис 1.3. Индивидуальный топливный насос с форсункой.

Однако, насос-форсунки через кулачковый вал нагружают головку блока цилиндров, так же могут возникать трудности при разработке конструкции двигателя и компоновке его узлов. ИТН позволяет избежать нагрузок на ГБЦ, но при этом появляются нежелательные конструкции нагнетающих трубопроводов.

С началом применения в конструкциях насос-форсунок и ИТН электромагнитного и пьезоэлектрического [81, 86] управления клапанами, данные ТПС значительно увеличили гибкость топливоподачи, однако сдерживаю-

щим фактором дальнейшего развития является конструктивная зависимость от времени набора максимального давления, что особенно сказывается на режимах частичной загрузки двигателя и низкой частоты вращения коленчатого вала. Данный факт является недостатком рассмотренных систем, что значительно усложняет выполнение норм Евро-6.

Системы топливоподачи аккумуляторного типа лишены такого недостатка (рис. 1.4). В данных системах процессы получения высокого давления и дозирования топлива в цилиндры – разделены. В отличие от других типов ТПС высокое давление в АТПС практически не зависит от режимов работы двигателя. Такое преимущество вместе с электронным управлением ЭГФ, позволяет точно и равномерно подавать топливо в цилиндры двигателя.

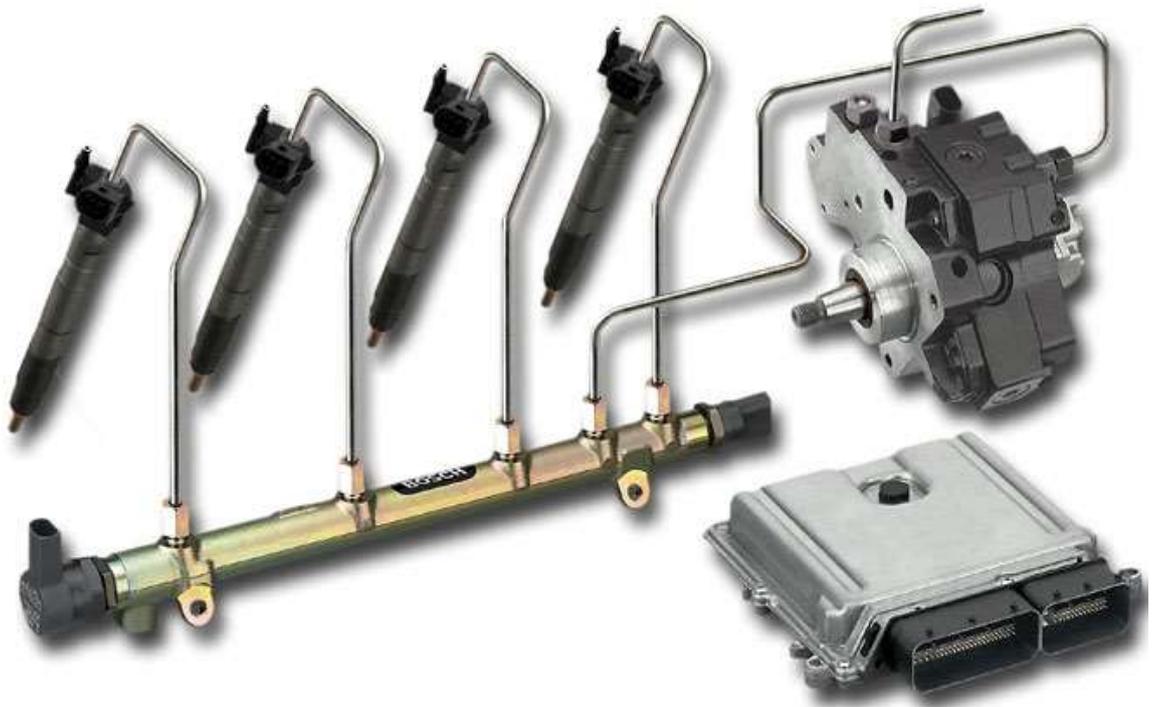


Рис. 1.4. Топливоподающая система Common Rail.

Результатом является значительное увеличение быстродействия и гибкости топливоподачи. Современные аккумуляторные системы, позволяют произвести более 7 впрыскиваний за цикл. Двигатель, оснащённый АТПС, не нуждается в дополнительных конструкциях механической части. АТПС даёт

больше преимуществ при разработке и конструировании, она более гибка и перенастраиваема, под задачи, поставленные разработчиками силовых установок автомобилей.

Улучшение показателей двигателя требует более точной дозировки и многократного впрыскивания. Время открытия управляющего клапана электромагнитом форсунок 1-го и 2-го поколения, составляет 0,2-0,4 мс [10]. С целью улучшения быстроты срабатывания, клапана форсунок 3-го поколения оснащаются пьезопроводом. [119, 124, 128, 141], что позволяет значительно увеличить быстродействие и время срабатывания управляющего клапана становится менее 0,1 мс. Однако технология производства пьезопроводов ЭГФ сложнее и дороже производства электромагнитов. В связи с этим разработки быстродействующих электромагнитных конструкций управляющих клапанов продолжают.

Фирма BOSCH предлагает конструкцию гидравлически разгруженного клапана [121, 130]. Характеристика работы такого управляющего клапана сравнима с клапанами с пьезопроводом. При 180 МПа открытие и закрытие такого клапана происходит в течении 0,15 и 0,115 мс, соответственно, в то время как у шарикового 0,2 и 0,18 мс [133].

Фирма DENSO тоже имеет разработки быстродействующего электромагнитного клапана, практически не уступающего по скорости срабатывания клапану пьезоэлектрическому [122, 135]. В отличие от шарикового клапана с коническим седлом, клапан фирмы DENSO имеет плоскую пластинчатую конструкцию. Быстродействие клапана основано на гидравлическом управлении запорной пластиной. Расход на управление у ЭГФ DENSO в несколько раз ниже, чем у ЭГФ с шариковым клапаном, за счёт перекрытия подвода топлива из аккумулятора, при впрыскивании.

Недостатком аккумуляторной ТПС является высокая циркуляция топлива, для обеспечения функционирования ЭГФ и ТНВД. Это отражается на более высокой мощности ТНВД, по сравнению с насосами распределительного типа [33]. Со сказанным связаны и особенности возникновения неис-

правностей АТПС [35, 36]. Существуют способы снижения потерь указанной мощности, путём регулирования расхода топлива, при всасывании в ТНВД и подкачивающий насос, в зависимости от режима работы двигателя.

Несмотря на перечисленные недостатки, система Common Rail является наиболее перспективной ТПС и обладает достаточными резервами для её дальнейшего совершенствования. Ею оснащены большинство автомобилей, удовлетворяющих нормам Евро-5 и Евро-6, [133, 142].

В свете растущих экологических требований, разработка более совершенных дизельных ТПС продолжается [42]. Для дальнейшего улучшения показателей дизельного двигателя необходимо изменять не только моменты начала и окончания впрыскиваний, но придавать форму интегральной характеристике расхода основного впрыска, относительно времени, делая её, например, треугольной или прямоугольной.

Данная задача решена разработкой и производством фирмами Delphi [130, 140, 143] и Continental [143] ЭГФ, с непосредственным управлением иглой распылителя пьезоприводом, а также ЭГФ со встроенным гидравлическим мультипликатором давления, предназначенным для увеличения хода иглы.

ЭГФ с непосредственным приводом иглы распылителя могут производить ступенчатое впрыскивание [143]. Форсунки Amplified-Pressure Common Rail System (APCRS) имеют встроенный мультипликатор давления [131, 134]. Они представляют собой конструкцию из мультипликатора давления и ЭГФ с электромагнитным клапаном. В системах с подобной конструкцией имеется два канала: один – для управления запорной иглой, другой – для управления давлением впрыска. Форсунка системы APCRS позволяет сделать впрыскивание ещё более гибким и реализовать интегральные формы расхода через отверстия распылителя: ступенчатую, треугольную и прямоугольную [131]. Однако, для идеальных параметров впрыскивания, возможностей форсунки APCRS, всё же, ещё недостаточно.

Новые, перспективные дизельные ТПС сложны и наукоёмки. Сложный

механизм ЭГФ, при безусловном наличии многих преимуществ, в условиях эксплуатации, как правило, зачастую проигрывает в надёжности более простым форсункам. Чем сложнее точнее функциональный процесс ЭГФ, тем значительнее его результат подвержен влиянию неблагоприятных внешних факторов, к коим, прежде всего, относится некачественное топливо. Основная же масса уже эксплуатируемых АТС оснащена традиционными АТПС. Данные системы достойно зарекомендовали себя оптимальным соотношением надёжности и эксплуатационных качеств.

Успешная эксплуатация автомобилей, оснащённых рассмотренными новейшими системами топливоподачи, требует разработки эффективных методов контроля технического состояния этих систем [78, 79, 80, 88, 89].

## **1.2. Обзор математических моделей и программного обеспечения для моделирования гидродинамических процессов и аккумуляторных топливоподающих систем**

Электрогидравлические форсунки (ЭГФ) являются исполнительными элементами аккумуляторных систем, представляющими финальное звено в формировании топливоподачи. Работоспособность аккумуляторной системы топливоподачи в значительной степени определяется характеристиками электронно-управляемой ЭГФ и типом управляющего клапана. В связи с этим, разработке математических моделей инжекторов уделялось достаточно большое влияние, как у нас в стране, так и за рубежом.

Вопросы проектирования, расчета и методы исследования процессов топливоподачи современных аккумуляторных систем рассматривались в трудах МГТУ им. Баумана, МАДИ, МАМИ, БашГАУ, Южно-Уральского ГУ, Владимирского ГУ, ХНАДУ, концернами ЯЗДА, АЗПИ, Bosch, Denso, Delphi, Siemens, Caterpillar и многих других. Это нашло отражение в работах ученых: Р.М. Баширова, А.Н. Врублевского, И.И. Габитова, Л.В. Грехова, Л.Н. Голубкова, П.В. Душкина, М.В. Мазинга, А.В. Неговора, Ф.И. Пинско-

го, Ю.Д. Погуляева, Г.Г. Тер-Мкртчяна, А.А. Прохоренко, П.В. Курманова, N. Cavina, P. Beirer, L. Guzzella, F. Payri, J. Wang, A. Takamura, S. Fukushima, Yong-Kwam Kim, Y. Hayakawa и многих других.

В большинстве работ отмечается, что расчет топливоподачи сопряжен с необходимостью решения краевой задачи, ядром которой является задача о течении в трубопроводе [94]. При этом предпочтение отдано численным методам решения уравнений, как реализующим более полные исходные уравнения и связанные с меньшим числом допущений.

Методы гидродинамического расчета топливоподающих систем дизелей основаны на дифференциальных уравнениях нестационарного одномерного движения топлива Навье-Стокса и уравнении неразрывности, пренебрегая кориолисовыми и гравитационными силами [33, 87]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\rho f U] + \frac{\partial}{\partial x} [\rho f U^2] + f \frac{\partial p}{\partial x} &= -KU \\ \frac{\partial}{\partial t} [\rho f] + \frac{\partial}{\partial x} [\rho f U] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где:  $t$  – время;

$x$  – длина (продольная координата);

$f$  – площадь поперечного сечения;

$U$  – скорость топлива;

$P$  – давление;

$\rho$  – плотность топлива;

$K$  – диссипативный множитель.

Наиболее популярно решение уравнений Навье-Стокса, методом Д’Аламбера с приведением его к виду телеграфного уравнения. Для этого учитывают, что скорость звука в бесконечной среде определяется как [86]:

$$\alpha_{\infty} = \sqrt{\frac{1}{\beta \rho}} \quad (1.2)$$

Для того чтобы система была замкнутой, дифференцируют первое уравнение по времени, второе по координате [87]. При вычитании друг из друга получается известное телеграфное уравнение следующего вида [33,87]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \alpha^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + K \frac{\partial U}{\partial t} = 0 \quad (1.3)$$

Если начальные условия принимаются для  $x$ :

$$t = 0; p(t, x) = 0; U(t, x) = U_0 \quad (1.4)$$

то решение имеет вид [31, 41]:

$$\left. \begin{aligned} p_x &= p_0 + F_x - W_x \\ U_x &= U_0 + [F_x + W_x] \frac{1}{\alpha \rho} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Для учета гидравлического сопротивления Т.Ф. Кузнецовым были предложены искусственные поправки, учитывающие затухание амплитуды колебаний [33].

Таким образом, многими исследователями принято, что решение по Д'Аламберу является классическим и пригодным для использования и наиболее удобным [5, 23, 31, 33, 139]. В случае, когда необходимо дополнительно учитывать многие факторы наиболее адекватным является линеаризованная методика Распада-Разрыва. В работе Л.В. Грехова указывается также, что коэффициент сжимаемости топлива не является постоянной величиной и значительным образом изменяется при давлениях выше 100 МПа.

В свою очередь, плотность топлива в функции от давления и температуры может быть описана выражением:

$$\rho(p, t) = \rho_{0t} \left( \frac{B+p}{B} \right)^{1/n} \quad (1.6)$$

где:  $B$  - эмпирическая функция;

$p$  - давление топлива, Па;

$t$  - температура топлива, °С;

$\rho_{0t}$  - плотность топлива при атмосферном давлении и температуре;

$n$  – функция, учитывающая изменение температуры.

Функции  $B$  и  $n$ , входящие в выражение (1.6) находятся как:

$$B = [222.3 - 1.2575(t - 20) + 0.615(\rho_{20} - 825)] \quad (1.7)$$

$$n = 7.49 + 0.0086(t - 20) \quad (1.8)$$

где:  $\rho_{20}$  - плотность топлива при атмосферном давлении и температуре 20 °С.

Обобщенную модель любого элемента топливной аппаратуры дизеля обычно представляют в виде некоторых объёмов (постоянных и переменных), соединенных друг с другом посредством каналов с определенными эффективными проходными сечениями (также переменными). При этом изменение давления в каком-либо объеме определяется из условия неразрывности потока по формуле [33, 56]:

$$\alpha \cdot \beta \cdot \frac{dp}{dt} = \sum Q_i + \frac{dV}{dt}, \quad (1.9)$$

где:  $\alpha$  - коэффициент сжимаемости жидкости;

$V$  - объем, м<sup>3</sup>;

$p$  - давление, МПа;

$Q_i$  - расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;

$i$  - число каналов, соединяющих рассматриваемый объем с другими элементами системы топливоподачи.

Объемная скорость истечения топлива из одной полости в другую (1-2) вычисляется согласно уравнению Бернулли [94]:

$$Q_{1-2} = \text{sign}(p_1 - p_2) \cdot \mu_{1-2} \cdot A_{1-2} \sqrt{\frac{2|p_1 - p_2|}{\rho}} \quad (1.10)$$

где:  $\text{sign}$  – управляющая ступенчатая функция:

если  $p_1 = p_2$ , то  $\text{sign} = 0$ , т.е. расход топлива отсутствует.

если  $p_1 \neq p_2$ , то  $\text{sign} = 1$

$\mu$  - коэффициент эффективности проходного сечения;

$A_{1-2}$  - площадь сечения канала соединяющего полости 1-2, м<sup>2</sup>;

$p_1$  - давление в полости до сечения, МПа;

$p_2$  - давление в полости после сечения, МПа;

$\rho$  - плотность дизельного топлива, кг/см<sup>3</sup>.

На основании проведенных исследований коллективом ученых МГТУ им. Баумана создан отечественный программный продукт «Впрыск». Он базируется на теоретических положениях, разработанных Л.В. Греховым. Благодаря универсальности и доступности, данное программное обеспечение было использовано в целом ряде работ [6, 20, 31, 51, 87]. Для интеграции с рабочим процессом целесообразно использование программы Diesel2/4т.

В диссертации Емельянова Л.А [41] подведен итог работ коллектива МАДИ, под руководством проф. Л.Н. Голубкова, в виде обобщенного комплекса моделей, затрагивающих не только процесс функционирования ЭГФ, но и всей топливоподающей аппаратуры в целом.

А.Ю. Коньков в работе [56] применил программное обеспечение COSMOSFloworks. В этом программном продукте применяется метод конечных объемов, где для дискретизации по пространству, вся расчетная область покрывается расчетной сеткой, грани которой параллельны координатным плоскостям используемой в расчете декартовой системы координат.

Р.М. Байтимеров [8], при аналитическом исследовании ЭГФ с управляемой формой характеристики впрыскивания, использовал программный продукт ANSYS CFX. Данное программное обеспечение также является популярным для решения многих исследовательских и инженерных задач.

С.Н. Кривцов в работе [72] для аналитических исследований закономерностей изменения технического состояния АТПС на выходные параметры автомобиля использовал другой известный программный продукт GT-Suite фирмы Gamma-Technologies [138]. В данном программном обеспечении, аналогично с ANSYS CFX, моделирование движения и теплообмена жидкости реализовано уравнениями Навье – Стокса, описывающими законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды, в нестационарном виде. Кроме

того, GT-Suite в значительной степени интегрирована с пакетом MS Office а также MatLab от MathWorks. Важным преимуществом данного программного обеспечения является наличие широкого спектра специализированных библиотек по большинству узлов и элементов автомобиля, включая электронное регулирование, что значительным образом упрощает процесс работы со вводом и изменением данных.

А.А. Прохоренко разработал модель ЭГФ [100] в программном комплексе MatLab Simulink, являющимся универсальным средством для аналитических исследований и одним из самых распространенных и удобных программных продуктов.

Перечень программных продуктов для моделирования гидродинамических процессов и аккумуляторных топливоподающих систем, конечно, далеко не полный.

Подавляющее большинство рассматриваемых моделей и программных продуктов преследовало цель оптимизацию конструктивных параметров форсунок CR, влияние их на быстродействие и параметры впрыска. Это позволило создать оригинальные модели инжекторов, например, в БашГАУ [20, 21, 87], МГТУ им. Баумана [32, 33], Южно-Уральском ГУ [98, 99], МАДИ [23, 41], ХНАДУ [16, 17, 18, 19] и др.

В связи со стремлением снизить количество парниковых газов, появилось большое количество работ, посвященных применению альтернативных топлив растительного происхождения, в том числе смесевых [82, 83, 140].

### **1.3. Анализ работ, посвященных эксплуатации автомобилей с аккумуляторными топливоподающими системами**

Как отмечалось ранее, большинство работ, посвященных аккумуляторным топливоподающим системам, посвящено вопросам оптимизации и конструирования. В то же время, не менее важной составляющей является эксплуатация этих систем. Вопросы обслуживания, диагностики и ремонта

АТПС нашли отражение в работах исследователей: А.Н. Врублевского, А.Г. Габбасова, И.И. Габитова, Л.В. Грехова, И.К. Данилова, А.С. Денисова, Е.Ю. Зенкина, В.А. Ильина, В.Н. Катаргина, А.А. Козеева, А.Ю. Конькова, В.В. Лянденбургского, В.А. Маркова, Ю.А. Пойда, С.Н. Кривцова, А.В. Неговора, Ш.Ф. Нигматуллина и других.

Работы С.Н. Кривцова охватывают широкий круг вопросов, связанных с эксплуатацией автомобилей, оснащённых аккумуляторными топливоподающими системами [66, 67, 68, 70].

Отмечается, что наибольшую частоту отказов по АТПС имеют ЭГФ (свыше 60% по отдельности и более 80% в сочетании с другими). Указанное обстоятельство объясняется неблагоприятными условиями работы и вероятностью попадания некачественного топлива, механических загрязнений или воды. Качественная картина проявления неисправностей АТПС выглядит следующим образом (рис. 1.5).

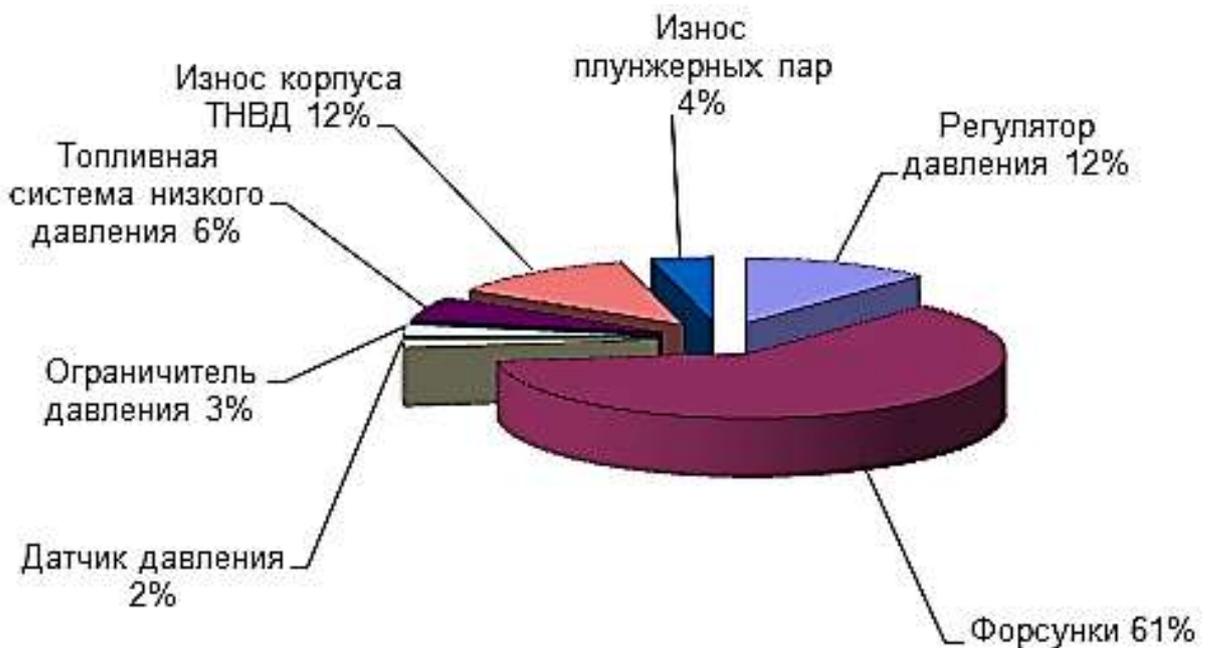


Рис. 1.5. Статистическое распределение отказов по топливоподающей системе аккумуляторного типа дизелей 4 ISBe и 6 ISBe [72].

Отмечено также, что фактический ресурс прецизионных элементов электрогидравлических форсунок даже для одной и той же марки в пределах одного предприятия может варьироваться в очень широких пределах [71].

Отсутствие систематического периодического контроля технического состояния ЭГФ приводит к тому, что в среднем только свыше 60% выбракованных форсунок нуждаются в полном ремонте и выходят за допусковые отклонения, свыше 10% годны к дальнейшей эксплуатации, а 24% - годны, при условии замены распылителя с последующей регулировкой [71] (рис. 1.6).

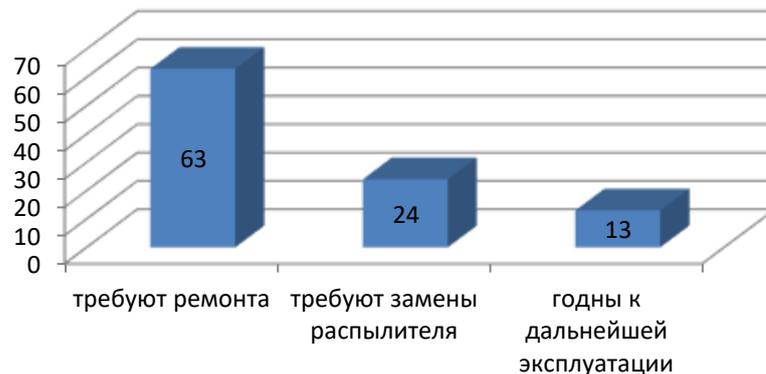


Рис. 1.6. Статистическое распределение отказов по электрогидравлическим форсункам 0445120123 дизелей 4 ISBe и 6ISBe [72].

При увеличении пробега автомобиля, у ЭГФ наиболее часто наблюдается увеличение цикловых подач по сравнению с номинальными значениями, из-за абразивного износа распыливающих отверстий, нарушения герметичности управляющего клапана, нарушения теплового режима распылителя [71]. Последнее обстоятельство приводит к его перегреву, заклиниванию распылителя, вздутию и даже обрыву его носика (рис. 1.7).

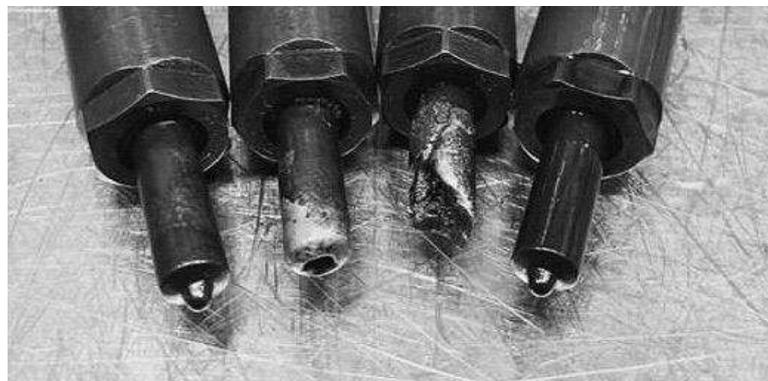


Рис. 1.7. Поврежденные температурным воздействием распылители электрогидравлических форсунок [71].

В работе [71] приведен результат исследования надежности ЭГФ с пьезоприводом. При этом из 500 инжекторов, поступивших в ремонт, до 30% оказались годными к дальнейшей эксплуатации. Отмечено, что износ управляющего клапана составил - 38%, распылителя - 23% и пьезоэлемента - 10%. (рис. 1.8), причем неисправность форсунки могла фиксироваться не только по износу одного из элементов, но и нескольким сразу.



Рис. 1.8. Диаграмма отношения неисправных элементов ЭГФ с пьезоприводом [71].

Установлено также [15], что средний ресурс ЭГФ с пьезоприводом составляет 166 тыс. км пробега, коэффициент вариации 0,32-0,34, среднеквадратическое отклонение 55,3 тыс. км пробега [71] (рис. 1.9). Коэффициент вариации ресурса достаточно велик (0,33-0,34), как следствие стечения множества факторов эксплуатации. При этом прогнозировать ресурс форсунок крайне затруднительно, эксплуатация транспортных средств ведётся по фактическому состоянию. Информативная и малотрудоёмкая диагностика элект-

трогидравлических форсунок может стать залогом успешной эксплуатации АТС.

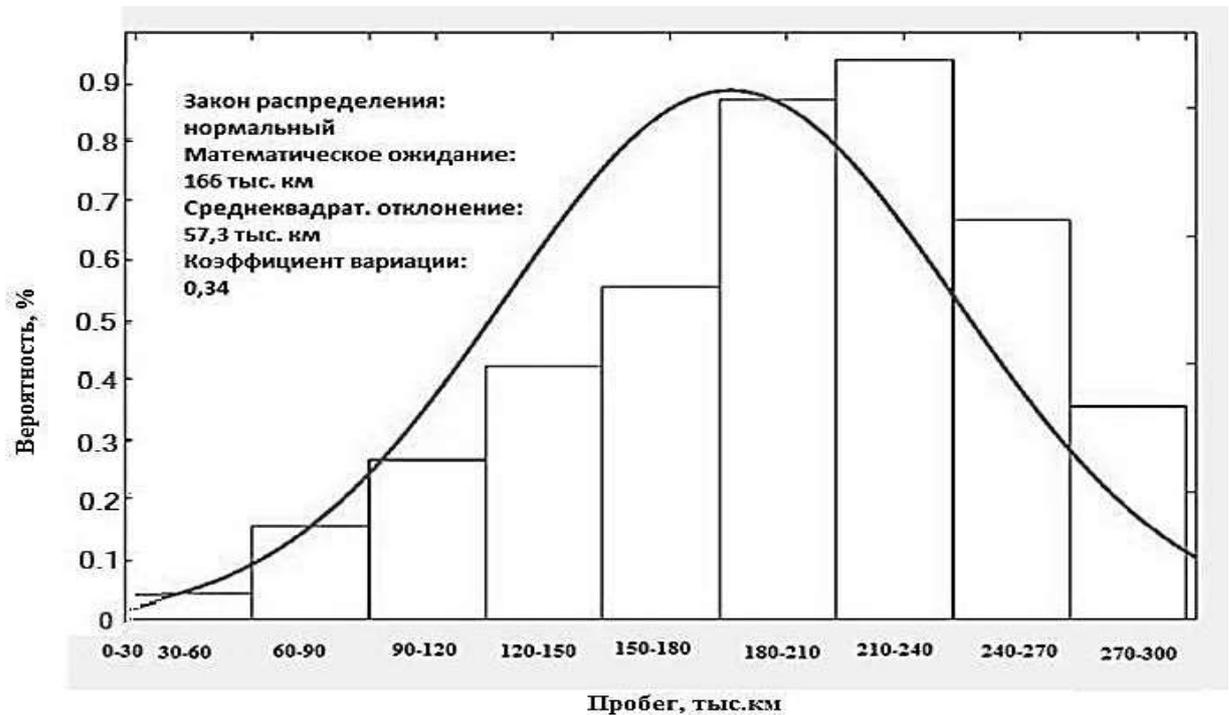


Рис. 1.9. Диаграмма плотности распределения вероятности отказа ЭГФ с пьезоприводом [71].

Валиев А.Р. [11] приводит сравнение статистических данных по отказам легковых ЭГФ системы Common Rail фирмы R.Bosch (табл. 1.1). Автор приходит к выводу, что ремонт ЭГФ не только возможен, но и экономически выгоден. Причем в большинстве случаев достаточно восстановления конусной посадочной поверхности управляющего клапана. Здесь же впервые сделана попытка моделирования износа поверхности клапана и доказано, что преобладающей неисправностью является гидроабразивный износ.

В работах [11, 12, 13] авторы отмечают, что для поддержания работоспособности топливной системы Common Rail следовало бы провести дополнительные контрольные и профилактические работы по предотвращению или устранению повреждений рабочей поверхности клапана на начальных этапах неисправностей.

Таблица 1.1. Статистические данные по отказам электрогидравлических форсунок Bosch в России и странах Евросоюза [11].

| № | Основные неисправности                                     | ООО «Башдизель»<br>г. Уфа,<br>Россия |                | «Carwood motors units limited»<br>г.Бирмингем,<br>Великобритания |                | Отдел качества, Бош Дизель Центр,<br>г.Хомбург<br>Германия |
|---|--|--------------------------------------|----------------|--|----------------|--|
|   |  | Превышение допусков по нормативам    | Причина отказа | Превышение допусков по нормативам                                | Причина отказа | Причина отказа   |
| 1 | 2  | 3                                    |                | 4  |                | 5  |
| 1 | Нарушение гидроплотности запорного клапана                 | 90-95%                               | 80%            | 10%  | 10%            | 35%  |
| 2 | Прорыв уплотнения фторопластовой шайбы                     | 10%                                  | 1%             | 40%  | 40%            | 25%  |
| 3 | Нарушение гидроплотности распылителя или заклинивание иглы | 40%                                  | 10%            | 80%  | 40%            | 30%  |
| 4 | Износ штока  | 15%                                  | 2%             | 1%   | 1%             | Нет данных   |
| 5 | Предельное изменение диаметра жиклера                      | 1%                                   | 1%             | 0%   | 0%             | Нет данных   |
| 6 | Выход из строя электромагнита                              | 3%                                   | 3%             | 1%   | 3%             | 5%   |
| 7 | Повреждение корпуса  | 10%                                  | 2%             | 0,5%   | 5%             | 3%   |
| 8 | Прочие   | 1%                                   | 1%             | 2%   | 2%             | 2%   |
| 9 | Итого  | -                                    | 100%           | -  | 100%           | 100%   |

Козеев А.А. [51] провел структурный анализ ЭГФ 0445120141 фирмы R. Bosch для целей диагностирования (рис. 1.10). Структурными, являются параметры, изменяющиеся в ходе эксплуатации, либо корректируемые регулировкой при техническом обслуживании. Например, гидроплотность плунжера (*уменьшается из-за износа*) или ход якоря (*регулируется при помощи*

дистанционных шайб) [51]. К диагностическим параметрам отнесены те из них, которые возможно измерить без разборки инжектора. Например, давление у входного штуцера (измеряется при помощи датчика давления) или цикловая подача (измеряется расходомером стенда).

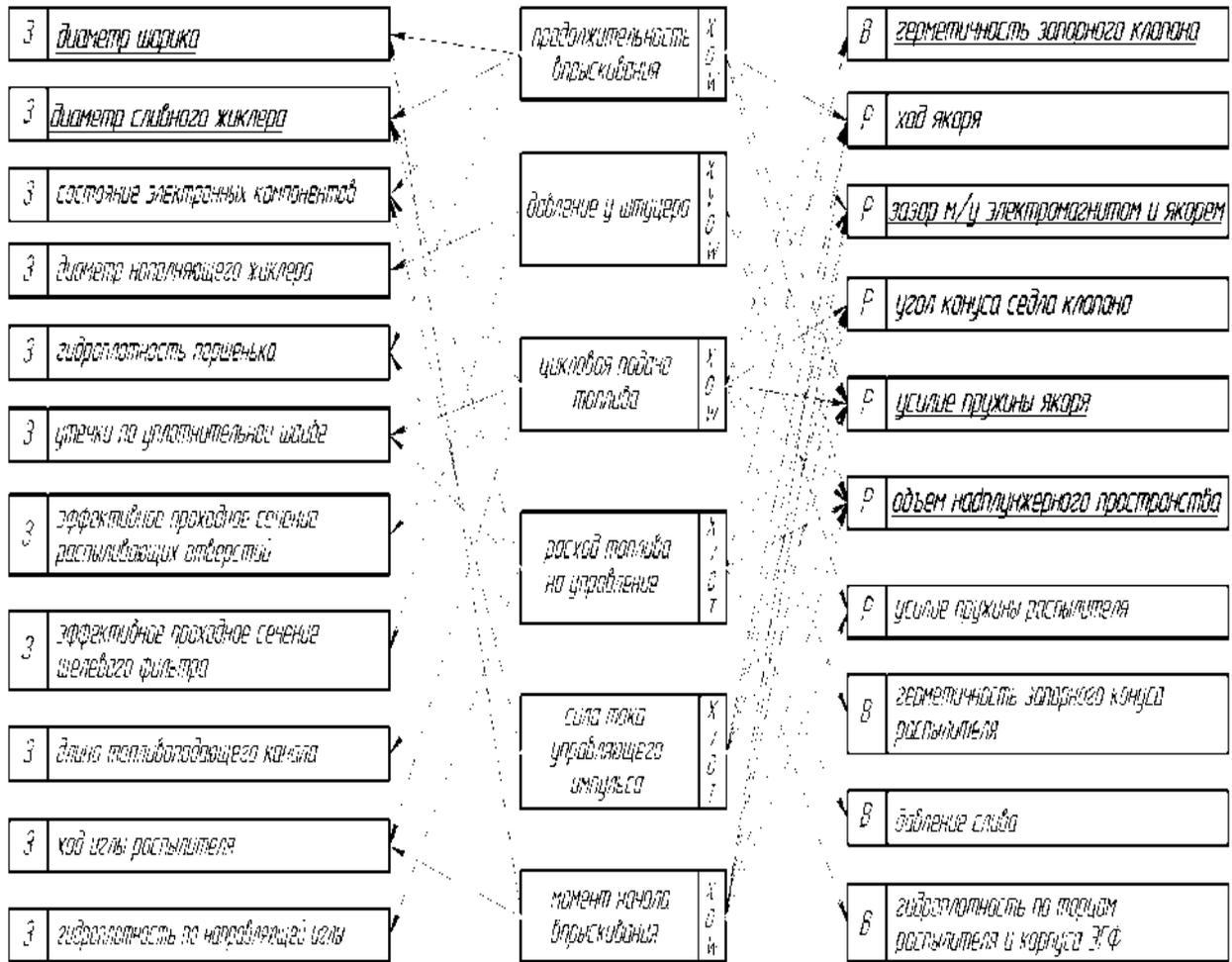


Рис. 1.10. Структурная схема взаимовлияния диагностических и структурных параметров ЭГФ [51].

В работе Вахитова Р.А. [13] исследована технология технического обслуживания и ремонта ЭГФ автотракторных дизельных двигателей. В ней автор предлагает компенсировать возможные отклонения цикловой подачи от эталонной, с помощью присвоения IMA кода на стенде. Это достигается с помощью буквенно-цифровой кодировки, позволяющей ЭБУ корректировать длительность управляющего импульса для обеспечения максимально возможной равномерности порций топлива (рис. 1.11). В отличие от технологии

производителей (Bosch, Denso, Delphi), применяющих данный способ компенсации при ремонте, Вахитов Р.А. предлагает делать это не только после ремонта, но и периодически, по мере увеличения пробега. Такой подход позволяет сократить трудоемкость регулировочных воздействий при обслуживании электрогидравлических форсунок.

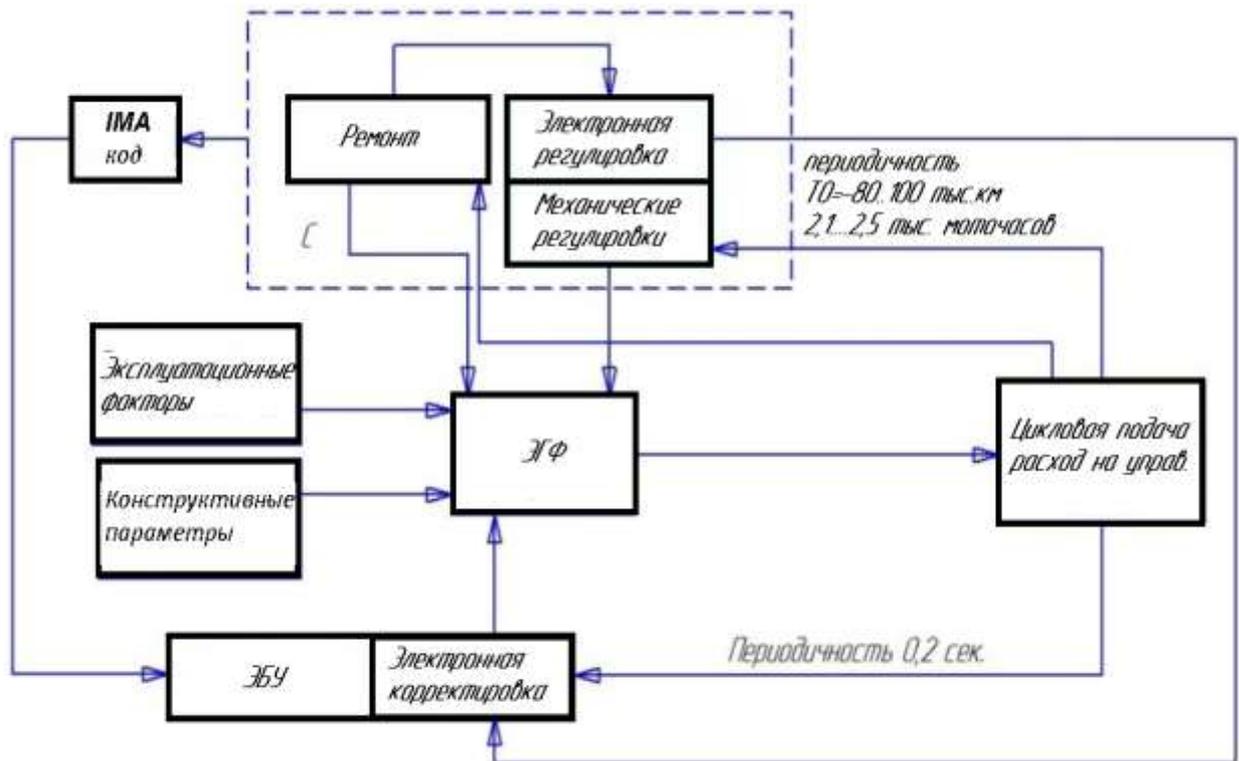


Рис. 1.11. Информационная модель обеспечения работоспособности ЭГФ [13].

Кривцов С.Н. отмечает [72], что такой подход не всегда возможен и имеет ограничения для грузовых автомобилей и топливоподающих систем фирмы Delphi.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод о недостаточности проведенных исследований в области эксплуатации автомобилей с аккумуляторной топливоподающей системой и необходимости периодического контроля технического состояния наиболее уязвимых элементов – электрогидравлических форсунок.

#### **1.4. Анализ методов и средств диагностирования аккумуляторных топливоподающих систем**

Аккумуляторная топливоподающая система дизельного двигателя представляет собой сложную наукоёмкую структуру, как в разработке и производстве, так и в эксплуатации. Вопросы диагностики, технического обслуживания и ремонта современных топливоподающих систем затронуты в трудах БашГАУ, МАДИ, СФУ, ИРНИТУ, ХНАДУ и других. Это нашло отражение в трудах учёных: А.Н. Врублевского, А.Г. Габбасова, И.И. Габитова, Л.В. Грехова, И.К. Данилова, Е.Ю. Зенкина, В.А. Ильина, В.Н. Катаргина, А.А. Козеева, А.Ю. Конькова, В.В. Лянденбургского, В.А. Маркова, Ю.А. Пойда, С.Н. Кривцова, А.В. Неговора, Ш.Ф. Нигматуллина и других.

Эффективность эксплуатации автомобиля напрямую зависит от способов и методов технических воздействий, направленных на поддержание и восстановление его технического состояния, что определяет время диагностики и ремонта, а, соответственно, материальные расходы и издержки. В данном смысле алгоритмы, рекомендованные производителем, не всегда эффективны [101]. Поэтому поиск новых, более оптимальных научных и технических решений в данной области остается актуальным.

Методы и средства для диагностики топливоподающих систем представлены в виде блок-схемы (рис. 1.12). Стендовая диагностика (со снятием аппаратуры) подразумевает безмоторную проверку топливной аппаратуры Common Rail по определенным тест-планам, отражающим характерные режимы работы. Для проведения такой проверки необходим демонтаж компонентов топливной аппаратуры с автомобиля, что не всегда оправдано и влечёт более высокую себестоимость работ и затраты времени, в отличие от диагностики без вмешательства в конструкцию системы. На практике, как правило, целесообразно проводить первичную диагностику на автомобиле и по её результатам предпринимать дальнейшие действия.



Рис. 1.12. Методы и средства для диагностики топливоподающих систем

Диагностирование, проводимое на автомобиле, начинается с анализа данных, полученных с помощью автомобильного сканера. Основными информативными параметрами, при этом являются фактическое и задаваемое давление, зависимость между которыми выражает средний ток управления клапана, регулирующего давление в ТАВД. Данный случай рассмотрим на примере: (табл. 1.2, 1.3).

Таблица 1.2. Давление в ТАВД и управляющие параметры регулятора высокого давления, при отсутствии утечек (двигатель 4НК1 автомобиля Исузу NQR, холостой ход).

| Параметр                                    | Значение   |
|---|------------|
| Заданное давление топлива в магистрали, МПа | 35         |
| Текущее давление топлива в магистрали, МПа  | 35         |
| Средний ток управления клапаном, мА         | <b>998</b> |
| Скважность управляющего импульса, %         | 48         |

Данная проверка осуществляется как в функциональном режиме на холостом ходу, так и тестовом, когда ЭБУ увеличивает давление до определенного значения (вплоть до максимально возможного). Если в ТАВД присутствует утечка, ток в цепи регулятора давления изменяется, таким способом система пытается привести давление в аккумуляторе к заданному, реализуя

обратную связь. В цепи нормально-открытого регулятора давления ток, в случае утечки из аккумулятора давления уменьшается, а для нормально-закрытого – увеличивается.

Таблица 1.3. Давление в ТАВД и управляющие параметры регулятора высокого давления, при утечке (двигатель 4НК1 автомобиля Исузу NQR, холостой ход).

| Параметр                                    | Значение   |
|---|------------|
| Заданное давление топлива в магистрали, МПа | 35         |
| Текущее давление топлива в магистрали, МПа  | 35         |
| Средний ток управления клапаном, мА         | <b>825</b> |
| Скважность управляющего импульса, %         | 44         |

Режим холостого хода не является единственно возможным. Предлагается также [62, 72] использовать режимы разгона выбега двигателя с параллельным анализом процессов. Например, повышенные утечки приводят к отклонениям фактического давления относительно заданного (рис. 1.13).

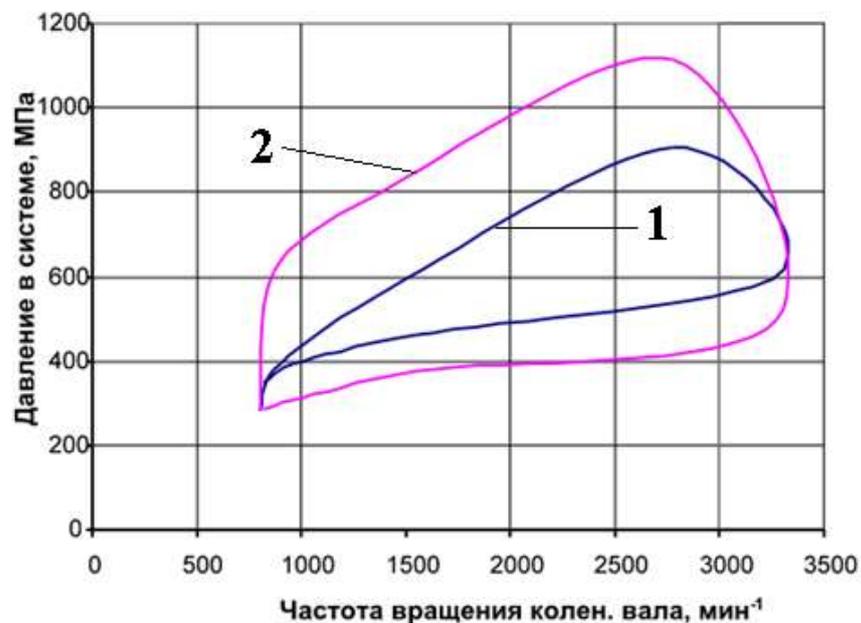


Рис. 1.13. Динамическая характеристика давления топлива (в ТАВД) в системе «Common Rail», в режиме «разгон – выбег: 1 – фактическое давление; 2 - заданное.

Известен также способ (US 7317983) [147], при котором в качестве диагностического параметра выступает величина индивидуальной коррекции топливоподачи при работе двигателя на холостом ходу.

Для примера, в шестицилиндровом двигателе каждый цилиндр в своем рабочем цикле ускоряет двигатель в течение  $120^\circ$ . Электронный блок производит оценку хода двигателя, соответственно, в течение  $120^\circ$  и корректирует длительность впрыска инжекторов цилиндров с меньшей мощностью на более длительное время, а более мощных цилиндров – на более короткое время.

Поправочное количество топлива представляет собой отклонение от заданного значения. Данные отклонения также могут использоваться для поиска неполадок. При оценке необходимо учитывать порядок работы (чередование тактов), например:  $1 \Rightarrow 5 \Rightarrow 3 \Rightarrow 6 \Rightarrow 2 \Rightarrow 4$ . Количество впрыскиваемого топлива рассчитывается из продолжительности впрыскивания и давления в общей магистрали. Если инжектор не открывается, то расчетное количество больше, чем действительное.

Пример анализа:

Если мощность цилиндра 2 низкая, то поправочное количество топлива на инжекторе 2 увеличивается;

если после этого двигатель все еще работает не ровно, то увеличивается и количество топлива для инжектора 4.

В любом случае, после это уменьшается количество топлива для цилиндров 1 и 5 для того, чтобы двигатель не вращался слишком быстро. Таким образом, можно распознать группу, в которой два инжектора имеют превышение количества топлива (+) и один инжектор, иногда два, который имеет недостаточное количество топлива (-). В этой группе + + - - первый цилиндр является тем, который обладает плохой отдачей мощности.

Чувствительность данного способа не всегда достаточна, в случае большой утечки в ЭГФ, величина поправки может быть несущественной, что ощутимее проявляется с ростом количества цилиндров двигателя. Кроме то-

го, при равномерном износе отклонения в топливных коррекциях будут мало различимы.

Известен также способ диагностики (US 6546912) [145], при котором о работе форсунок судят по частоте вращения коленчатого вала при определенных угловых положениях, соответствующих, например, промежутку такта рабочего хода, когда происходит процесс расширения каждого из цилиндров без компенсации угловой подачи (рис. 1.14).

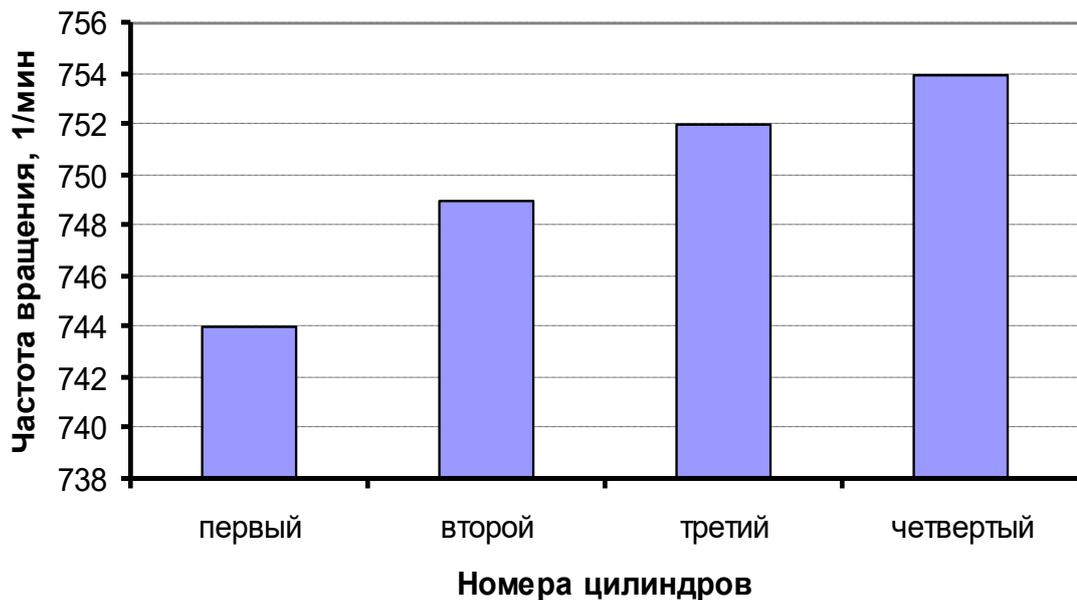


Рис. 1.14. Неравномерность вращения коленчатого вала при отключенной балансировке цилиндров с неисправной форсункой первого цилиндра.

Рассмотренный способ имеет недостатки, аналогичные предыдущему, так как не позволяет однозначно выявить утечку, он позволяет лишь судить о равномерности цикловых подач.

В способе (US 7937988) [149], для локализации индивидуальных утечек предложено использовать изменение нагрева корпуса форсунки, и, как следствие, электрических характеристик, однако если ЭГФ находятся под клапанной крышкой, на точность будут влиять и температурные факторы ДВС.

Описанные выше методы диагностики имеют ряд недостатков, не позволяющих определять индивидуальное техническое состояние ЭГФ. При этом зачастую определяется только общее техническое состояние ЭГФ.

Известным и информативным способом поэлементного диагностирования электрогидравлических форсунок является способ, при котором за определенное время измеряется величина расхода топлива на управление от каждой форсунки при работе двигателя, например, на холостом ходу (рис. 1.15). Такой метод достаточно точен, но практически не применим, в случае расположения ЭГФ под клапанной крышкой по причине высокой трудоемкости.

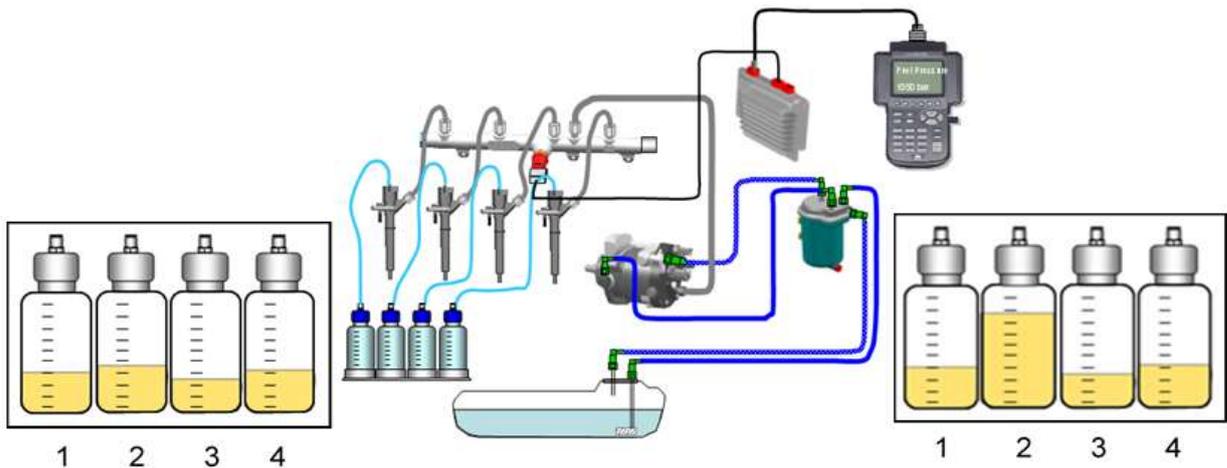


Рис. 1.15. Пример измерения величины обратного слива с форсунок. Слева – утечки в допустимом пределе; справа – во втором цилиндре повышенная утечка.

Известен способ (US 8459234) [154] диагностики неисправностей инжекторов, в том числе по индивидуальным утечкам, при котором анализируется изменение давления в подающей полости форсунки путем установки внутрь каждой датчика, причем для каждой ЭГФ определена индивидуальная зависимость изменения давления для разных характерных режимов, отклонение, от которой позволяют фиксировать практически любую неисправность. Указанный способ перспективен, однако достаточно высокотехнологичен и сложен, его невозможно использовать на существующих АТПС.

Способы диагностирования АТПС не ограничиваются перечисленными, в этом направлении имеется значительный ряд работ: [45, 57, 58, 90, 93, 126, 128, 146, 148, 150, 151, 152, 153, 155, 156, 157, 158, 159].

## 1.5. Выводы и задачи исследования

Анализ публикаций и всестороннее рассмотрение темы исследования позволил заключить следующее:

1. Топливоподающая система Common Rail – современная, перспективная система питания дизельных двигателей, отвечающая новейшим экологическим и эксплуатационным требованиям.
2. Выявлено, что самым уязвимым звеном АТПС является электрогидравлическая форсунка.
3. Несмотря на значительно возросшие возможности бортовой электроники и ЭСУД, существует нехватка знаний в вопросах функционирования аккумуляторных топливоподающих систем их диагностики в процессе эксплуатации.
4. Существующие методы диагностики ЭГФ либо мало информативны, либо трудоемки и недостаточно применимы в условиях эксплуатации.

В связи с этим, выполнение научного исследования, направленного на уменьшение трудоемкости и повышение эффективности диагностики электрогидравлических форсунок системы Common Rail, является актуальным.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи исследования:**

1. Разработать математическую модель процесса функционирования автомобильной электрогидравлической форсунки дизельного двигателя при износе управляющего клапана, позволяющую использовать давление и расход в обратной магистрали в качестве диагностических параметров.
2. Выполнить исследование процесса функционирования электрогидравлических форсунок при изменении их технического состояния и выявить диагностические параметры, характеризующие износ управляющего клапана.
3. Научно обосновать и разработать метод диагностики электрогидравлических форсунок дизельного двигателя по параметрам расхода топлива и давления в общей обратной магистрали.
4. Выполнить производственную проверку результатов исследований и дать им технико-экономическую оценку.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ФОРСУНОК АВТОМОБИЛЯ С ДИЗЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА ТОПЛИВА В ОБЩЕЙ ОБРАТНОЙ МАГИСТРАЛИ**

Научное исследование представляет собой сложный поисковый процесс, осуществление которого требует наличия теоретических предпосылок, как основного средства аналитической работы, основанных на научной базе соответствующей области знаний и новых знаниях, приобретённых в ходе исследования.

Анализ, описание и математическое моделирование процессов, происходящих в электрогидравлической форсунке, необходимо выполнять на основе процесса функционирования ЭГФ в стендовых условиях. В дальнейшем данный подход позволит выполнять экспериментальную проверку, с помощью метрологически-поверенного стендового оборудования.

В процессе эксплуатации функциональные параметры ЭГФ изменяются, как следствие изменения структурных параметров. Разработанная математическая модель должна описывать процесс функционирования электрогидравлической форсунки, с учётом происходящих в ней изменений, включая особенности износа клапана камеры управления.

### **2.1. Анализ процесса функционирования электрогидравлической форсунки**

На первом этапе разработки математической модели рассмотрим процесс функционирования АТПС в виде структурной схемы (рис. 2.1). Данная схема представляет информацию об устройстве АТПС и циркуляции топлива через её компоненты.

Гидравлический контур низкого давления содержит топливный бак, фильтр грубой очистки (при его наличии), топливоподкачивающий насос,

фильтр тонкой очистки, редукционный клапан, электромагнитное дозирующее устройство (клапан-регулятор потока).

Контур высокого давления АТПС, целью которого является создание и поддержание необходимого давления и требуемого расхода, содержит: топливный насос высокого давления (ТНВД), топливный аккумулятор высокого давления (ТАВД) и электрогидравлические форсунки (ЭГФ), соответственно числу цилиндров дизеля. Название этой топливоподающей системы обусловлено наличием ТАВД (другим общеупотребительным названием является англоязычный термин – Common Rail или общая магистраль).

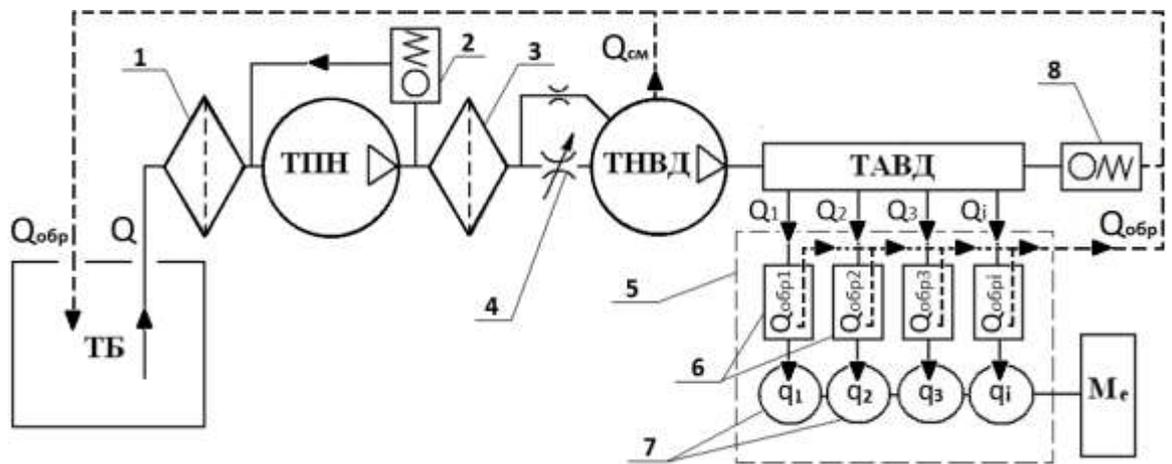


Рис. 2.1. Структурная схема процесса функционирования аккумуляторной топливоподающей системы.

На схеме указаны:

ТБ - топливный бак; ТПН - топливоподкачивающий насос; ТНВД - топливный насос высокого давления; ТАВД - топливный аккумулятор высокого давления; 1 - фильтр грубой очистки топлива; 2 - редукционный клапан; 3 - фильтр тонкой очистки топлива; 4 - управляемый дроссель дозирующего устройства; 5 - корпус двигателя; 6 - электрогидравлические форсунки; 7 - цилиндры двигателя; 8 - предохранительный клапан.

Следующим шагом выделим область АТПС, связанную с объектом исследования и представим её структурную схему более детально (рис. 2.2).

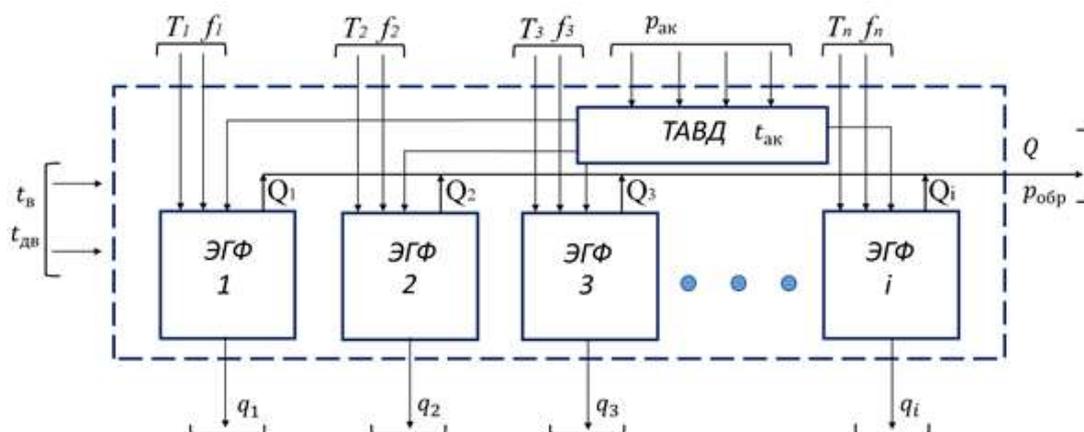


Рис. 2.2. Структурная схема процесса функционирования ЭГФ, в составе АТЭС, с учетом взаимного расположения и формирования давления и расхода топлива в общей обратной магистрали.

На схеме указаны:

- параметры внешних воздействий: температура воздуха  $t_{в}$ , температура двигателя  $t_{дв}$ , плотность топлива  $\rho_{т}$ , вязкость топлива  $\nu_{т}$ ;
- управляющие параметры: давление топлива  $p_{ак}$ , продолжительность сигнала управления  $T$ , частота следования импульсов  $f_{имп}$ ;
- внутренние параметры: температура топлива в аккумуляторе  $t_{ак}$ ,  $Q_i$ ;
- выходные параметры: расход на управление  $Q$ , давление в обратной магистрали  $p_{обр}$ , цикловая подача  $q_i$ .

Управляющие параметры:  $p_{ак}$ ,  $T$ ,  $f_{имп}$  и параметры внешних воздействий для ЭГФ:  $t_{ак}$ ,  $t_{в}$ ,  $t_{дв}$ ,  $\rho_{т}$ ,  $\nu_{т}$ , имеют практически несущественные отличия и являются общими для группы ЭГФ в составе АТЭС. Напротив, цикловая подача  $q_i$  и расход топлива на управление цикловой подачей  $Q_i$ , представляют собой индивидуальные выходные параметры, характеризующие функционирующую ЭГФ. В проводимом исследовании, наибольший интерес представляет параметр  $Q_i$ , что следует из первой главы диссертации. Однако, наряду с общим расходом  $Q$ , движение топлива в общей обратной магистрали информативно характеризует давление  $p_{обр}$ . Для выделения  $Q_i$  в общем

расходе на управление цикловой подачей  $Q$ , необходимо установить взаимосвязь между  $Q$  и  $p_{обр}$ .

С этой целью необходимо выделить объект исследования и рассмотреть процесс функционирования ЭГФ (рис. 2.3).

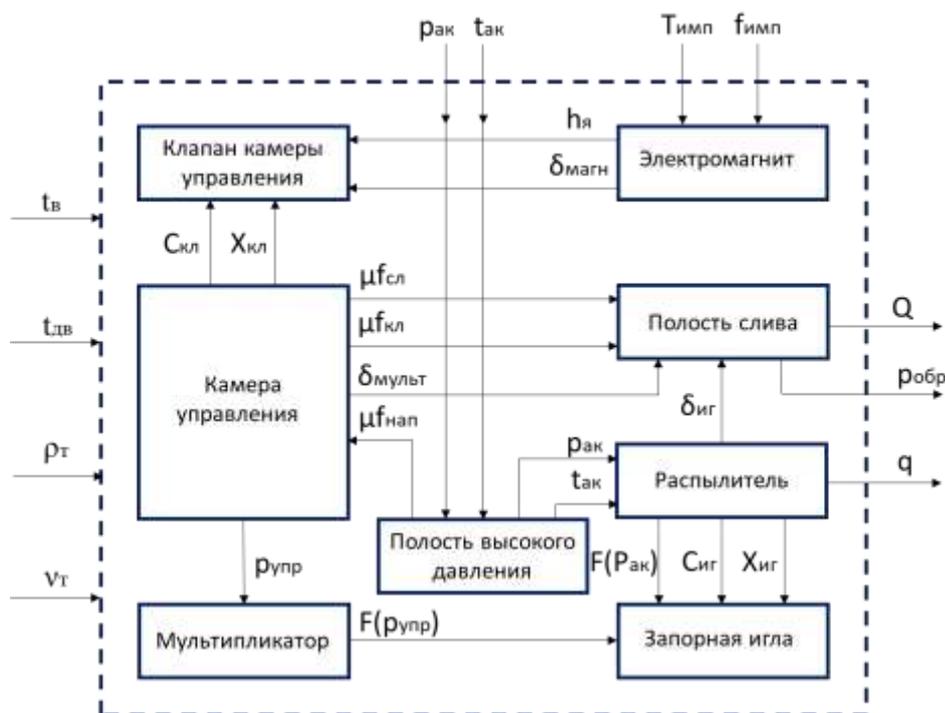


Рис. 2.3. Структурная схема процесса функционирования ЭГФ.

На схеме указаны:

- параметры внешних воздействий: температура воздуха  $t_в$ , температура двигателя  $t_{дв}$ , плотность топлива  $\rho_т$ , вязкость топлива  $\nu_т$ ;
- структурные параметры: пропускное сечение дополнительного жиклера  $\mu_{фнап}$ , пропускное сечение сливного жиклёра  $\mu_{фсл}$ , сечение неплотности управляющего клапана  $\mu_{фкл}$ , зазор корпус-мультипликатор  $\delta_{мульти}$ , зазор корпус-направляющая иглы распылителя  $\delta_{иг}$ ;
- регулировочные параметры: ход якоря  $h_я$ , магнитный зазор  $\delta_{магн}$ , жёсткость пружины клапана  $c_{кл}$ , ход клапана  $x_{кл}$ , жёсткость пружины иглы распылителя  $c_{иг}$ , ход запорной иглы  $x_{иг}$ ;
- выходные (функциональные) параметры: расход на управление  $Q$ , давление в обратной магистрали  $p_{обр}$ , цикловая подача  $q$ ;

- силы, действующие на подвижные элементы: на мультипликатор, со стороны камеры управления  $F(p_{упр})$ , на поршневую часть иглы распылителя, со стороны распылителя  $F(p_{ак})$ .

За качество работы ЭГФ отвечают её структурные и регулировочные параметры, которые изменяются в зависимости от времени работы, качества топлива и условий эксплуатации автомобиля [60]. Для обнаружения отклонения структурных параметров применяются различные диагностические методы, реализуемые как на автомобиле, так и со снятием ЭГФ с двигателя [61, 62, 63, 64, 65]. Обоснование методов диагностики ЭГФ требует аналитического исследования их рабочих процессов. Все параметры и взаимосвязи, выявленные при анализе структурных схем, учтены при разработке математической модели ЭГФ.

## 2.2. Математическое описание гидродинамических процессов

Инжектор автомобильного дизельного двигателя работает в достаточно широком диапазоне изменения подач. В качестве целевой функции исследуемого процесса запишем следующее выражение [32]:

$$\begin{cases} q_i^{min} \leq q_i \leq q_i^{max} \\ Q_i \leq Q_i^{lim} \end{cases}, \quad (2.1)$$

где:  $q_i$  – цикловая подача  $i$ -го режима работы,  $\text{мм}^3$ ;

$q_i^{min}$ ,  $q_i^{max}$  – значения минимально и максимально допустимых цикловых подач  $i$ -го режима работы,  $\text{мм}^3$ ;

$Q_i$  и  $Q_i^{lim}$  – соответственно номинальная и допустимая величина расхода топлива на управление,  $\text{мм}^3/\text{с}$ .

Динамика движения топлива включает решение уравнений Навье – Стокса, основанных на сохранении непрерывности импульса и энергии (кориолисовыми и гравитационными силами пренебрегли) [31, 84, 87]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} &= -\frac{\lambda \rho |u| u}{2D} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где:  $t$  – время,

$x$  – длина (продольная координата);

$u$  – скорость топлива;

$p$  – давление топлива;

$\rho$  – плотность топлива;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения.

Решение уравнений в одном измерении означает, что все величины усредняются по направлению потока.

Неразрывность потока представлена уравнением:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{boundaries} \dot{m} \quad (2.3)$$

Решение для энергии потока с учетом теплообмена (явное) имеет вид:

$$\frac{d(me)}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \sum_{boundaries} (\dot{m} H) - hA_s(T_{fluid} - T_{wall}) \quad (2.4)$$

Решение для энтальпии (неявное) потока:

$$\frac{d(\rho HV)}{dt} = \sum_{boundaries} (\dot{m} H) + V \frac{dp}{dt} - hA_s(T_{fluid} - T_{wall}) \quad (2.5)$$

Динамику процесса движения вязкой сжимаемой жидкости описывает уравнение инерции:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dpA + \sum_{boundaries}(\dot{m}u) - 4C_f \frac{\rho u |u| dx A}{2D} - K_p \left(\frac{1}{2} \rho u |u|\right) A}{dx}, \quad (2.6)$$

где:  $\dot{m}$  - граничный массовый расход (на участке  $dx$ );

$m$  - масса объёма топлива;

$V$  – объём;

$p$  – давление;

$\rho$  – плотность;

$A$  - площадь поперечного сечения потока;

$A_s$  - площадь поверхности теплопередачи;

$e$  - общая удельная внутренняя энергия;

$H$  - общая удельная энтальпия;

$h$  - коэффициент теплопередачи;

$T_{fluid}$  - температура топлива;

$T_{wall}$  - температура стенок;

$u$  - скорость на границе;

$C_f$  – коэффициент гидравлического трения по длине трубопровода;

$K_p$  - коэффициент потерь давления, при изгибе, конусности или ограничении;

$D$  - эквивалентный диаметр;

$dx$  - длина элемента массы в направлении потока (длина дискретизации);

$dp$  - перепад давления на участке  $dx$ .

Общая удельная энтальпия топлива определится с учетом общей удельной внутренней энергии, исходя из известного уравнения:

$$H = e + \frac{p}{\rho} \quad (2.7)$$

В математическом описании приняты следующие допущения:

1. Мгновенные значения скорости неустановившегося течения жидкости определяются по формулам установившегося течения жидкости.

2. Рабочие процессы течения жидкости изотермичны.

3. Якорь клапана в сборе с шариком рассматривается, как одномассовая система.

4. Игла распылителя и шток мультипликатора рассчитывается, как единая масса.

5. Давление в топливном аккумуляторе составляет 400 – 1000 МПа.

Граничные условия представим в общем виде уравнением массового баланса [31]:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{\frac{1}{\rho_i} \sum_{k=1}^K G_{i-k} + \sum_{n=1}^N u_{i-n} A_n + \sum_{j=1}^J \frac{dV_{i-j}}{dt}}{\alpha V_i}, \quad (2.8)$$

где:  $t$  – время;

$p$  – давление топлива;

$\rho$  – плотность топлива;

$G_{i-k}$  – массовый расход топлива между  $i$ -ой и  $i$ -ой полостями;

$U_{i-n}$  – скорость втекания из  $i$ -го топливопровода;

$A_n$  – площадь поперечного сечения  $i$ -го топливопровода;

$p_i$  – текущее давление  $i$ -ой полости;

$V_i$  – текущий объём  $i$ -ой полости;

$\alpha$  – коэффициент сжимаемости топлива.

Коэффициент сжимаемости топлива и скорость звука, напрямую, в решении этих уравнений не используются. Однако, скорость звука и коэффициент сжимаемости могут быть рассчитаны посредством следующих выражений [160]. Скорость звука определяется как:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \Big|_T \right)^{-1}}, \quad (2.9)$$

где:  $\gamma$  – отношение удельных теплоемкостей.

Поскольку плотность является точной функцией давления и температуры, мы можем использовать свойство производных для преобразования  $dp/dT$  в производные плотности по отношению к давлению и температуре. Наконец, мы преобразуем выражение, чтобы получить окончательное выражение для  $\gamma$ :

$$\gamma = \left( 1 - \frac{T(\partial \rho / \partial T)|_p^2}{c_p \rho^2 (\partial \rho / \partial p)|_T} \right)^{-1} \quad (2.10)$$

Адиабатический коэффициент сжимаемости определится как:

$$\alpha_{ad} = \rho\gamma \cdot \left( \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right) \Big|_T \right)^{-1} = \gamma \alpha_{is}, \quad (2.11)$$

где:  $\alpha_{is}$  – изотермический коэффициент сжимаемости.

При моделировании изменения плотности в зависимости от давления и температуры применено приближение первого порядка. Этот подход справедлив, когда коэффициент сжимаемости и теплового расширения известны в одной точке или в нескольких точках [17, 123].

Приведенное выше уравнение можно переставить для решения для коэффициента расхода, на основе заданного экспериментального перепада давления и расхода через клапан:

$$\mu_f = \sqrt{\left( 2\Delta P_{st} \cdot \rho^{-1} \cdot \left( \frac{\pi D^2}{4} \cdot Q^{-1} \right)^2 + (D \cdot D_{up}^{-1})^4 \right)^{-1}}, \quad (2.12)$$

где:  $Q$  – объемный расход топлива;

$D_{up}$  - входной диаметр дросселя или клапана;

$\Delta P_{st}$  - падение статического давления на дросселе или клапане;

$D$  – характерный диаметр дросселя или клапана;

$\rho$  – плотность топлива.

В общем случае массовый расход определится как:

$$\dot{m} = \rho A u, \quad (2.13)$$

где:  $\rho$  – плотность топлива;

$A$  – площадь эффективного проходного сечения;

$u$  - скорость потока.

Массовый расход через граничное сечение определим на основе следующего выражения:

$$\frac{dm_{i-k}}{dt} = G_{i-k} = \rho_k \cdot \text{sign}(p_k - p_i) (\mu f)_{i-k} \sqrt{\frac{2}{\rho_k} |p_k - p_i|}, \quad (2.14)$$

где:  $(\mu f)_{i-k}$  – эффективное проходное сечение между  $i$ -ой и  $i$ -ой полостями.

### 2.3. Математическое описание процесса функционирования электрогидравлической форсунки

С целью описания динамических процессов, рассмотрим расчётную схему ЭГФ (рис. 2.4) [130]. На данной схеме ЭГФ указаны обязательные параметры, учитываемые при описании рабочих процессов.

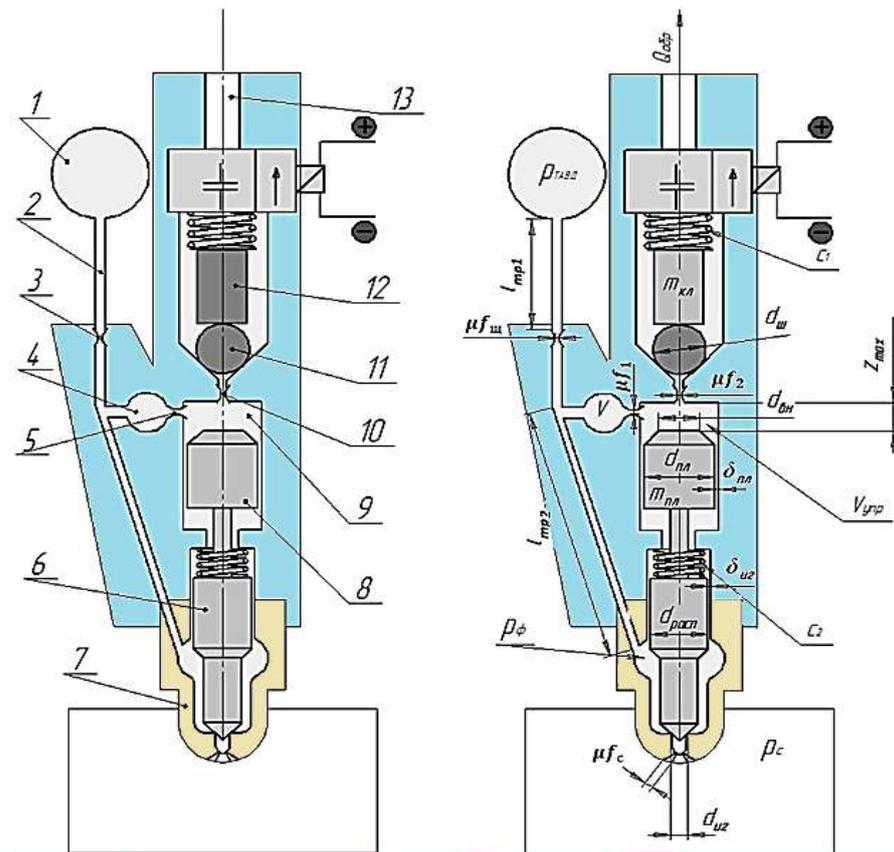


Рис. 2.4. Расчётная схема электрогидравлической форсунки.

1 – топливный аккумулятор; 2 – трубка высокого давления; 3 – щелевой фильтр; 4 – входная камера; 5 – наполнительный жиклёр; 6 – игла распылителя; 7 – корпус распылителя; 8 – плунжер-мультипликатор; 9 – камера

управления; 10 – сливной жиклер; 11 – шариковый клапан; 12 – якорь клапана; 13 – полость обратной магистрали.

Срабатывание электрогидравлической форсунки происходит под действием сигнала управления, питающего электромагнит. Сила тяги электромагнита выразится уравнением баланса напряжений, которое, при постоянной индукции будет иметь вид [1]:

$$U_0 = i \cdot R + L \frac{di}{dt}, \quad (2.15)$$

где:  $L$  - индуктивность контура, Гн.

Силу тяги электромагнита определится, исходя из известной зависимости Максвелла [77]:

$$F_{\text{маг}}(\delta) = \frac{i^2 \cdot w^2 \cdot \mu \cdot S}{2(\delta_{\text{магн}} - h)}, \quad (2.16)$$

где:  $w$  - число витков в обмотке электромагнита;

$\mu$  - магнитная проницаемость топлива в зазоре между якорем и электромагнитом;

$S$  – площадь якоря электромагнита, м<sup>2</sup>.

Уравнение движения якоря клапана будет иметь вид:

$$m_{\text{ккл}} \frac{dv_{\text{ккл}}}{dt} + k_{\text{д}} v_{\text{ккл}} = (p_{\text{ккл}} - p_{\text{сл}}) \cdot S_{\text{ккл}} + \sigma_{\text{упр}} \cdot F_{\text{маг}}(\delta) + c_1(x_1 + h) - c_2 h - \lambda_{\text{упр}} F_1; \quad (2.17)$$

$$v_{\text{ккл}} = \frac{dh}{dt},$$

где:  $m_{\text{ккл}}$  – масса подвижных элементов клапана, кг;

$h$  – ход якоря клапана, м;

$v_{\text{ккл}}$  – скорость перемещения клапана, м/с;

$k_{\text{д}}$  – коэффициент демпфирования, Н·с/м;

$p_{\text{ккл}}$  – давление в полости клапана, Па;

$p_{\text{сл}}$  – давление в полости слива, Па;

$S_{\text{ккл}}$  – продольное сечение клапана, мм<sup>2</sup>;

$\sigma_{\text{упр}}$  – ступенчатая функция;

$F_{\text{маг}}(\delta)$  – усилие электромагнита в зависимости от зазора  $\delta$ , Н;

$c_1$  – жесткость пружины якоря, Н/м;

$c_2$  – жесткость демпфирующей пружины, Н/м;

$x_1$  – предварительная деформация пружины, м;

$F_1$  – сила, возникающая после соударения подвижных и неподвижных деталей, Н.

При перемещении подвижных частей электромагнитного клапана необходимо учитывать их соударение с неподвижными элементами в верхнем и нижнем упорах, роль которых выполняют стойка клапана и седло клапана соответственно. Необходимость учета этого обстоятельства вызвана влиянием на процесс топливоподачи и, соответственно на точность расчета. Соударение двух элементов вызывает их отскок, при этом часть энергии, расходуемая на деформацию, преобразуется в кинетическую. Эту часть определим с помощью коэффициента восстановления.

Силу удара моделируется с учетом контактной жесткости [16]:

$$F_1 = k \cdot \delta, \quad (2.18)$$

где:  $k$  – контактная жесткость, Н/м;

$\delta$  – податливость, м.

Контактная жесткость определится по следующему уравнению [137]:

$$k = m_{\text{клап}} \cdot \left(\frac{\pi}{\Delta t}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{\ln k_{\text{в}}}{\pi}\right)^2\right], \quad (2.19)$$

где:  $k_{\text{в}}$  – коэффициент восстановления.

В свою очередь определим коэффициент восстановления [16]:

$$k_{\text{в}} = -\frac{\dot{h}_{\text{уд}}}{\dot{h}}, \quad (2.20)$$

где:  $\dot{h}_{\text{уд}}$  – скорость клапана после соударения, м/с;

$\dot{h}$  – скорость клапана до соударения, м/с.

Управляющие ступенчатые функции, накладывающие ограничение на перемещение клапана, будут иметь вид (для выражения (2.17)):

$$\sigma_{\text{упр}} \begin{cases} 0, \text{ если } t > \tau_{\text{имп}}, \\ 1, \text{ если } t < \tau_{\text{имп}}, \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\begin{cases} 1, \Rightarrow h = h_{\text{max}} \\ 0, \Rightarrow 0 < h \leq h_{\text{max}}, \\ 1, \Rightarrow h = \end{cases} \quad (2.22)$$

где:  $\tau_{\text{имп}}$  – длительность управляющего импульса.

Составим уравнение перемещения плунжера-мультипликатора, учитывая предварительное натяжение пружины и то, что он управляется гидравлически, за счет разности давлений топлива в кармане распылителя и в камере управления (трением плунжера - мультипликатора об клапан пренебрегли):

$$m_{\text{пл}} \frac{d^2 z}{dt^2} = \sigma_2 \left[ \frac{p_{\text{упр}} \cdot \pi \cdot d_{\text{пл}}^2}{4} - \frac{p_{\text{ак}} \cdot \pi \cdot (d_{\text{расп}}^2 - d_{\text{иг}}^2)}{4} + c_{\text{пр.расп}}(z + x) \right], \quad (2.23)$$

где:  $m_{\text{пл}}$  – масса подвижных деталей (поршня и иглы распылителя), г;

$z$  – величина перемещения плунжера-мультипликатора, мм;

$\sigma_2$  – управляющая ступенчатая функция, накладывающая ограничение на перемещение плунжера- мультипликатора;

$p_{\text{ак}}$  – давление в аккумуляторе, МПа;

$d_{\text{расп}}, d_{\text{иг}}$  - соответственно диаметры плунжера-мультипликатора, направляющей части распылителя и иглы, мм;

$c_{\text{пр.расп}}$  – жесткость пружины распылителя, Н/мм;

$x$  – предварительная деформация пружины распылителя, мм.

Необходимо учесть два обстоятельства: во-первых, максимальное перемещение плунжера-мультипликатора, как правило, имеет ограничение, например, для ЭГФ Bosch (рис. 2.5). А во-вторых, наличие обратной связи по подъему иглы, возникающей при перекрытии торцом плунжера-

мультипликатора канала управления. В этом случае разгрузка камеры управления прекращается, но продолжается наполнение топливом через дополнительный жиклер. В результате плунжер-мультипликатор, вместе с иглой отжимается вниз и находится в определенном равновесном положении, при котором устанавливается минимальный расход топлива на управление [32].

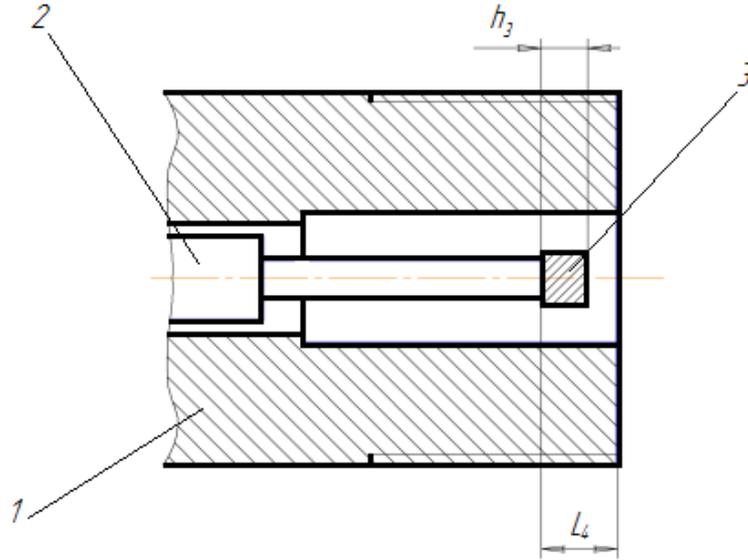


Рис. 2.5. Ограничение максимального хода иглы распылителя.

1 – корпус ЭГФ; 2 – шток плунжера-мультипликатора; 3 – проставка.

Тогда, управляющая ступенчатая функция, накладывающая ограничение на перемещения плунжера-мультипликатора (а соответственно и иглы распылителя) выразится как:

$$\begin{cases} 0, \Rightarrow z = 0 \\ 0, \Rightarrow z = L_4 - h_3 \\ 1, \Rightarrow 0 \leq z \leq L_4 - h_3 \end{cases}, \quad (2.24)$$

С учетом обратной связи уравнение перемещения подвижных частей плунжера-мультипликатора и иглы распылителя (2.19) запишется следующим образом:

$$m_{\text{пл}} \frac{d^2 z}{dt^2} = \sigma_2 \left[ \begin{array}{c} \sigma_1 \frac{p_{\text{упр}} \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4} + \frac{p_{\text{упр}} \cdot \pi \cdot (d_{\text{пл}}^2 - d_{\text{вн}}^2)}{4} - \\ - p_{\text{ф}} \cdot f_{\text{и}} + c_{\text{пр.расп}} (z + x) - p'_{\text{с}} \frac{\pi d_{\text{иг}}^2}{4} \end{array} \right] \quad (2.25)$$

где:  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр плунжера-мультипликатора, перекрывающий канал слива клапана управления, мм.

При моделировании принято, что площадь поперечного сечения распылителя изменялась по следующему условию:

$$f_{\text{и}} = \frac{\pi d_{\text{расп}}^2}{4}, \text{ если } z > 0,005 \quad (2.26)$$

$$f_{\text{и}} = \frac{\pi(d_{\text{расп}}^2 - d_{\text{игр}}^2)}{4}, \text{ если } z \leq 0,005 \quad (2.27)$$

Управляющая ступенчатая функция, накладывающая ограничение на перемещения плунжера-мультипликатора (а соответственно и иглы распылителя) выразится следующим образом:

$$\sigma_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } z = 0 \\ 0, & \text{если } z = z_{\text{max}} \\ 1, & \text{если } 0 < z < z_{\text{max}} \end{cases} \quad (2.28)$$

Давление со стороны среды (камеры сгорания), на иглу распылителя определится по следующему выражению [41]:

$$p_c' = \left( \frac{\mu_p f_p}{\mu_c f_c} \right)^2 (p_\phi - p_c) + p_c \quad (2.29)$$

Расход топлива через сопла форсунки найдем как [41]:

$$G_\phi = \rho \mu_c f_c \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_\phi - p_c|} \quad (2.30)$$

Изменение давления топлива в камере управления согласно расчетной схемы, с учетом неразрывности потока и выражения 2.8 (рис. 2.3) [31]:

$$\frac{dp_{\text{упр}}}{dt} = \frac{(Q_{\mu f1} - Q_{\mu f2} - Q_{\mu f3} - \frac{dV_{\text{пл}}}{dt})}{\alpha \cdot (V_{\text{пл}} - z \frac{\pi \cdot d_{\text{пл}}^2}{4})}, \quad (2.31)$$

где:  $\alpha$  - коэффициент сжимаемости топлива;

$Q_{\mu f1}$  - расход топлива из аккумулятора в камеру управления, мм<sup>3</sup>/с;

$Q_{\mu f2}$  - расход топлива через управляющий клапан, мм<sup>3</sup>/с;

$Q_{\mu f3}$  - расход топлива через уплотнение клапана, мм<sup>3</sup>/с.

Начальные условия для решения системы уравнений ( $t=0$ ):

$$v_{\text{кл}} = 0; v_{\text{пл}} = 0; c_z = 0; z = 0; p_{\text{упр}} = p_{\text{ак}}; V_{\text{кл}} = 0; h = 0 \quad (2.32)$$

Изменение давления в других полостях рассчитывается аналогично уравнению (2.7).

Одним из ключевых моментов, математической модели, является описание функционирования управляющего клапана, как основной причины изменения технического состояния ЭГФ.

Для математического описания приняты следующие соображения. При поднятии клапана, давление в управляющей камере снижается, благодаря сообщению ее с полостью слива посредством сливного жиклера. Топливо начинает двигаться через промежуток, между шариком и коническим уплотнением клапана. Это уплотнение имеет форму кольца.

Для того чтобы найти боковую площадь поверхности, составим расчетную схему (рис. 2.6).

Направляющая усеченного конуса  $y$  может быть найдена как:

$$y = h \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.33)$$

Аналогичным образом находим высоту конуса:

$$h = (r + y) \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.34)$$

Нижнее основание усеченного конуса (затемненного) рассчитаем по формуле:

$$S_{\text{осн.нижн.}} = 2 \left( r + h \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.35)$$

Площадь боковой поверхности конуса:

$$S_{\text{бок}} = 2\pi \cdot \left( h \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \left( \left( 2r + h \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) + 2r \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \quad (2.36)$$

Радиус нижнего основания:

$$R = \left( r + h \cdot \sin \left( \frac{a}{2} \right) \right) \cdot \cos \left( \frac{a}{2} \right) \quad (2.37)$$

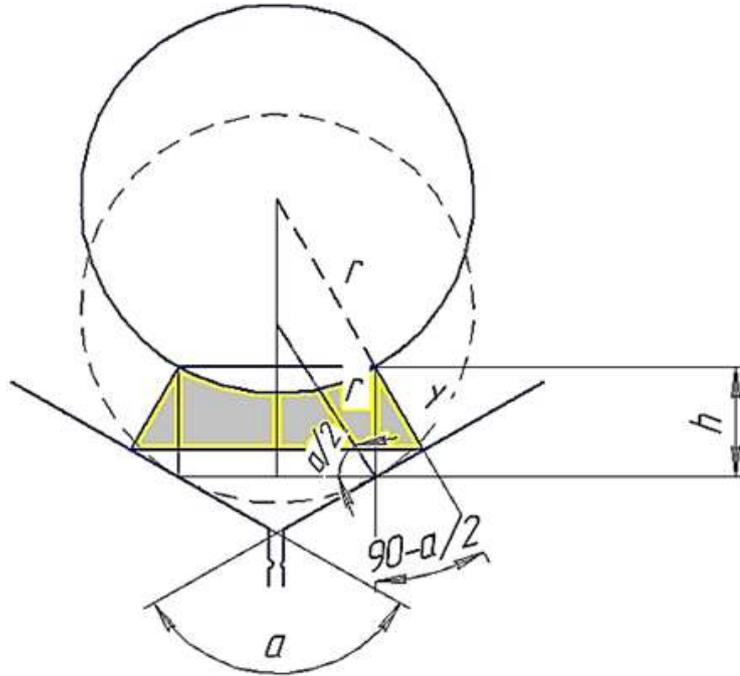


Рис. 2.6. Схема перемещения шарика в клапане ЭГФ:  $a$  – угол конуса посадочного места шарика;  $r$  – радиус шарика;  $h$  – ход шарика (клапана).

Радиус верхнего основания клапана:

$$r_1 = r \cdot \cos \left( \frac{a}{2} \right) \quad (2.38)$$

Объем кольцевой полости при срабатывании клапана:

$$V_{\text{кол}} = \frac{\pi}{3} (R^2 - r^2) \cdot h \quad (2.39)$$

Разность давлений топлива камера управления – слив:

$$\Delta p = p_{\text{упр}} - p_0, \quad (2.40)$$

где:  $p_{\text{упр}}$  - давление топлива в камере управления, МПа;

$p_0$  - давление топлива в обратной магистрали, МПа.

Разность давлений топлива между аккумулятором и камерой управления:

$$\Delta p_{\text{вх}} = p_{\text{ак}} - p_{\text{упр}}, \quad (2.41)$$

где:  $p_{\text{ак}}$  - давление в топливном аккумуляторе, МПа.

## **2.4. Теоретическое обоснование разработанного метода диагностики электрогидравлических форсунок**

Изменение технического состояния ЭГФ, в процессе эксплуатации автомобиля, обусловлено не только интенсивными динамическими и температурными нагрузками. Особую роль здесь играет качество используемого топлива. Топливо является рабочим телом форсунки, воздействуя на её элементы и приводя их в движение. Некачественное топливо, непосредственным образом приводит к гидроабразивному изнашиванию, что влечёт появление зазоров и механических повреждений. Результатом являются повышенные утечки, величина которых характеризует техническое состояние ЭГФ.

Рассмотрим утечки топлива в механизме типичного инжектора дизельной топливной системы с ТАВД (рис. 2.7) [117, 161]. Они происходят в канал слива – полость с низким давлением, близким к атмосферному. Утечки топлива подразделяются на статические – при отсутствии сигнала управления и закрытом управляющем клапане и динамические – при действии сигнала управления и открытом управляющем клапане. Топливо в обратную магистраль проникает через зазоры запорной иглы и её направляющей, плунжера – мультипликатора и его уплотнения, а также неплотности управляющего клапана.

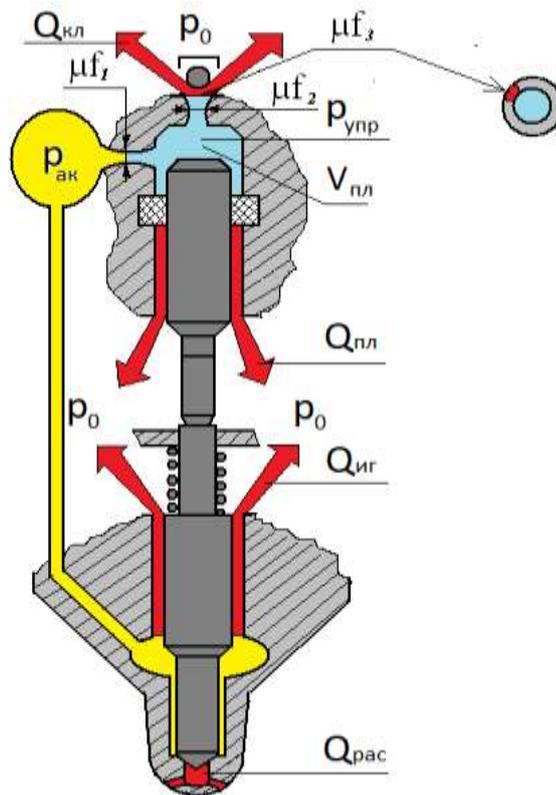


Рис. 2.7. Схема движения топлива через зазоры и дефекты уплотнений электрогидравлической форсунки АТПС [117].

На схеме (рис. 2.7) указаны:

- расход топлива через поршневую часть иглы  $Q_{иг}$  и плунжере-мультипликатора  $Q_{пл}$ ;
- расход топлива  $Q_{ккл}$ , через уплотнение  $\mu f_3$ , клапана камеры управления;
- давление в ТАВД  $p_{ак}$ ;
- давление в камере управления  $p_{упр}$ ;
- давление в сливной полости  $p_0$ ;
- проходные сечения наполнительного и сливного жиклёров  $\mu f_1$  и  $\mu f_2$ ;
- объём образованный, перемещением плунжера-мультипликатора  $V_{пл}$ .

В свою очередь, утечки топлива через зазоры и уплотнения, отнесенные к статическим  $Q_{ст}$  определяются, как сумма утечек топлива через направляющую часть плунжера-мультипликатора, клапана и утечки топлива через цилиндрическую направляющую запорной иглы распылителя. При этом воз-

можное неплотное состояние распылителя по конической части иглы исключается из рассмотрения, поскольку ЭГФ в этом случае теряет работоспособность, а для ДВС это может привести к серьезной поломке деталей. Таким образом: утечки топлива в обратную магистраль запишутся как:

$$Q = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{дин}}, \quad (2.42)$$

где:  $Q_{\text{ст}}$  - расход топлива через зазоры и уплотнения, мм<sup>3</sup>/с.

В свою очередь:

$$Q_{\text{ст}} = Q_{\text{пл}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{иг}}, \quad (2.43)$$

где:  $Q_{\text{пл}}$  - расход топлива через уплотнение плунжера, мм<sup>3</sup>/с;

$Q_{\text{кл}}$  - расход топлива через зазоры управляющего клапана, мм<sup>3</sup>/с;

$Q_{\text{иг}}$  - расход топлива через зазор направляющей запорной иглы, мм<sup>3</sup>/с.

Динамический расход топлива на управление зависит от количества топлива, прошедшего через управляющий клапан с изменением объема, вследствие перемещения плунжера-мультипликатора:

$$Q_{\text{дин}} = Q_{\text{кл}} + \frac{dV_{\text{пл}}}{dt} = Q_{\text{кл}} + \frac{dz_{\text{пл}}}{dt} \cdot \frac{\pi d_{\text{пл}}^2}{4}, \quad (2.44)$$

где:  $V_{\text{пл}}$  – объём, образованный при перемещении плунжера-мультипликатора мм<sup>3</sup>;

$\frac{dz_{\text{пл}}}{dt}$  - скорость перемещения плунжера, м/с;

$d_{\text{пл}}$  - диаметр плунжера-мультипликатора, мм;

$Q_{\text{кл}}$  - расход топлива через управляющий клапан, мм<sup>3</sup>/с.

Расход топлива через поршневую часть плунжера [5]:

$$Q_{\text{пл}} = \frac{\pi d_{\text{пл}} (\delta_{\text{пл}} + 2 \cdot B \cdot p_{\text{упр}})^3 \cdot p_{\text{упр}}}{96 \cdot \mu \cdot l_{\text{пл}}}, \quad (2.45)$$

где:  $d_{\text{пл}}$  - диаметр плунжера, мм;

$\delta_{\text{пл}}$  - начальный диаметральный зазор в паре плунжер – втулка, мм;

$B$  - коэффициент, учитывающий деформацию втулки от давления топлива;

$p_{\text{упр}}$  - давление в камере управления, МПа;

$\mu$  - коэффициент динамической вязкости топлива, при текущих давлениях и температуре;

$l_{пл}$  - длина прецизионной части плунжера, мм.

Расход через прецизионный зазор между иглой и корпусом распылителя [5]:

$$Q_{рас} = \frac{\pi d_u \cdot \delta_u^3 \cdot \beta \cdot p_{рас} \cdot \ln c}{12 \cdot \mu \cdot l_u \cdot (c-1)}, \quad (2.46)$$

где:  $d_u$  - диаметр иглы, мм;

$\delta_u$  - начальный диаметральный зазор в паре игла – распылитель, мм;

$p_{рас}$  - давление топлива в кармане распылителя, МПа;

$l_u$  - длина прецизионной части иглы;

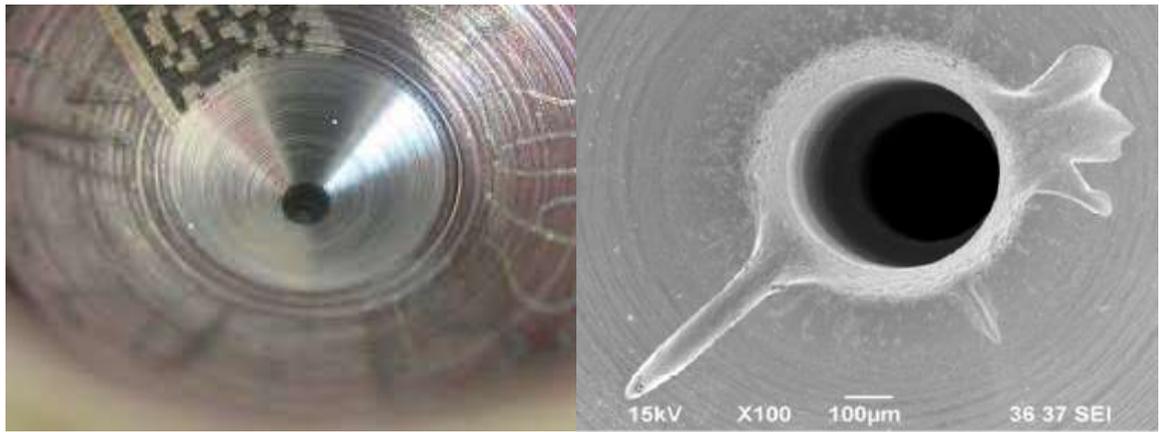
$\beta$  - коэффициент, учитывающий изменение формы уплотняющего зазора вследствие эксцентриситета иглы:

$$\beta = 1 + 1,5 \cdot \left(\frac{l_u}{\delta_u}\right), \quad (2.47)$$

$c$  - постоянный коэффициент, зависящий от физических свойств топлива,  $c = 1,0025$ .

Моделирование утечек через изношенный клапан камеры управления имеет особенности. На процесс истечения топлива и, следовательно, вид графика давления в обратной магистрали влияет не только площадь неплотности, но и геометрическая форма изношенных участков кромки конического седла управляющего клапана.

При моделировании повреждения уплотняющей кромки клапана в процессе износа, учитывалось изменение угла -  $\alpha/2$  в зоне повреждения, на угол -  $\alpha'$ , при истечении под высоким давлением, это существенным образом влияет на утечку и характер изменения давления после управляющего клапана (рис. 2.8, 2.9).



а) без износа

б) с износом

Рис. 2.8. Внешний вид конического седла управляющего клапана.

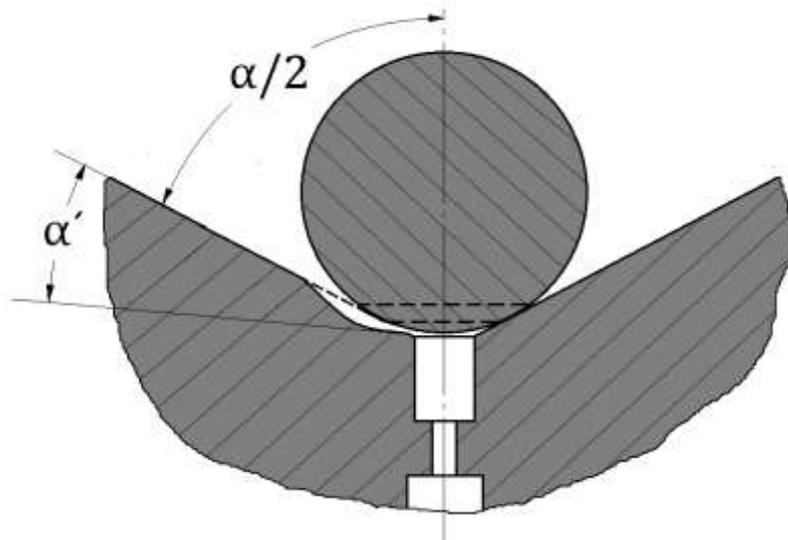


Рис. 2.9. Расчётная схема управляющего клапана ЭГФ, имеющего износ.

Помимо изменения угла конического седла клапана, при износе возникают дополнительные каналы (рис. 2.8 б). В дальнейшем, при совместном решении уравнений 2.1 - 2.5, становится возможным аналитически выявить изменение расхода и давления в общей обратной магистрали. Износ математически смоделирован также увеличением диаметральных зазоров в парах «игла-распылитель», а также - «корпус клапана-плунжер». Таким образом, наличие неплотностей, вызванных, прежде всего, износом управляющего клапана, влияет и на общий расход и на давление. Поэтому в случае значительной трудоемкости или невозможности измерения расхода топлива на

управления от каждой форсунки, для увеличения информативности диагностирования, целесообразно использовать данные о расходе и давлении топлива в общей обратной магистрали АТПС. Динамика движения топлива в общей обратной магистрали, а значит, и указанных диагностических параметров зависят как от порядка работы, так и от взаимного расположения форсунок.

Реализация метода предполагает наличие стабильного тестового режима. Режим холостого хода является наиболее доступным и реализуемым режимом работы двигателя, для целей проведения диагностики АТПС в условиях эксплуатации. Это особенно важно, при процедурах, связанных с подключением к топливным линиям, так как обеспечивает лучший контроль и безопасность при проведении работ. Кроме того, функционирование двигателя в режиме холостого хода, требует от ЭГФ АТПС малых, но точных и сбалансированных подач, что, в свою очередь, повышает информативность, при оценке их технического состояния. При низкой частоте вращения также значительно меньше вероятность наложения волн давления в общей обратной магистрали. Исходя из данных соображений, режим холостого хода оказался более предпочтительным, для разработанного метода диагностики ЭГФ. В этой же связи, теоретические и экспериментальные исследования проводились с основными, соответствующими для режима работы двигателя, допущениями.

## **2.5. Выводы по второй главе**

1. Разработанная структурная схема процесса функционирования электрогидравлических форсунок с учетом износа клапана камеры управления позволяет выполнять анализ влияния на объект исследования внешних и внутренних факторов, а также параметров технического состояния. По ре-

зультатам анализа схемы сформирована математическая модель исследуемого процесса;

2. Разработанная математическая модель позволяет проводить аналитическое исследование процесса функционирования электрогидравлической форсунки, с учетом износа клапана камеры управления. Она содержит математическое описание гидродинамических процессов движения топлива, процессы перемещения подвижных частей, а также формирования давления и расхода топлива в общей обратной магистрали;

3. На основе разработанных теоретических предпосылок научно обоснован метод диагностики электрогидравлических форсунок по параметрам давления и расхода топлива в общей обратной магистрали.

### **3. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Методика экспериментальных исследований представляет собой последовательность действий и правил, связующих научную гипотезу и теоретические изыскания с экспериментальными исследованиями.

В текущей главе описаны методики экспериментальных исследований процесса функционирования электрогидравлической форсунки аккумуляторной топливоподающей системы дизельного двигателя, в том числе методика оценки её технического состояния по расходу и давлению топлива, в общей обратной магистрали автомобиля. Дано подробное описание экспериментального оборудования и средств измерений, получены их метрологические характеристики.

Разработка методики выполнялась с учётом знаний о проведении исследований на автомобильном транспорте [111].

#### **3.1. Общая методика экспериментального исследования процесса функционирования ЭГФ при изменении ее технического состояния**

Качественно проведенное научное исследование, прежде всего, отличается сходимостью результатов теоретической работы и эксперимента. Итогом является оценка адекватности математической модели и её результатов, представленных во второй и четвёртой главах, на основе сравнения расчетных и экспериментальных данных исследуемого процесса.

Целью разработанной методики являлось обеспечение проведения исследований взаимосвязи технического состояния ЭГФ, с параметрами расхода и давления топлива в общей обратной магистрали дизельного двигателя. Были сформулированы несколько важных этапов общей методики:

- обоснование требований и диагностических нормативов к определению технического состояния ЭГФ;

- подбор и разработка экспериментального оборудования;
- обоснование требования к параметрам измерений и системам измерения давления и расхода топлива в общей обратной магистрали;
- разработка методики тарировки систем измерения давления и расхода топлива;
- формирование методики планирования экспериментов, оценки погрешностей и адекватности математической модели.

Разработанный метод диагностики ЭГФ испытывался на автомобилях с дизельными двигателями, оборудованными аккумуляторной системой топливоподачи типа Common Rail. В качестве объекта экспериментального исследования был выбран типичный представитель систем питания Common Rail – ЭГФ BOSCH 0445110376 [118], двигателя ISf 2.8 Cummins, автомобилей семейства ГАЗель [26]. Дополнительно, с целью накопления экспериментальной статистики, в тестах и испытаниях участвовали автомобили: KIA Sorento, автобусы, оснащенные двигателями ЯМЗ-534, ЯМЗ-536, 4ISbe. Выбор указанных автомобилей был обусловлен, прежде всего, доступностью расположения ЭГФ, и возможностью оперативного контроля интересующих параметров, без вмешательства в конструкцию двигателя.

Проведение экспериментов обеспечивалось как существующим, так и разработанным для поставленных задач оборудованием, с учётом требований рабочей гипотезы и теоретических изысканий и возможностью применения в лабораторных и производственных условиях. Общая методика включила в себя методики проверки адекватности математических моделей ЭГФ, функционирующей в стендовых условиях и аналогичные методики, в составе топливоподающей системы.

В соответствии с гипотезой и задачами научного исследования, представленными во введении, была разработана методика экспериментального исследования технического состояния функционирующей ЭГФ. Она требовалась, для подтверждения состоятельности математической модели, описывающей связь технического состояния ЭГФ, функционирующей в составе

топливоподающей системы двигателя, с параметрами расхода и давления топлива в общей обратной магистрали данной ТПС.

Начальной стадией разработки методики экспериментального исследования процесса функционирования ЭГФ, при изменении технического её состояния, явились статистические исследования функционирования ЭГФ, с выявлением характера возникающих неисправностей и отказов, а также анализ существующих методик выявления неисправностей форсунок и параметров, характеризующих их техническое состояние.

Руководствуясь анализом, представленным в материале раздела 1.4 первой главы данной работы, можно заключить, что техническое состояние ЭГФ можно оценивать не только на специализированных стендах, но и при проведении диагностики топливоподающей системы на автомобиле, исключая трудоёмкие разборочно–сборочные работы. Такой подход особенно актуален для конструкций ТПС, с расположением ЭГФ внутри корпуса двигателя, имеющих наличие только общей обратной магистрали.

Научное обоснование получил способ контроля технического состояния электрогидравлических форсунок, на работающем двигателе, по расходу и давлению топлива в общей обратной магистрали топливоподающей системы.

### **3.2. Методика определения диагностических нормативов исследуемой электрогидравлической форсунки**

В процессе эксплуатации автомобиля техническое состояние электрогидравлических форсунок изменяется. Это связано со временем наработки, качеством используемого топлива и другими факторами. Для проведения научного исследования необходимы чёткие критерии оценки технического состояния исследуемых форсунок, то есть диагностические нормативы, основанные на значениях ключевых функциональных показателей ЭГФ.

Важнейшим этапом разработанного метода диагностирования, являлось определение нормативных диагностических параметров и параметров технического состояния, которое можно отнести к трем группам:

- *номинальное техническое состояние ЭГФ — состояние, соответствующее новой или отремонтированной форсунке, являющееся началом отсчета функциональных отклонений.*

- *допустимое техническое состояние ЭГФ – состояние форсунки с приемлемыми функциональными отклонениями, разрешённое к эксплуатации, без операций технического обслуживания или ремонта, при котором она надёжно работает, до следующего планового контроля.* Такое состояние характеризует основную массу функционирующих ЭГФ.

- *предельное техническое состояние — состояние форсунки, характеризующее предельными функциональными отклонениями, при котором дальнейшая её эксплуатация невозможна или нецелесообразна, по технико - экономическим или иным показателям.*

Выбор ЭГФ номинального, допустимого и предельного технического состояния, для проведения последующих испытаний на автомобиле, производился в соответствии, с тест – планами изготовителя форсунок, на специализированном стенде, позволяющем реализовывать основные режимы их работы (давление в аккумуляторе, длительность впрыска, температура тестовой жидкости и др.).

Тест – план представляет собой комплекс тестовых воздействий на ЭГФ, производимых на стенде, с целью сравнения выходных показателей форсунки с эталонными, на заданных производителем режимах давления и длительности управляющего сигнала. Режимы тест – плана подобраны таким образом, чтобы с его помощью можно было не только оценивать техническое состояние ЭГФ, но и представлять, нарушения каких структурных параметров вызвали его изменение.

Обычно электрогидравлические форсунки проверяются, как минимум, в четырех режимах. Это режим полной нагрузки (VL), холостого хода (LL),

режим частичной нагрузки (EM), впрыска малых доз топлива (предвпрыск VE).

На листе тест – плана представлены идентификационный номер электрогидравлической форсунки (0445110376), значения управляющих параметров: давления (PRESSURE), длительности управляющего сигнала (Puls WIDTH), температуры тестовой жидкости (HEAT), а также номинальные значения ключевых выходных параметров: цикловой подачи (DELIVERY) и расхода топлива на управление (BACK LEAKAGE) и пределы их отклонений (рис. 3.1).

| CMX          |                 | CRI-3000 test results |           |                                  |                                      | CUSTOMER DATA |  |
|--------------|-----------------|-----------------------|-----------|----------------------------------|--------------------------------------|---------------|--|
| INJECTOR NO: |                 | MANUFACTURER          |           |                                  |                                      |               |  |
| 0445110376   |                 | BOSCH                 |           | N368<br>52003<br>1868<br>1703    |                                      |               |  |
| TEST         | PRESSURE<br>BAR | Puls WIDTH<br>uSec    | HEAT<br>C | DELIVERY<br>mm <sup>3</sup> /Hub | BACK LEAKAGE<br>mm <sup>3</sup> /Hub |               |  |
| 1            | 1800            | 800                   | 40        | 62.8 ± 8<br>62.3                 | 44 ± 26<br>21.9                      |               |  |
| 2            | 300             | 700                   | 40        | 5 ± 3<br>4.1                     | --- ± ---<br>---                     |               |  |
| 3            | 600             | 630                   | 40        | 12.3 ± 4.8<br>10.9               | --- ± ---<br>---                     |               |  |
| 4            | 600             | 295                   | 40        | 1.8 ± 1.5<br>1                   | --- ± ---<br>---                     |               |  |
| 5            | ---             | ---                   | 40        | --- ± ---<br>---                 | --- ± ---<br>---                     |               |  |

Рис. 3.1. Фрагмент тест – плана ЭГФ 0445110376 номинального технического состояния.

*Первый режим (VL)* тест – плана соответствует функционированию ЭГФ в номинальном режиме, с высокими значениями давления и управляющего сигнала.

*Второй режим (LL)* представляет собой тест функционирования ЭГФ в режиме холостого хода. Он характеризует точность цикловой подачи на хо-

лостом ходу, при низких значениях давления топлива. По показателям данного режима можно судить, например, об усилении пружины распылителя.

*Третий пункт* (EM) тест – плана реализует режим функционирования на средних нагрузках. Данный режим характеризует точность работы ЭГФ, при средних значениях давления и длительности управляющего сигнала. Этот режим подобен первому, он демонстрирует соответствие работы ЭГФ, при снижении от номинального, величин давления и управляющего сигнала.

*Четвёртый режим* (VE) имеет очень короткий управляющий сигнал. По его данным можно судить, например, об усилении пружины клапана камеры управления и магнитном зазоре.

Техническое состояние испытуемых электрогидравлических форсунок оценивалось совокупными измерениями цикловой подачи и расхода топлива на управление. При проведении стендовых испытаний использовались, как новые ЭГФ, так и бывшие в эксплуатации. В последнем случае они снимались непосредственно с диагностируемого автомобиля и проверялись по большему количеству точек, чем указано в стандартном тест-плане, а результаты эксперимента представлены в разделе 4.1.

Объем выборки для нормирования определялся на основании выражения [14, 38, 107, 114]:

$$N \geq \left[ \frac{t(p)}{\varepsilon} \right]^2 \cdot \sigma^2 \quad (3.2)$$

где:  $t(p)$  – требуемая надежность определения значения параметра;

$\varepsilon$  – требуемая точность определения параметра;

$\sigma$  – среднеквадратическая ошибка определения параметра.

В результате проведённой работы, руководствуясь критериями тест – плана, из группы форсунок были выбраны ЭГФ номинального, допустимого и предельного технического состояния, для проведения последующих испытаний. Основным критерием выбраковки служило значение расхода топлива на управление, в наибольшей степени связанное с техническим состоянием

клапана камеры управления (в первую очередь с его абразивным износом, раздел 2.4). Предельным состоянием принято такое, при котором расход топлива на управление превышал среднее значение для номинального режима в 2,5 раза.

### 3.3. Методика определения исходных данных исследуемой электрогидравлической форсунки

Электрогидравлическая форсунка - сложный прецизионный механизм. Значения физических параметров её конструкции являются «ноу-хау» и коммерческой тайной производителя. В связи с этим, данные параметры, необходимые для построения математической модели, были получены самостоятельно, с использованием известных методов измерений физических величин, получаемых непосредственно и косвенно.

Высокоточные калиброванные отверстия, для обеспечения требуемого закона подачи топлива, такие как диаметр отверстий распылителя, сливного и наполнительного жиклёров камеры управления, имеют очень малые размеры, трудно поддающиеся контактному измерению. Размеры этих отверстий были определены в лаборатории электронной микроскопии ФТИ ИРНИТУ, с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOLJIB-Z4500, с разрешением от 5 до 300000 крат (рис. 3.2) [118].

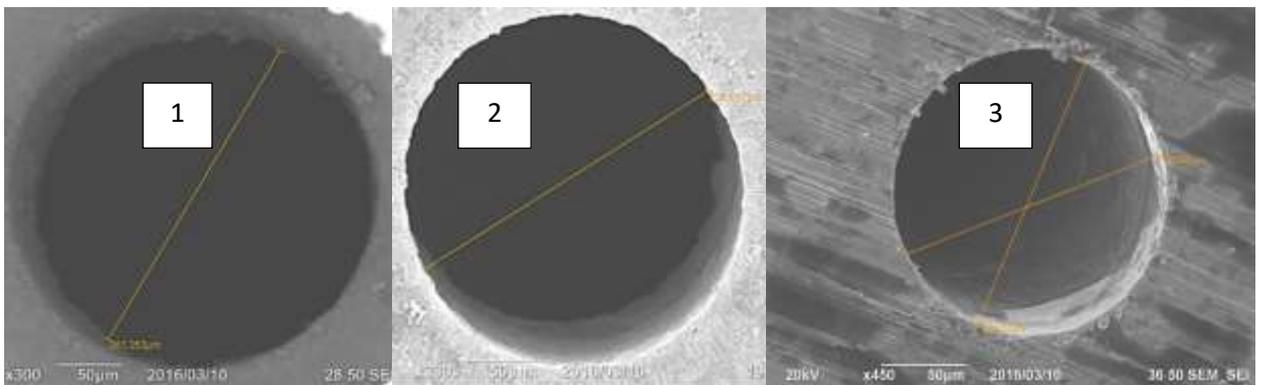


Рис. 3.2. Снимки отверстий жиклеров ЭГФ, с размерами, полученные с помощью электронного микроскопа JEOLJIB-Z4500

*1 - отверстие сливного жиклёра управляющей камеры; 2 - отверстие наполнительного жиклёра управляющей камеры; 3 – отверстие распылителя.*

Значения коэффициентов расхода сечений жиклёров камеры управления и распылителя были получены опытным путем – проливкой топливом жиклёров и сечений распылителя, при постоянном давлении и температуре, на мензурочном стенде 12 PSB Technopart (рис. 3.18.) [30].

Массы подвижных частей: клапана, иглы и мультипликатора определялись взвешиванием на лабораторных весах, с ценой деления 0,01 г.

Жёсткость пружин определялась следующим образом. Измерялась длина пружины в свободном состоянии, затем она нагружалась грузом определённого веса, во время деформации, под грузом опять измерялась длина пружины (рис. 3.3). Для проведения измерений использовался груз 50 Н, деформация пружины измерялась с помощью штангенциркуля, с разрешением 0,01 мм.

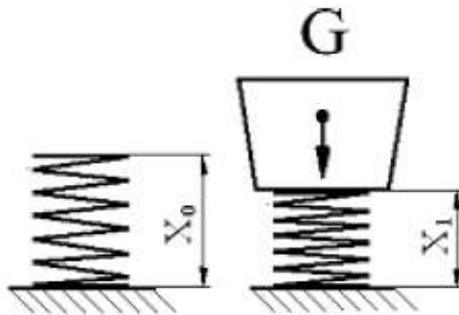


Рис. 3.3. Расчетная схема измерения жесткости пружин

Жёсткость пружин  $c$ , (н/мм) определена согласно закону Гука:

$$c = \frac{G}{x_0 - x_1} = \frac{m \cdot g}{x_0 - x_1}, \quad (3.1)$$

где:  $G$  - вес груза, Н;

$x_0$  - длина пружины в свободном положении, мм;

$x_1$  - длина пружины в нагруженном положении, мм.

### **3.4. Оборудование для контроля функциональных показателей и диагностики электрогидравлических форсунок.**

Существует серийное оборудование и методики оценки технического состояния ЭГФ, разработанные в соответствии с техническими требованиями производителей форсунок. Стационарные диагностические стенды для испытаний электрогидравлических форсунок, позволяют с высокой точностью измерять значения выходных показателей ЭГФ, что определяет качество оценки их технического состояния.

#### **3.4.1. Требования к оборудованию**

Для контроля функциональных параметров ЭГФ, при определении диагностических нормативов, были сформированы требования к оборудованию (далее по тексту стенд), позволяющему измерять выходные параметры форсунок.

Основными выходными параметрами изучаемого процесса в лабораторных условиях, являются цикловая подача ЭГФ и расход топлива на управление. Указанные величины возможно измерить в лабораторных (стендовых) условиях с мензурочными и безмензурочными системами измерений. Специализированный стенд позволяет провести точную количественную оценку технического состояния ЭГФ с наибольшей достоверностью. К стенду предъявляют следующие требования:

1. Модулирование сигнала открытия инжектора в диапазоне 100– 4000  $\mu$ s.
2. Температурный контроль тестовой жидкости в диапазоне  $40 \pm 2$  °C.
3. Регулирование давления тестовой жидкости в диапазоне 0 – 200 МПа.
4. Электронное измерение давления в аккумуляторе давления топлива в диапазоне: 0 – 200 МПа.

5. Регулирование оборотов приводного электродвигателя в диапазоне 300 – 2000 rpm.
6. Диапазон измерения цикловой подачи топлива: от 0,3 до 380 мм<sup>3</sup>.
7. Диапазон измерения расхода топлива на управление: 10...400 мл/мин.
8. Погрешность измерения, не более 0,5%.
9. Наличие оригинальных тест-планов производителя.

### 3.4.2. Описание стенда для проверки функциональных показателей и диагностики ЭГФ

Обзор систем измерения показал, что наиболее распространенными и хорошо зарекомендовавшими себя в этой сфере способами, являются технические решения, предлагаемые фирмами Bosch, реализованные, в том числе, в стенде C-MAX 3000 (производство Турция) (рис. 3.4). Стенд разработан, для проверки ЭГФ Common Rail производства Bosch, Delphi, Denso, Siemens, при давлении до 200 МПа). Технические параметры стенда соответствуют нормативами тестирования ЭГФ, мировых производителей. Он обладает характеристиками, достаточными для реализации требований, предъявляемых к проводимым экспериментам.



Рис. 3.4. Внешний вид стенда для испытания ЭГФ CR C-MAX 3000.

Тестовой жидкостью в стенде является калибровочное масло Shell по ISO 4113 плотностью  $820 \text{ кг/м}^3$  при нормальных условиях и кинематической вязкостью  $5,5 \text{ сСт}$  при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Схема измерительных ячеек, указанных производителей, для измерения подачи и расхода топлива ЭГФ в обратную магистраль (на управление) представлена на рисунке 3.5, она отражает принцип, положенный в основу системы измерения Bosch.

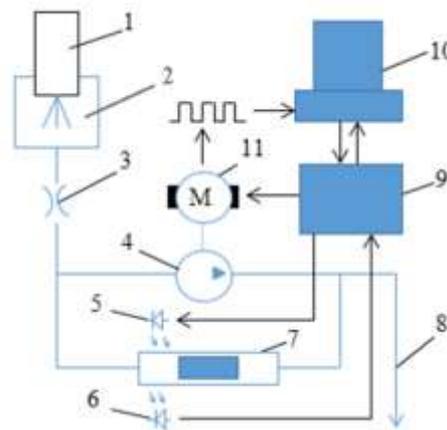


Рис. 3.5. Схема функционирования безмензурочного измерительного модуля BOSCH.

*1 – ЭГФ; 2 – входная камера; 3 – жиклер; 4 – шестеренный насос; 5 – светодиод; 6 – фотодиод; 7 – поршень; 8 – магистраль слива; 9 – блок управления; 10 – персональный компьютер; 11 – электродвигатель.*

Количество топлива, проходящего через измерительный модуль BOSCH, определяется следующим порядком. Топливо впрыскивается форсункой 1 в измерительную камеру 2, с определенной частотой следования впрысков (например, соответствующей  $16,67 \text{ Гц}$  или для  $1000 \text{ мин}^{-1}$ ). Возникающие пульсации давления гасятся посредством жиклера 3.

Далее поток топлива поступает на вход насоса 4, приводимого в действие электродвигателем 11, в камеру с поршнем 7 и направляется в сливную магистраль 8. Фотоэлемент с высокой точностью позволяет отслеживать перемещение поршня, вызываемые изменением потока жидкости. Измерение

количества проходящего топлива осуществляется посредством углового инкрементного энкодера, выступающего в роли датчика частоты вращения вала насоса 4. Блок управления 9 задает двигателю 11 такие обороты, чтобы поршень измерительной системы возвращался в нейтральное положение. В итоге частота вращения становится пропорциональна количеству проходящего топлива.

### 3.5. Методика определения взаимосвязи цикловой подачи и расхода топлива на управление с управляющими и структурными параметрами

Обработка и визуализация экспериментальных данных, осуществлялась с помощью программного обеспечения MatLAB. Пример использования программы выглядит следующим образом.

Шаг 1. Импорт данных из табличного формата в MatLAB. Для этого формируются значения переменных по оси X и Y, в виде одномерного массива, а зависимые данные представляются массивом Z, имеющим размерность  $M*N$ , где M и N - соответственно число элементов массивов X и Y, соответственно. На рисунке 3.6 представлен пример импорта данных.

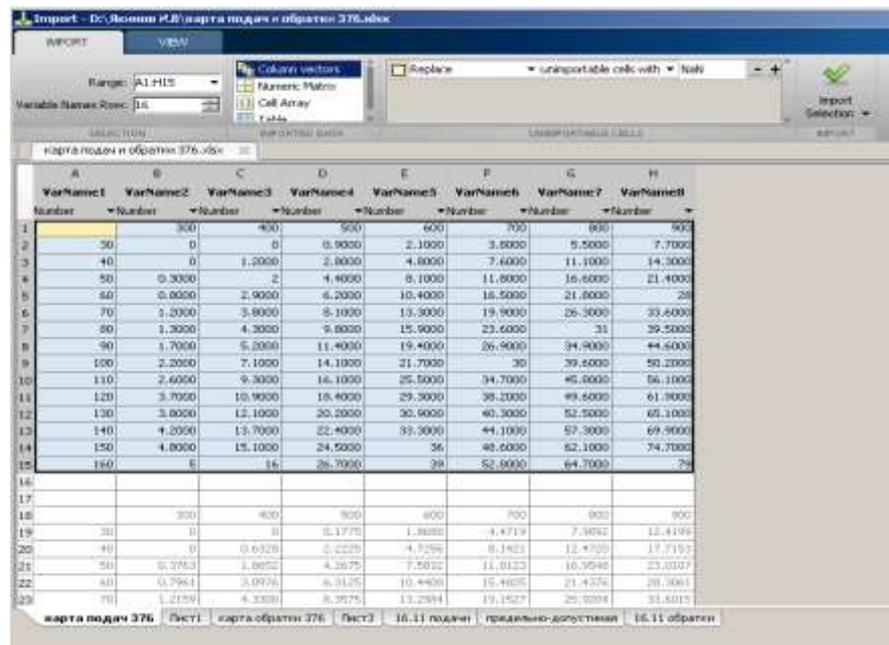


Рис. 3.6. Импорт экспериментальных данных в программу MatLAB.

Шаг 2. С помощью приложения Curve fitting tool, формируется поверхность отклика и аппроксимирующее ее выражение (рис. 3.7). Для этого в окне 1 указываются переменные, в окне 2 выбирается способ аппроксимации, например, полиномиальный второго порядка, в окне 3 выводятся рассчитанные числовые коэффициенты регрессионной модели, с доверительными границами их изменения и статистическими параметрами, позволяющими оценить ее точность.

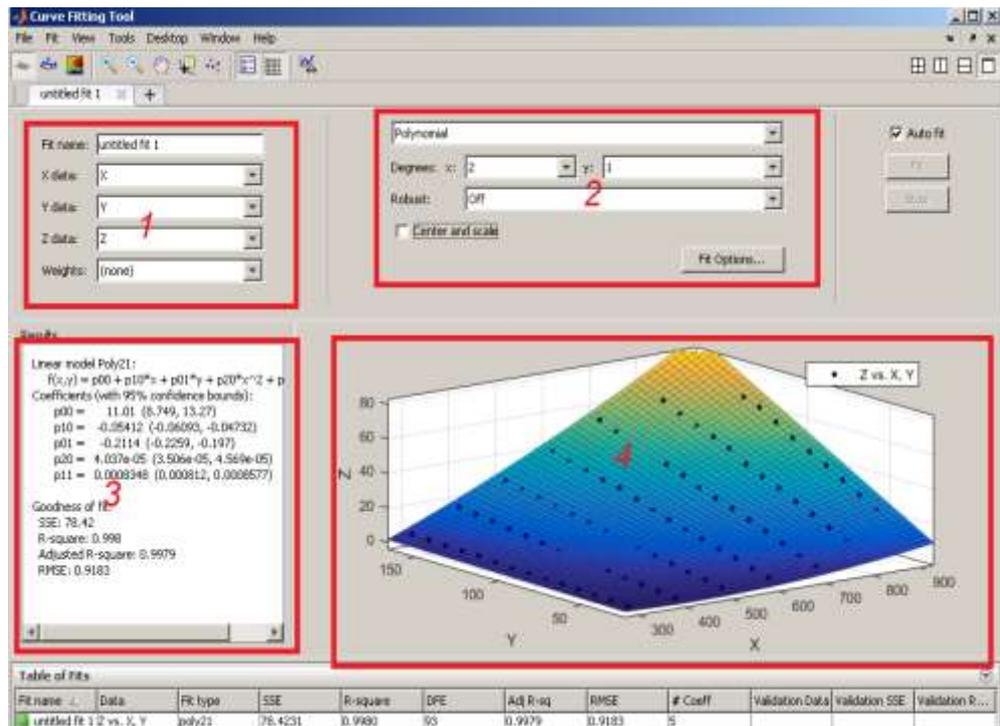


Рис. 3.7. Интерфейс приложения Curve fitting tool для построения поверхности отклика и ее аппроксимации.

Шаг 3. Оценка параметров регрессионной модели. Аппроксимирующий полином второго порядка взят для примера из окна 3. Он использован для описания зависимостей цикловой подачи от давления в аккумуляторе высокого давления и длительности управляющего импульса:

$$q(p_{ак}, \tau_e) = b_0 + b_1 \cdot p_{ак} + b_2 \cdot \tau_e + b_3 \cdot p_{ак} \cdot \tau_e + b_4 \cdot p_{ак}^2 + b_5 \cdot \tau_e^2 \quad (3.3)$$

где:  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  – коэффициенты модели;

$p_{ак}$  – давление топлива в аккумуляторе высокого давления;

$\tau_e$  – длительность управляющего импульса.

Оценочные параметры модели позволяют оценить статистическую значимость коэффициентов, а также пренебречь слабо значащими.

Аналогичным образом, в среде MatLAB были получены и другие уравнения поверхностей отклика, для искомым закономерностей.

В окне 4 формируется поверхность отклика в графическом виде, которую в дальнейшем можно редактировать, как трехмерный рисунок.

Статистическая значимость регрессионной модели оценивается, исходя из значения коэффициента детерминации ( $R^2$ ). В частности, для модели парной линейной регрессии коэффициент детерминации равен квадрату обычного коэффициента корреляции между функцией и аргументом.

Коэффициент детерминации определялся следующим образом: [14, 38, 107, 114]:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{TSS}, \quad (3.4)$$

где:  $SSE$  – сумма квадратов разностей эксперимента;

$TSS$  - сумма квадратов разностей теоретическая.

Сумма квадратов разностей эксперимента определялась по следующей зависимости:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i^{\text{теор}} - \bar{y}_i), \quad (3.5)$$

где:  $y_i^{\text{теор}}$  – значение  $i$ -ого теоретического параметра;

$\bar{y}_i$  – среднее значение параметра.

Теоретическая сумма квадратов разностей определялась как:

$$TSS = \sum_{i=1}^n (y_i^{\text{экс}} - \bar{y}_i), \quad (3.6)$$

где:  $y_i^{\text{экс}}$  – значение  $i$ -ого параметра согласно эксперименту;

$\bar{y}_i$  – среднее значение параметра.

Скорректированный коэффициент детерминации позволяет оценить значимость модели более точно:

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{(n - 1)}{(n - k)}, \quad (3.7)$$

где:  $n$  – количество наблюдений;

$k$  - количество регрессоров.

Далее вычислялась средняя квадратичная ошибка регрессии:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{\text{теор}} - y_i^{\text{эксп}})^2}{n - k}} \quad (3.8)$$

### **3.6. Методика экспериментального исследования взаимосвязи давления и расхода топлива в общей обратной магистрали с техническим состоянием ЭГФ**

В соответствии с общей методикой научного исследования, теоретические предпосылки, изложенные в разделе 2.3 и 2.4.1, нуждались в экспериментальной проверке. Перед проведением экспериментов на автомобиле, необходимо подтвердить рабочую гипотезу в более простом испытании. Первым шагом разработки методики экспериментального исследования взаимосвязи давления и расхода топлива в общей обратной магистрали с техническим состоянием ЭГФ, явились испытания на стенде. Целью данных работ была оценка адекватности математической модели по трём ключевым параметрам:

- цикловая подача;
- расход топлива на управление (калибровочное масло Shell, ISO 4113);
- вид и величина пульсаций давления в обратной магистрали стенда.

В результате данного этапа планировалось выявить влияние расхода топлива на управление цикловой подачей ЭГФ, на величину и вид пульсаций давления в обратной магистрали стенда. Испытания ЭГФ проводились на стенде С-МАХ 3000, в режиме, соответствующем режиму холостого хода

двигателя (LL), при длительности управляющего сигнала 300, 600, 900 мкс частоте 13,3 Гц и давлении 40, 70 и 100 МПа (рис. 3.8).

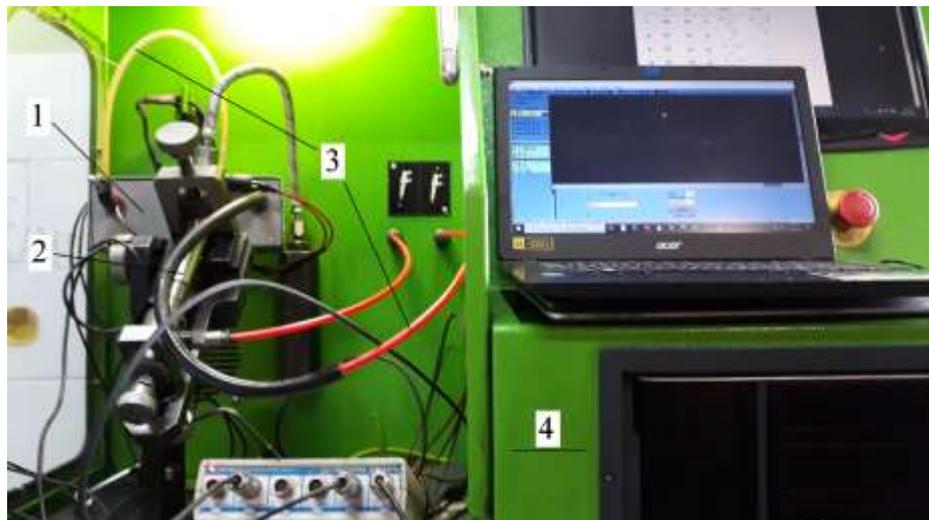


Рис. 3.8. Общий вид экспериментальной установки с устройством диагностики, подключенным в обратную магистраль стенда C-MAX 3000.

*1 - устройство диагностики; 2 - ЭГФ; 3 - обратная магистраль; 4 - стенд C-MAX 3000.*

Изношенный клапан камеры управления приводит к значительной утечке топлива в обратную магистраль, что рассмотрено математически в разделе 2.4.1. Такая утечка является статической, так как происходит, при отсутствии сигнала управления и закрытом клапане камеры управления, наряду с утечками через зазоры поршневой части запорной иглы и плунжера – мультипликатора.

Расход топлива в обратную магистраль, при открытом клапане камеры управления, является динамическим. В такой фазе работы ЭГФ, происходит снижение расхода через зазоры поршневой части запорной иглы и плунжера – мультипликатора, вследствие некоторого снижения давления в топливном кармане запорной иглы и в камере управления и увеличении длины их запорных сопряжений.

Для установления взаимосвязей между статической утечкой и динамическим расходом ЭГФ номинального и предельного технического состояния,

проведены испытания ЭГФ в режиме с сигналом управления и без сигнала управления, при давлении 40 и 100 МПа и длительности управляющего сигнала 300 – 900 мкс, с шагом 100 мкс. Полученные результаты стендовых испытаний приведены в разделе 4.2.1.

На режимах, с длительностью управляющего сигнала 300, 600, 900 мкс и давлении 40, 70, 100 МПа испытаний, исследуемых ЭГФ при измерении их выходных параметров, одновременно производилась фиксация показаний давления в обратной магистрали стенда. Итоги эксперимента приведены в разделе 4.2.

***Последовательность проведения стендового эксперимента:***

1. Подготовительные работы: установка, подключение АЦП, ПК, электрической части устройства диагностики.
2. Установка и электрическое подключение исследуемой ЭГФ номинального технического состояния.
3. Подключение гидравлической цепи питания и подачи: стенд – распылитель – стенд.
4. Подключение гидравлической цепи: форсунка – устройство диагностики – стенд.
5. Выбор тест – плана (LL).
6. Запуск АЦП, ПК, устройства диагностики.
7. Прокачка гидравлических цепей.
8. Запуск тест – плана и запись искомых параметров.
9. Завершение тест – плана и сохранение данных эксперимента.
10. Демонтаж исследуемой ЭГФ со стенда.
11. Повторение пунктов 1-10, кроме п. 5,6, для форсунок допустимого и предельного технического состояния.
12. Отключение и демонтаж оборудования.

Методика испытаний на автомобиле обеспечила построение взаимосвязей функционирования ЭГФ в стендовых и моторных условиях, проверку адекватности математической модели АТПС.

В описываемых испытаниях участвовал автомобиль «Газель-бизнес», конструкция топливоподающей системы которого обеспечивает необходимый доступ к элементам топливоподающей системы без разборочно-сборочных работ, нарушающих работоспособность двигателя (рис. 3.10.а).

Целью эксперимента на автомобиле, являлось выявление качественных и количественных отличий в картине изменения давления и расхода топлива, в общей обратной магистрали, у ЭГФ номинального, допустимого и предельного технического состояния, установленных в исследуемой ТПС. Итог данного испытания предполагал возможность определения ЭГФ предельного технического состояния в составе топливоподающей системы и, соответственно, её порядкового номера.

***Последовательность проведения эксперимента на автомобиле:***

1. Подготовка эксперимента: установка заранее проверенных ЭГФ номинального технического состояния на двигатель; подготовка и стендовая проверка одной ЭГФ предельного технического состояния, с известным расходом на управление; подключение и проверка гидравлических и электрических соединений устройства диагностики; проверка работоспособности подключенного оборудования, тестовый запуск.
2. Прогрев двигателя до рабочей температуры 80° С.
3. Измерение индивидуального и общего расхода топлива на управление ЭГФ, с помощью мерных ёмкостей (рис. 3.9). Сравнение полученных значений с параметрами расхода на управление ЭГФ номинального технического состояния. Исходное техническое состояние ЭГФ – номинальное.
4. Измерение и сохранение полученных данных о расходе и давлении топлива в общей обратной магистрали с помощью устройства диагностики.
5. Установка ЭГФ предельного технического состояния в первый ци-

лиандр, вместо ЭГФ номинального технического состояния.

6. Измерение индивидуального и общего расхода топлива на управление ЭГФ, с помощью мерных ёмкостей. Сравнение полученных значений расхода на управление цикловой подачей с параметрами по п.3 и п.5.

7. Измерение и сохранение полученных данных о расходе и давлении топлива в общей обратной магистрали с помощью устройства диагностики.

8. Возврат состава ЭГФ двигателя в исходное состояние по п.1.

9. Повторение операций по п.5, п.7 и п.8, для второго, третьего и четвёртого цилиндров.

10. Демонтаж оборудования, восстановление гидравлических соединений общей обратной магистрали.

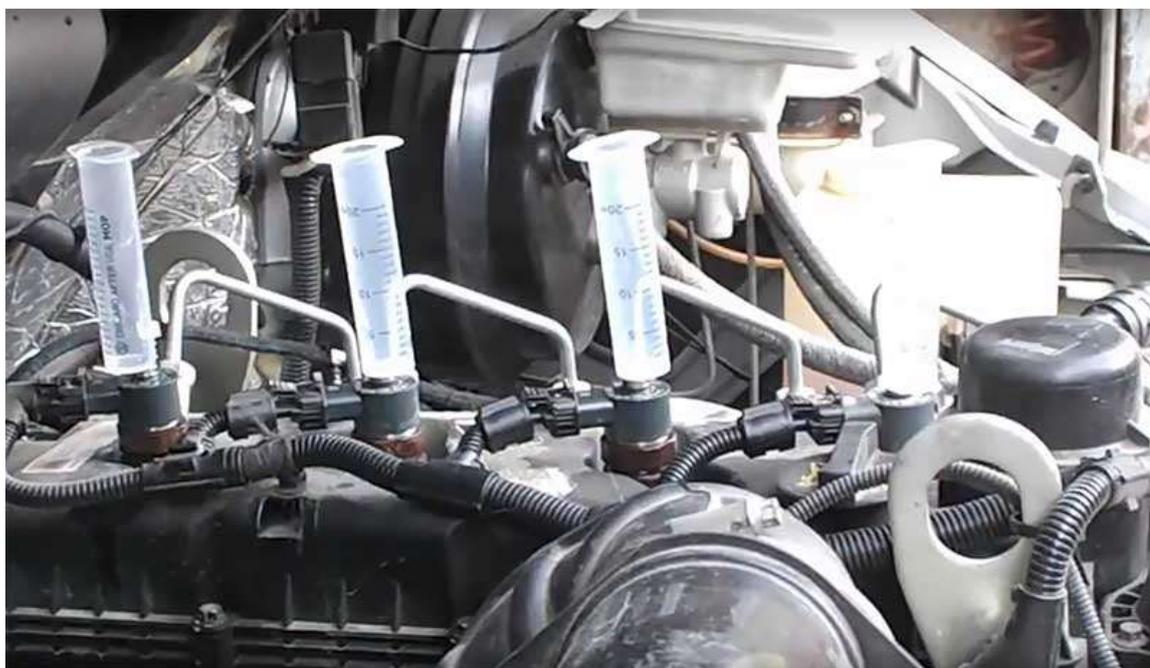


Рис. 3.9. Процесс измерения индивидуального расхода топлива на управление на автомобиле «Газель – бизнес», с двигателем Cummins ISF 2.8, с помощью мерных ёмкостей.

Для проверки разработанной методики, кроме автомобиля «Газель-бизнес», в испытаниях принимали участие другие марки автомобилей, например, KIA Sorento. Двигатель D4CB, был установлен на платформу, подключен к системам управления, питания, охлаждения и зарядки. Это обеспе-

чило его устойчивое функционирование, при проведении экспериментов (рис. 3.10.а, б).



а)

б)

Рис. 3.10. Общий вид экспериментальной установки:

а - на автомобиле Газель – бизнес; б - на двигателе D4CB KIA Sorento.

### **3.7. Оборудование для экспериментального исследования взаимосвязи давления и расхода топлива в общей обратной магистрали с техническим состоянием ЭГФ**

Тестовые режимы и измерение выходных показателей ЭГФ в ходе стендового эксперимента были обеспечены с помощью безмензурочного стенда С-МАХ 3000, описание и техническая характеристика которого дана разделе 3.4.1 и 3.4.2.

Согласно сформулированной во введении гипотезы и теоретических предпосылок в разделе 2.4, электрогидравлические форсунки, кроме цикловой подачи и расхода топлива на управление, имеют дополнительный диагностический параметр – давление топлива в обратной магистрали.

С целью контроля и выявления связи данного параметра, с техническим состоянием ЭГФ было разработано устройство для диагностики (УД) ЭГФ по давлению и расходу топлива в её обратной магистрали.

Устройство применялось при проведении испытаний на стенде для тестирования ЭГФ, на автомобиле, а также, на отдельно установленном для данных целей, двигателе.

### 3.7.1. Требования к оборудованию

Требования к системам измерения УД обусловлены пределами измерений величин, характером и типом получаемых данных [37, 102, 105].

Начальное давление в обратной магистрали стенда и автомобиля соответствует атмосферному  $p_{обр}^0 = 96$  кПа. Максимальное давление в указанных магистралях, возникающее в процессе функционирования ЭГФ, составляет  $p_{обр}^{max} = 200$  кПа. Измеряемое давление топлива зависит от массы топлива, находящегося в сливной магистрали за точкой измерения по ходу его движения, от длины и диаметра трубки. Так как минимальная длительность сигнала управления составляет 300 мкс, то и давление в обратной магистрали, при срабатывании ЭГФ, будет изменяться в соответствии с данным временным промежутком. Следовательно, система измерения давления должна обеспечить достаточную чувствительность при измерении в указанном временном диапазоне.

Расход топлива в общей обратной магистрали испытуемого автомобиля, в зависимости от технического состояния ЭГФ, может изменяться в пределах 0 – 300 мл/мин. Система измерения расхода топлива должна обеспечивать точность измерения, сопоставимую с точностью проведения данной операции, при помощи мерных ёмкостей.

### 3.7.2. Описание оборудования

Экспериментальные исследования взаимосвязи технического состояния ЭГФ, с расходом и давлением топлива в общей обратной магистрали проводились с использованием разработанного устройства диагностики [116]. Сигналы датчиков измерительного модуля выводились на экран ПК с помощью АЦП (рис. 3.11).

Экспериментальное УД включает системы измерения давления и расхода топлива и состоит из измерительного участка с датчиком расхода и датчиком давления топлива, переменного дросселя, устройства приёма и передачи данных AUTOSCOPE-IV, шины USB и персонального компьютера. Схема функционирования приборного комплекса представлена на рисунке 3.12.



Рис. 3.11. Вид сигналов датчиков систем измерения на экране монитора компьютера:

*1 – сигнал расхода топлива; 2 – сигнал управления ЭГФ 1-го цилиндра (индуктивный); 3 – сигнал давления.*

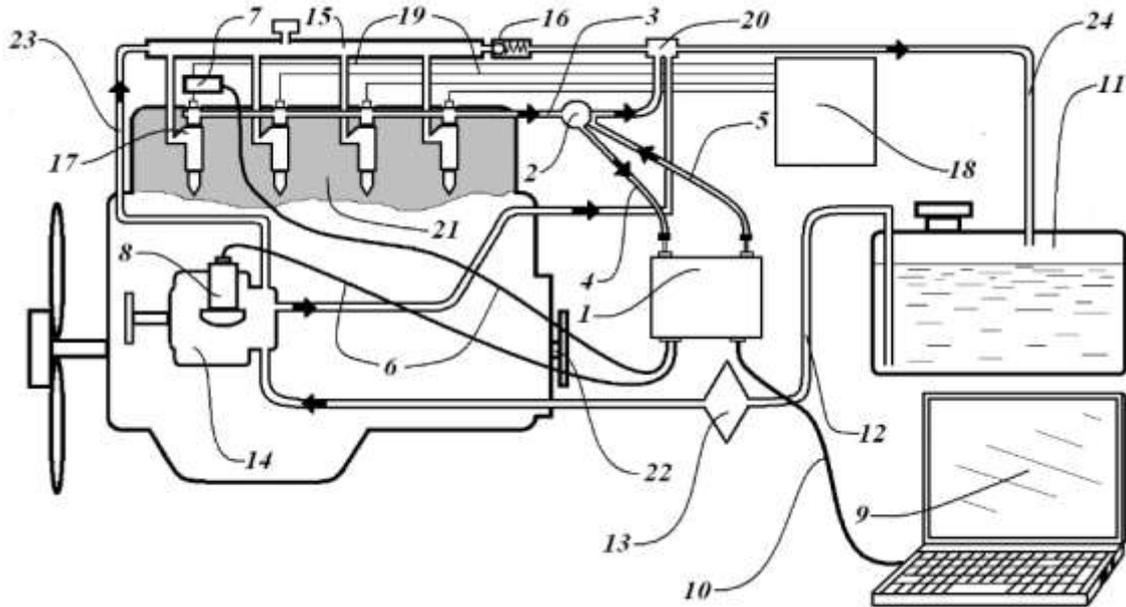


Рис. 3.12. Функциональная схема устройства диагностики ЭГФ по общей обратной магистрали, из патента РФ №2672992 [119], [Приложение 1].

1 - измерительный блок; 2 - соединение с общей обратной магистралью; 3 - общая обратная магистраль; 4 - входная трубка; 5 - сливная трубка; 6 - кабели дополнительных устройств; 7 - датчик синхронизирующего импульса; 8 - регулятор высокого давления; 9 - ПК; 10 - шина USB; 11 - топливный бак; 12 - подающая магистраль; 13 - топливный фильтр; 14 - топливный насос высокого давления; 15 - аккумулятор давления топлива; 16 - предохранительный клапан; 17 - форсунка; 18 - блок управления двигателем; 19 - проводка; 20 - соединитель; 21 - двигатель; 22 - коленчатый вал; 23 - магистраль высокого давления.

Структурная схема приборного комплекса, в составе топливоподающей системы, представлена на рисунке 3.13.

Основным компонентом разработанного устройства диагностики является измерительный модуль (рис. 3.14). Способ измерения и устройство для его осуществления защищены патентом Российской Федерации №2672992 [119], [Приложение 1].

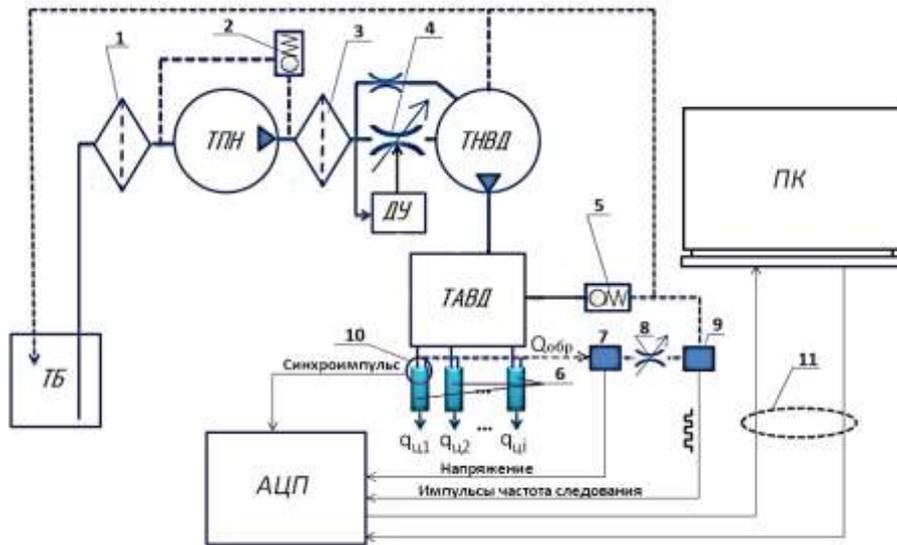


Рис. 3.13. Структурная схема устройства диагностики в составе ТПС:  
 1 – топливный фильтр; 2 – редукционный клапан; 3 – фильтр тонкой очистки; 4 – дозирующее устройство; 5 – предохранительный клапан; 6 – ЭГФ; 7 – датчик давления топлива; 8 – подстроечный дроссель; 9 – датчик расхода топлива; 10 – индуктивный датчик; 11 – шина USB.



Рис.3.14. Внешний вид измерительного модуля устройства диагностики (УД).

В качестве средства измерения давления топлива в обратной магистрали использован датчик давления фирмы DENSO 89420-32040 (Япония), с пределами измерений 5 – 250 кПа (рис. 3.15). Датчик включает измерительную камеру с тензометрическим мостом и преобразователь напряжения.



Рис. 3.15. Внешний вид датчика давления устройства диагностики.

Исходя из требований к системе измерения расхода топлива, в качестве средства его измерения выбран датчик расхода жидкостей Microstream OF05ZAT, Япония (Рис. 3.16. а, б). Датчик функционирует следующим образом: поток жидкости приводит в движение овальные шестерни, за один оборот которых через датчик проходят равные объёмы жидкости, вращение шестерён считывается датчиком на эффекте Холла, расположенным в крышке корпуса. Измеренный объём жидкости определяется количеством полученных импульсов.



а)



б)

Рис. 3.16. а) Внешний вид датчика расхода топлива Microstream OF05ZAT; б) Вид датчика Microstream OF05ZAT со снятой крышкой.

Таблица 3.1. Технические характеристики датчика расхода жидкостей  
Microstream OF05ZAT

| Параметр                                   | Значения для датчика                          |
|--|---|
|  | Microstream OF05ZAT                           |
| 1  | 2   |
| Измеряемые жидкости                        | Вода, керосин, легкое масло, мазут            |
| Точность (стандартное положение установки) | $\pm 2\%$                                     |
| Максимальное рабочее давление              | 0.5МПа (при относительной влажности 35 ~ 85%) |
| Максимальная потеря давления, кПа          | 4   |
| Температура окружающей среды               | -10 до 70 °С                                  |
| Импульсный блок                            | 0,46 мл/имп                                   |
| Напряжение питания                         | 3В - 24В постоянного тока                     |
| Выходной сигнал                            | Импульс напряжения (1-10В)                    |

Приём обработка и передача данных измерительного модуля, в процессе экспериментов, осуществлялась с помощью АЦП «AUTOSCOPE-IV» (рис. 3.17).



Рис. 3.17. Внешний вид АЦП «AUTOSCOPE-IV»

Характеристики АЦП «AUTOSCOPE-IV»:

- режим аналогового осциллографа;
- количество аналоговых входов 8;
- разрешение АЦП 12 бит;
- диапазон измеряемого напряжения  $\pm 6 / 30 \text{ V}$  - 1-4й аналоговые входы;
- $\pm 60 / 300 \text{ V}$  - 5-6 й аналоговый вход;
- 1-4 й аналоговые входы при использовании внешних входных делителей напряжения 1:10;

- максимальная частота оцифровки на канал в одно - канальном режиме - 12,5 MHz;
- в 2-х канальном режиме - 5,0 MHz;
- в 4-х канальном режиме - 2,5 MHz;
- в 8-ми канальном режиме - 1,25 MHz;
- режим оцифровки непрерывный поток;
- входное сопротивление 1 МΩ.

Прибор обеспечивает непрерывный режим оцифровки и передачи данных в компьютер. USB Autoscope IV работает под управлением программы USB Осциллограф.

Запись и обработка полученных данных производилась персональным компьютером (ПК).

Сигнал управления ЭГФ, генерируемый ЭБУ двигателя, используемый для синхронизации процесса измерений, фиксировался с помощью индуктивного датчика тока, входящего в комплект АЦП «AUTOSCOPE-IV».

Для измерения индивидуального расхода топлива на управление цикловой подачей ЭГФ, использовались градуированные емкости медицинских шприцев, объемом 20 мл. Данный способ имеет преимущество, вследствие отсутствия у мерных ёмкостей длинных соединительных трубок с ЭГФ, что значительно повышает точность измерения и сокращает его время, особенно при малых расходах топлива на управление цикловой подачей у форсунок номинального технического состояния.

### **3.8. Методика тарировки систем измерения**

Тарировка системы измерения давления и системы измерения расхода топлива осуществлялась с помощью мензурочного стенда, (рис. 3.18). Тарировка системы измерения давления производилась при закрытом дросселе устройства диагностики.

Для получения тарировочной характеристики значения давления

назначались ступенчато, причем как в режиме нарастания, так и убывания, в случайном порядке. Значение давления контролировалось, после установки давления стендом, по образцовому лабораторному манометру. Электрический сигнал в виде напряжения поступал на вход АЦП. Повторение тарировочной процедуры производилось не менее 3х раз. В результате тарировки системы измерения давления получена зависимость (рис. 3.19).



Рис. 3.18. Процесс тарировки системы измерения давления и расхода топлива на мензурочном стенде стенде Technopart 12 PSB.

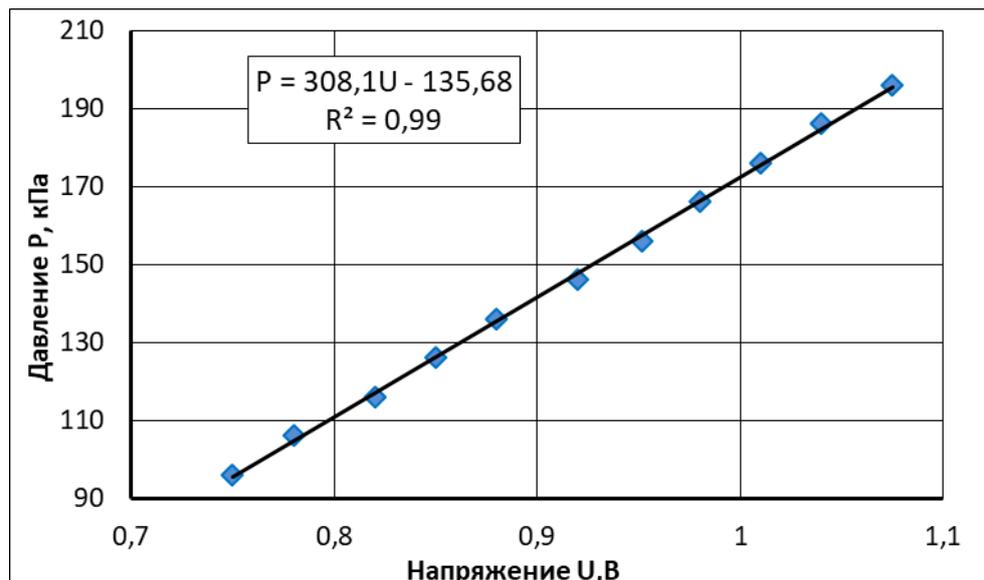


Рис. 3.19. Тарировочный график системы измерения давления топлива.

Тарировка системы измерения расхода топлива с датчиком на овалных шестернях так же выполнялась на мензурочном стенде (рис. 3.18). Через датчик, при изменении подачи на каждом измерении, подавалось количество дизельного топлива, объем которого измерялся с достаточно высокой точностью. Для этого была использована мерная лабораторная емкость объемом 0.5 л.

Подача увеличивалась с минимального (1-й шаг), до близкого к максимальному (6-й шаг), предела измерения датчика расхода топлива, в количестве 6 шагов измерений. В результате, время наполнения мерных ёмкостей уменьшалось, при этом количество импульсов от датчика расхода топлива оставалось практически неизменным. Полученная тарировочная характеристика имеет вид линейной зависимости (рис. 3.20).

Прямоугольные импульсы датчика расхода топлива, на выбранном участке, подсчитывались прибором «AUTOSCOPE-IV». Для этой цели был написан встраиваемый скрипт [приложение 2].

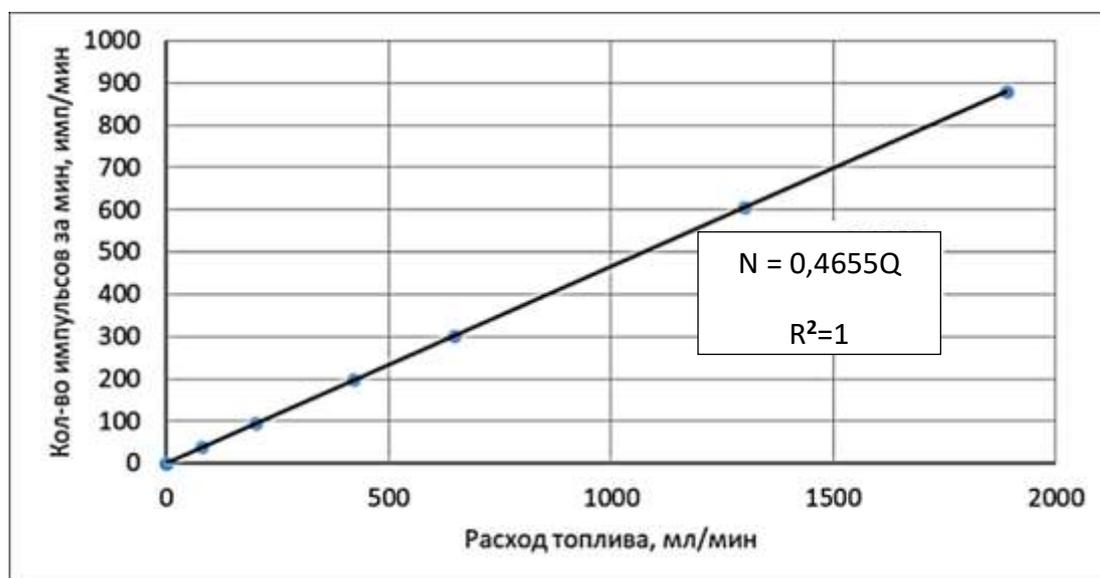


Рис. 3.20. Тарировочный график системы измерения расхода топлива.

Обработка сигнала датчика угловых меток производилась следующим образом (рис. 3.21). Для исследуемого сигнала, определялись одноименные фронты, например, передние А и Б. Конечная точка прямого фронта Б является

начальной позицией для расчета следующего импульса. Форма сигнала между двумя одноименными его фронтами называется периодом сигнала.

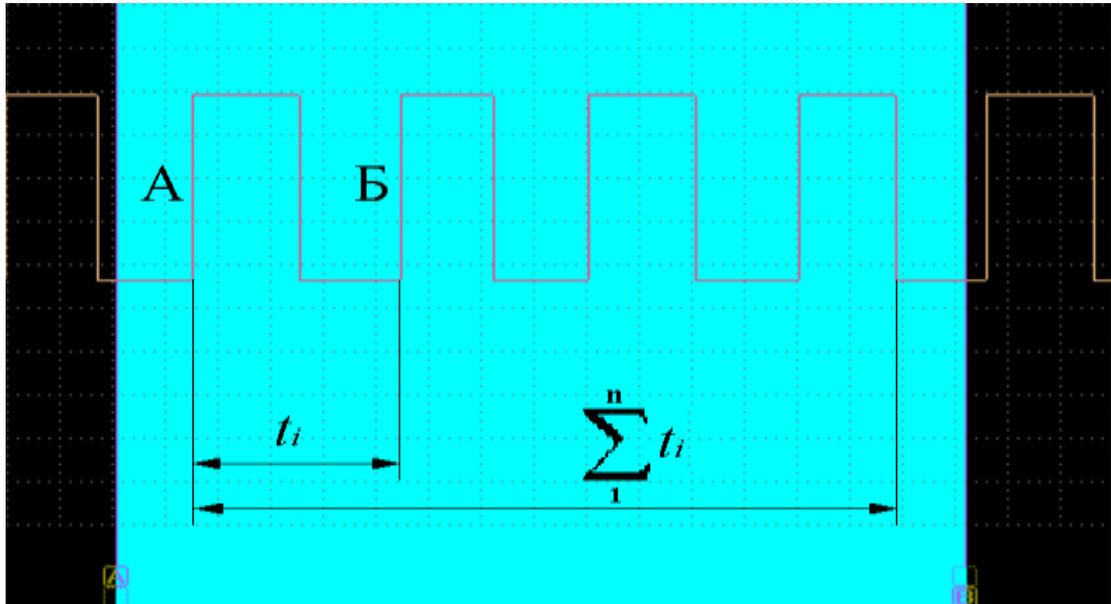


Рис. 3.21. Вид сигнала от датчика расхода топлива на мониторе ПК.

Время прохождения двух фронтов определяется с учетом частоты опроса канала:

$$t_i = \frac{pos_B - pos_A}{\nu} \quad (3.9)$$

где:  $pos_A$  и  $pos_B$  – положение передних фронтов А и Б соответственно;

$\nu$  – частота опроса канала, Гц.

Выражение для вычисления расхода топлива, проходящего через датчик, выглядит следующим образом (л/ч) [44, 92]:

$$Q_{пр} = 3600 \cdot \frac{Z_{ni}}{k_{пр} \cdot t_i} \quad (3.10)$$

где:  $Z_{ni}$  – количество импульсов, имп;

$k$  – калибровочное значение, имп/ л;

$t_i$  – время прохождения  $Z_{ni}$ , с.

### 3.9. Методика обработки диагностического сигнала давления в обратной магистрали.

В соответствии с задачами исследования, обработка сигнала давления имеет ключевое значение, при формировании оценки технического состояния ЭГФ, функционирующей в составе топливоподающей системы.

Техническое состояние каждой форсунки в АТПС, характеризует динамическая составляющая давления в общей обратной магистрали. Параметры, используемые при обработке сигнала давления, представлены на рисунке 3.22.

Для расчета численных показателей, соответствующих каждой ЭГФ, определяли площадь, ограниченную линией графика давления на участке времени  $t_i$ , относительно линии среднего давления  $p_i$ , принятой за ось  $x$ .

$$S_i = \int_0^{t_i} [p] dx \quad (3.11)$$

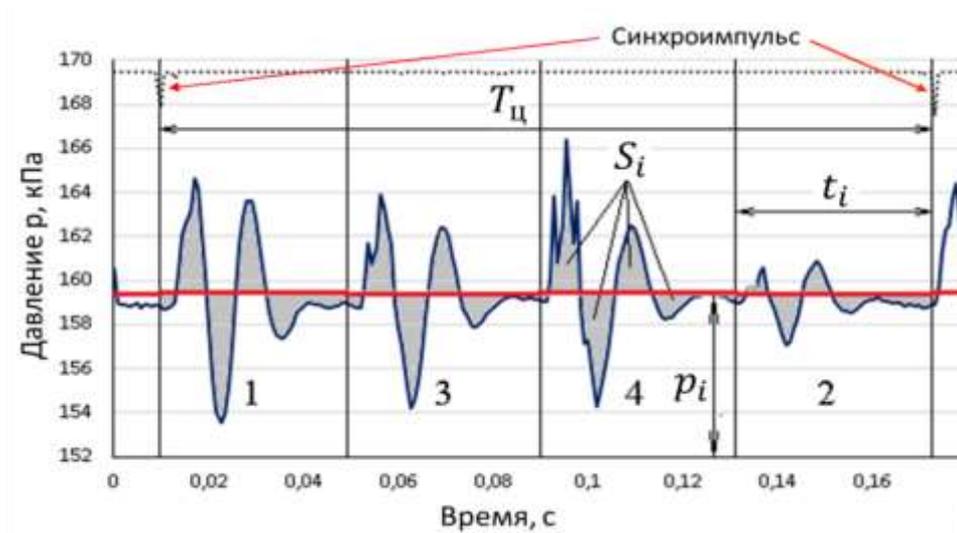


Рис. 3.22. Пример обработки сигнала давления топлива в общей обратной магистрали.

На графике (рис. 3.22), указаны следующие параметры:

-  $T_{ц}$  — участок времени, синхронизированный с полным циклом работы двигателя, соответствующий порядковому срабатыванию всех цилиндров, состоящий из участков  $t_i$ ;

- $t_i$  – участок времени, синхронизированный со срабатыванием каждой ЭГФ на участке времени  $T_{ц}$ ;
- $p_i$  – среднее давление на участке времени  $t_i$ ;
- $S_i$  – площадь, ограниченная графиком давления, относительно линии среднего давления  $p_i$  на участке времени  $t_i$ .

Найденные значения  $S_i$  использовались для расчёта индивидуального расхода топлива на управление. Обоснование площади  $S_i$ , как диагностического параметра и порядок вычислений приведены в пункте 4.3 научно-квалификационной работы.

### 3.10. Методика оценки погрешности эксперимента

Экспериментальные исследования должны быть эффективными. Количество требуемых данных необходимо получить минимальным, но достаточным количеством проведённых экспериментов. Одной из основных характеристик измерений является погрешность. Различают две составляющих погрешности измерений: инструментальную и методическую. Первая обусловлена точностью применяемых средств измерений. Кроме этого, необходимо различать абсолютную, относительную и приведенную погрешности [14, 106, 109].

Абсолютной погрешностью  $\Delta$  измерений называется разность между показаниями прибора  $X$  и истинным значением  $X_{и}$  (или приборов высшей точности) измеряемой величины [14, 106, 109].

$$\Delta = X - X_{и} \quad (3.12)$$

Относительная погрешность  $\delta$  представляет собой выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к истинному значению величины [14, 106, 109].

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{и}} \cdot 100\% \quad (3.13)$$

Приведенная погрешность равна выраженному в процентах отношению абсолютной погрешности к нормирующему значению [14, 106, 109].

$$\psi = \frac{\Delta}{X_{н}} \cdot 100\% \quad (3.14)$$

Метрологические характеристики средств измерений предлагаемого компьютерного комплекса определяются погрешностями первичных преобразователей (давления, частоты вращения, силы тока), а также погрешностями аналогово – цифрового преобразования. В качестве основных погрешностей измерений исследуемых параметров, выполненных на основе аналогово – цифрового преобразования  $\Delta_{ст}$  мы выделили: погрешность, связанная со смещением нуля; погрешность, связанная с нелинейностью квантования; погрешность коэффициента усиления; погрешность квантования, температурная погрешность. Кроме этого, необходимо учитывать и динамические погрешности  $\Delta_{дин}$ , связанные с частотой опроса (дискретизации) измеряемых сигналов и погрешность, связанная с временной неопределенностью момента начала отсчета.

Суммарная погрешность может быть найдена как [14, 106, 109]:

$$\Delta_{\varepsilon} = \Delta_{ст} + \Delta_{дин} \quad (3.15)$$

Дисперсия суммарной погрешности рассчитывается, как сумма дисперсий статической  $\sigma_{ст}^2$  и динамической  $\sigma_{дин}^2$  погрешностей [14]:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \sigma_{ст}^2 + \sigma_{дин}^2 \quad (3.16)$$

Среднеквадратическое значение оценки погрешности находится из выражения [109]:

$$\sigma_{\Delta} = \frac{\sigma_{\Delta i}}{\sqrt{n}} \quad (3.17)$$

В свою очередь:

$$\sigma_{\Delta i} = \sqrt{\frac{\sigma_0^2 + \sigma^2}{m}}, \quad (3.18)$$

где:  $\sigma_0^2$  – дисперсия образцового сигнала;

$m$  – объём выборки.

Стабильность диагностического параметра можно оценить с помощью среднеквадратичного отклонения его величины:

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Pi_i - \bar{\Pi})^2}{n-1}}, \quad (3.19)$$

где:  $\Pi_i$  – текущее значение диагностического параметра;

$\bar{\Pi}$  – среднее значение диагностического параметра.

### 3.11. Методика планирования экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования являются важнейшим этапом научно – квалификационной работы и, как правило, связаны с затратами материальных средств и времени. Существуют методики, направленные на оптимизацию и повышение эффективности экспериментального процесса. Поскольку фактические значения измеряемых параметров, при экспериментальных исследованиях зависят от многих случайных факторов (фоновых помех в измерительных системах, сбоев в питании и т. д.), то одной из основных задач является установление необходимого и достаточного объема испытаний.

Чтобы определить достаточное количество экспериментов и получения достоверных значений исследуемых параметров, используем метод проверки статистических гипотез [14, 38, 107, 114]. Этот метод основан на предположении о том, что в конце проведения каждого последующего эксперимента будет выполнено условие:

$$\delta_M \geq \varepsilon, \quad (3.20)$$

где:  $\varepsilon$  - среднеквадратическое отклонение наблюдаемых параметров;

$\delta_M$  – заданный уровень погрешности, который определим по формуле:

$$\delta_M = \beta \cdot \bar{U}, \quad (3.21)$$

где:  $\beta$  – коэффициент, учитывающий долю погрешности относительного среднего значения измеряемого в процессе эксперимента параметра  $\bar{U}$ ,  $\beta = 0,05$ .

Среднее значение измеряемого параметра, в свою очередь, определим из выражения:

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i, \quad (3.22)$$

где:  $\sum_{i=1}^n U_i$  – сумма значений измеряемого параметра при  $n$  измерениях;  
 $n$  – количество выполненных измерений.

Дисперсия измеренных экспериментальных параметров определим из выражения:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{U} - U_i)^2, \quad (3.23)$$

Среднеквадратическое отклонение наблюдаемых параметров вычислим по формуле:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot t(\gamma, n - 1) \cdot \sigma, \quad (3.24)$$

где:  $\gamma$  – доверительная вероятность;

$t$  – коэффициент, определяемый по таблицам распределения Стьюдента (при  $\gamma = 0,95$  и малом количестве проведенных испытаний,  $n \leq 4$ ).

Определение числа необходимых (опытов) в рамках данного экспериментального исследования согласно данной методике выполним в следующем порядке:

1. Проведём  $n$  (опытов) экспериментального исследования.
2. Определим статистические параметры:  $\delta_m, \bar{U}, \sigma, \varepsilon$ , по выражениям (3.20 - 3.24).
3. Проверим выполнение условий (3.20).

Если условие (3.20) не выполняется, проводятся дополнительные экспериментальные исследования.

### 3.12. Методика оценки адекватности математической модели

Адекватность разработанной математической модели оценивалась по методике предложенной В.М. Лившицем, в дальнейшем усовершенствованной проф. А.И. Федотовым [109]. При этом, на первом этапе производились экспериментальные исследования по вышеизложенным методикам, с регистрацией  $n$ -го количества осциллограмм процессов  $y(j)$ .

Затем, для каждой точки  $j$  подсчитывались среднее значение  $\bar{y}[j]=M\{y[j]\}$  и дисперсия  $D\{y[j]\}$  погрешностей измерений. На втором этапе рассчитывались две независимые оценки средней дисперсии измерений  $S_1^2$  и  $S_2^2$ . Первая оценка средней дисперсии измерений определялась по формуле [109]:

$$S_A^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n D[y(j)] \quad (3.25)$$

Степень свободы дисперсии  $S_A^2$  равна  $k_1 = n - 1$ .

Затем определялась вторая оценка средней дисперсии измерений по формуле [109]:

$$S_B^2 = \frac{1}{n-m} \cdot \sum_{j=1}^n [y(j) - y^m(j)]^2, \quad (3.26)$$

где:  $y(j)$  и  $y^m(j)$  - соответственно одна реализация экспериментального исследования процесса и результат расчета по модели;

$m$  - количество оцениваемых коэффициентов модели;

степень свободы дисперсии  $S_B^2$  равна  $k_2 = n - m$ .

Соответствие двух независимых значений, рассчитанных по формулам (3.24) и (3.25) оценивалось по критерию Фишера. Различие экспериментальных и расчетных значений признавалось не существенным, если выполнялось неравенство [14, 109]:

$$\frac{S_A^2}{S_B^2} < F_{1-a}(f_1, f_2), \quad (3.27)$$

где:  $\alpha$  - заданный уровень значимости;

$f_1$  - число сравниваемых групп;

$f_2$  - число усредняемых величин.

Если в результате проверки идентификации математической модели окажется, что различие между расчетными и экспериментальными данными существенно, это свидетельствует о неадекватности модели и ее необходимо уточнять.

### 3.13. Выводы по третьей главе

1. Методика планирования и обработки результатов эксперимента обеспечила оптимизацию экспериментальных исследований на основе статистических расчетов. Методика позволила определять минимальное число испытаний  $n_{и}$ , дающее необходимую точность проводимым экспериментальным исследованиям.

2. На основе разработанных методик экспериментальных исследований сформулированы необходимые и достаточные требования к применяемому исследовательскому оборудованию, как серийному, так и разработанному самостоятельно.

3. Метрологический анализ систем измерения позволил заключить, что исследовательское оборудование обеспечивает регистрацию и обработку сигналов с достаточной для достижения требуемой цели точностью:

- приведенная результирующая погрешность аналого-цифрового преобразования, не более 0,1%;
- абсолютная погрешность измерения времени, не более  $3 \cdot 10^{-5}$  с;
- приведенная погрешность измерения цикловой подачи и расхода топлива на управление в стендовых условиях, не более 0,5%.
- относительная погрешность системы измерения расхода топлива на автомобиле 3,8%;
- относительная погрешность системы измерения давления топлива 1,3%.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной главе выполнена проверка теоретических предпосылок метода контроля технического состояния электрогидравлических форсунок по расходу и давлению топлива в общей обратной магистрали автомобиля. На основе методик исследований, описанных в третьей главе, приведены результаты математического моделирования функционирования ЭГФ, при износе клапана камеры управления и изменении её технического состояния.

Приведены результаты, описывающие влияния технического состояния форсунок на параметры расхода и давления топлива в общей обратной магистрали. По итогам сравнения аналитических исследований с экспериментальными, дана оценка адекватности разработанных математических моделей исследуемых процессов.

Выявлены диагностические параметры, дающие возможность получения количественной оценки технического состояния ЭГФ, по показателям расхода и давления топлива в общей обратной магистрали аккумуляторной топливоподающей системы.

Получены зависимости  $Q = f(p_{обр})$ , являющиеся основой разработанного эффективного метода контроля технического состояния электрогидравлических форсунок.

### **4.1. Оценка адекватности математической модели процесса функционирования автомобильной электрогидравлических форсунок дизельного двигателя при износе управляющего клапана в условиях эксплуатации**

Адекватность математической модели ЭГФ оценивалась, следуя методике, приведённой в разделе 3.12. Расчет параметров процесса функционирования ЭГФ номинального и предельного технического состояния, произво-

дился на основе математической модели, представленной во второй главе диссертации.

Исходные данные для математической модели найдены с учётом модели процесса функционирования на основе структурной схемы ЭГФ, представленной в разделе 2.1. Физические параметры и свойства элементов конструкции ЭГФ, найденные с помощью известных методов измерений, описанных в разделе 3.3 третьей главы, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Структурные параметры исследуемой ЭГФ BOSH 0445110376

| №  | Параметр   | Значение |
|----|--|----------|
| 1  | Диаметр распыляющих отверстий $d_{расп}$ , мм                | 0,16     |
| 2  | Количество распыляющих отверстий,                            | 7        |
| 3  | Жесткость пружины распылителя $c_2$ , Н/мм                   | 30       |
| 4  | Жесткость пружины клапана $c_1$ , Н/мм                       | 50       |
| 5  | Диаметр дополнительного жиклера, мм                          | 0,226    |
| 6  | Диаметр сливного жиклера $d_{слив}$ , мм                     | 0,261    |
| 7  | Диаметр иглы $d_{иг}$ , мм                                   | 4        |
| 8  | Диаметр штока мультипликатора $d_{мульти}$ , мм              | 4,3      |
| 9  | Характерный диаметр иглы $d_{хар\ иг}$ , мм                  | 2,13     |
| 10 | Зазор в паре игла - корпус распылителя $\delta_{иг}$ , мкм   | 3        |
| 11 | Зазор в паре клапан - мультипликатор $\delta_{мульти}$ , мкм | 3        |
| 12 | Диаметр шарика $d_{шар}$ , мм                                | 1,5      |
| 13 | Масса подвижной части клапана, г                             | 10       |
| 14 | Масса подвижных частей иглы и мультипликатора, г             | 17       |

В математической модели использованы значения давления, создаваемого в аккумуляторе: от  $p_{ак} = 40$  МПа, до,  $p_{ак} = 100$  МПа, с шагом 30 МПа.

Длительность сигнала управления изменяется: от  $\tau_e = 300$  мкс, до  $\tau_e = 900$  мкс, с шагом 100 мкс, температура тестовой жидкости стенда  $40^\circ$  (рис.4.1).

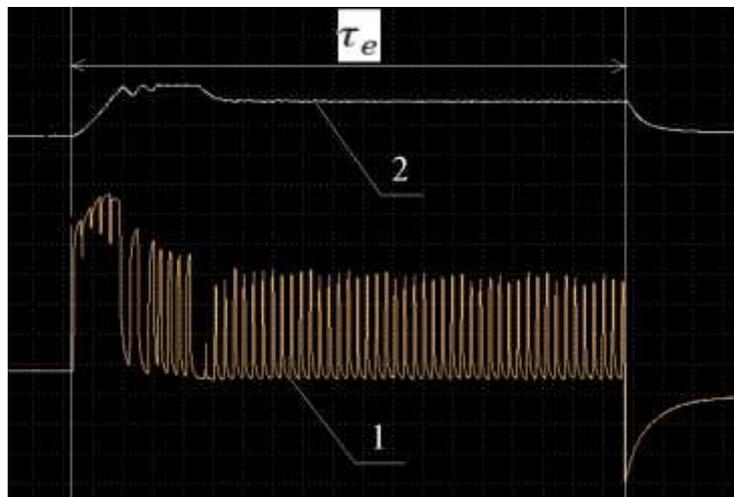


Рис. 4.1. Вид сигнала управления, генерируемого стендом, С-МАХ 3000: 1 - ШИМ тока сигнала; 2 - напряжение сигнала;  $\tau_e$ , мкс – продолжительность сигнала управления.

С целью проверки адекватности математической модели были проведены экспериментальные исследования процесса функционирования ЭГФ в стендовых условиях, методика которых описана в пункте 3.2. Данный этап экспериментального исследования преследовал цель получения функциональных зависимостей цикловой подачи  $q$  и расхода на управление  $Q$ , для форсунок номинального и форсунок предельного технического состояния, при изменении управляющих параметров, таких как давление тестовой жидкости  $p_{ак}$  и длительность электрического сигнала управления  $\tau_e$ .

Для проведения данного экспериментального исследования были выбраны электрогидравлические форсунки BOSCH 0445110376, двигателя Cummins isf 2.8, в количестве 4 ЭГФ номинального технического состояния и 4 ЭГФ предельного технического состояния. С целью идентификации технического состояния в эксперименте, группам форсунок были присвоены порядковые номера.

Группа №1 - ЭГФ номинального технического состояния.

Группа №2 - ЭГФ предельного технического состояния.

В результате проведения экспериментального исследования, были получены значения цикловой подачи  $q$  и расхода на управление  $Q$ , для каждой из форсунок номинального и предельного технического состояния, при заданных управляющих параметрах.

По средним значениям полученных данных, были построены сравнительные графики расчёт - эксперимент. Полученные результаты представлены функциональными зависимостями вида:  $q = f(p_{ак}, \tau_e)$ ,  $Q = f(p_{ак}, \tau_e)$ , в том числе, при  $\tau_e = 0$  и  $q = 0$ , для номинального и предельного технического состояния ЭГФ (рис. 4.2 – 4.3).

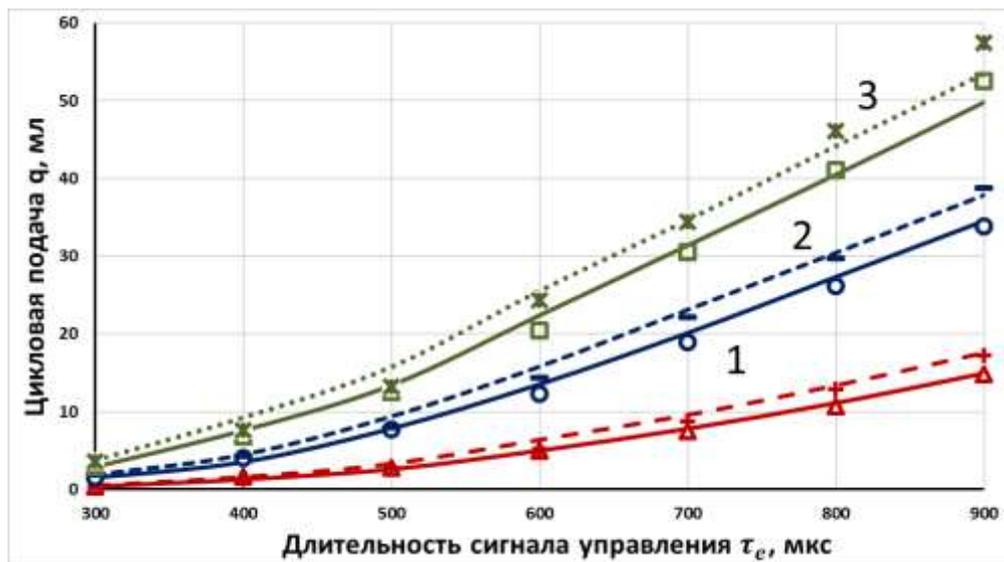


Рис. 4.2. График зависимости цикловой подачи от длительности сигнала управления  $\tau_e$ , мкс и давления тестовой жидкости (1 - 40 МПа, 2 - 70 МПа, 3 - 100 МПа):

*сплошные линии - номинальное техническое состояние расчёт; маркеры-фигуры - номинальное техническое состояние эксперимент; прерывистые линии - предельное техническое состояние расчёт; маркеры-значки - предельное техническое состояние эксперимент.*

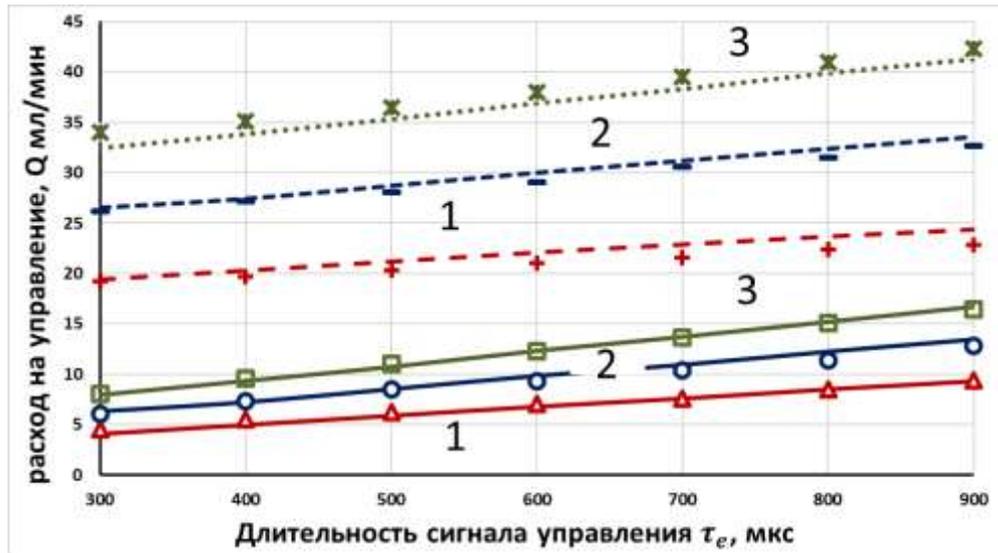


Рис. 4.3. График зависимости расхода топлива на управление от длительности сигнала управления  $\tau_e$ , мкс и давления тестовой жидкости (1 - 40 МПа, 2 - 70 МПа, 3 - 100 МПа):

*сплошные линии - номинальное техническое состояние расчёт; маркеры-фигуры - номинальное техническое состояние эксперимент; прерывистые линии - предельное техническое состояние расчёт; маркеры-значки - предельное техническое состояние эксперимент.*

На следующем этапе, опираясь на проведённые экспериментальные исследования и полученные аналитические зависимости, при использовании формул (3.24) и (3.25) вычисляли значения дисперсии адекватности  $S_A$  и воспроизводимости  $S_B$ , затем рассчитывали значения  $F$ - критерия Фишера [14, 109]. Расчётные значения сравнивали с табличными, при уровне значимости 5% (табл. 4.2).

Таблица 4.2. Сравнение показателей критерия Фишера

| Зависимость                   | Значение F - критерия |           |
|-------------------------------|-----------------------|-----------|
|                               | расчётное             | табличное |
| $q=f(\mu f_{\Sigma}, \tau_e)$ | 1                     | 1,57      |
| $Q=f(\mu f_{\Sigma}, \tau_e)$ | 1,06                  | 1,51      |

Сравнение полученных показателей, с учётом формулы (3.27), указывает на то, что математическая модель адекватно описывает процесс формирования цикловой подачи и расхода на управление электрогидравлической форсунки при изменении её технического состояния.

Параметры математической модели, адекватно описывающей функционирование ЭГФ в стендовых условиях, были перенесены в математическую модель АТПС, со следующими изменениями:

- тестовую жидкость на дизельное топливо;
- температура топлива от 40° С до 75° С;
- длительность управляющего импульса от 300 мкс (предвпрыск) до 500 – 900 мкс (основной впрыск).

Результаты, полученные экспериментальным и аналитическим путём, имеют вид функциональной зависимости:  $P = f(T_{ц})$  (рис. 4.4, 4.5), где  $T_{ц}$  – время полного цикла четырёхтактного двигателя, соответствующее двум оборотам коленчатого вала (пункт 3.9).

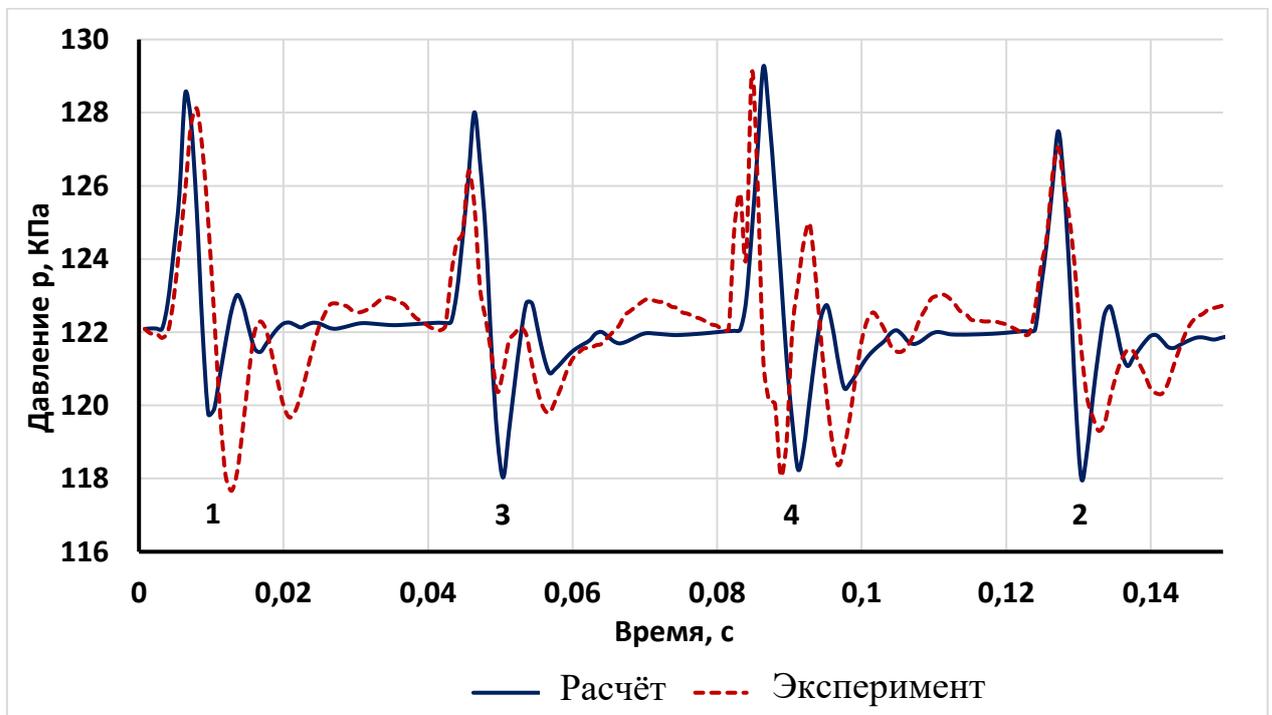


Рис. 4.4. Графики изменения давления в общей обратной магистрали при форсунках номинального технического состояния.

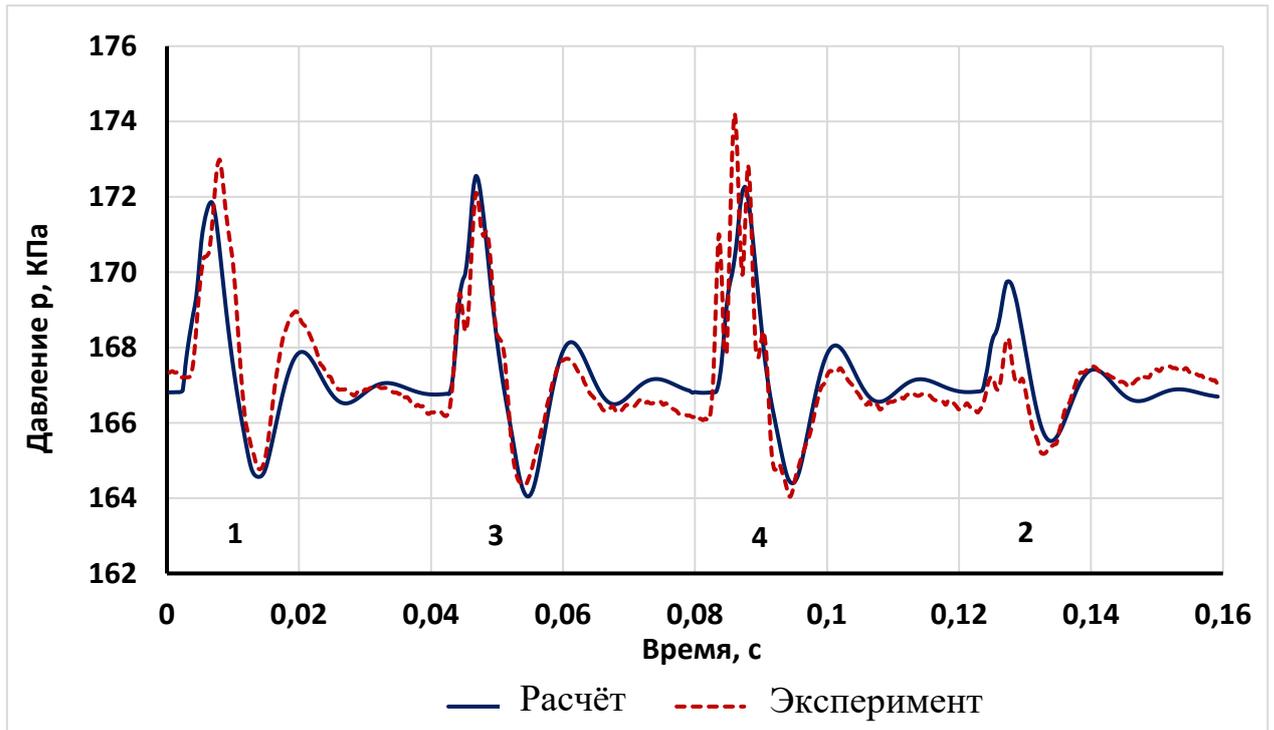


Рис 4.5. Графики изменения давления в общей обратной магистрали при установке ЭГФ предельного технического состояния на 2-м цилиндре.

Сравнение графиков изменения зависимостей давления в общей обратной магистрали АТПС автомобиля показывает удовлетворительную сходимость расчётных и экспериментальных показателей, как в случае с ЭГФ номинального технического состояния (рис. 4.4), так и в случае с ЭГФ предельного технического состояния на одном из цилиндров (рис. 4.5).

Время затухания характерных колебаний давления, вызванных срабатыванием ЭГФ при функционировании в составе ТПС автомобиля (рис. 4.5, 4.4) и на стенде (рис. 4.11, 4.13), схожи и имеют продолжительность 0,03с.

При слиянии потоков топлива в общей обратной магистрали автомобиля, определяющим фактором, влияющим на номинал динамического давления (возникающего, при изменении скорости потока топлива), является первая производная скорости их скорости  $v'$ .

#### 4.2. Результаты исследования закономерностей изменения расхода топлива на управление, давления в общей обратной магистрали и цикловых подач электрогидравлических форсунок от износа управляющего клапана

В соответствии с теоретическими предпосылками, изложенными в пункте 2.4, проводилось аналитическое исследование процесса функционирования ЭГФ для режимов холостого хода с давлением в аккумуляторе стенда  $p_{ак} = 40$  МПа и  $p_{ак} = 100$  МПа. По результатам регрессионной модели процесса формирования цикловой подачи топлива и расхода топлива на управление форсунки двигателя ISf 2.8 Cummins, построены поверхности отклика, отражающие зависимость данных функциональных параметров, от площади неплотностей посадки клапана камеры управления (рис. 4.6 – 4.9) [115]. Параметрическая аппроксимация полученных данных в программной среде MatLAB, позволила получить регрессионную зависимость, описывающую изменение цикловой подачи, для рассматриваемого диапазона управляющих параметров.

$$q=f(\mu f_{\Sigma}, \tau_e)=1,391 - 0,01144 \cdot \tau_e - 327,5 \cdot \mu f_{\Sigma} + 2.819e-05 \cdot (\mu f_{\Sigma})^2 + 1,218 \mu f_{\Sigma} \cdot \tau_e \quad (4.1)$$

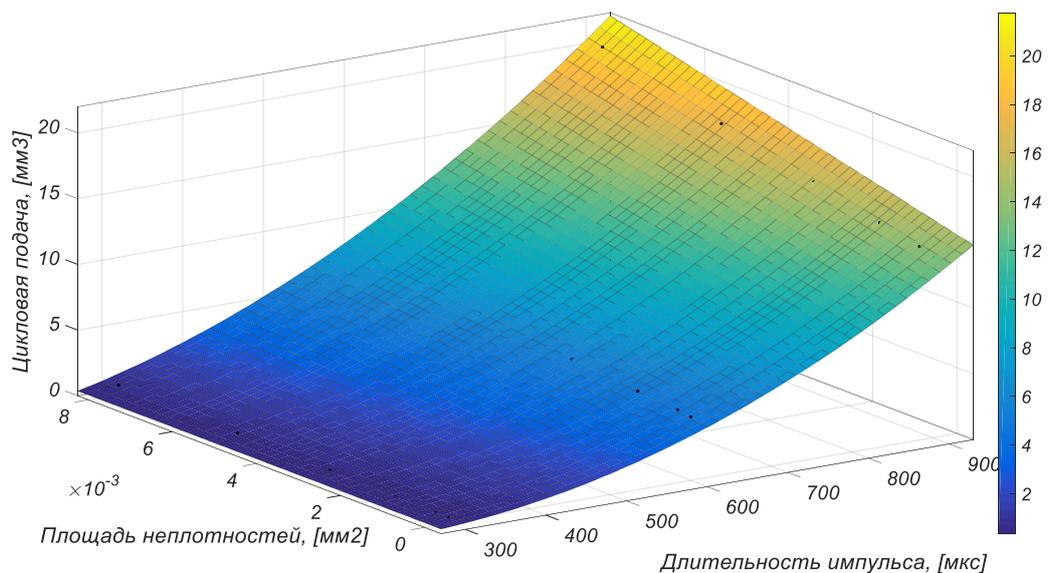


Рис. 4.6. График зависимости цикловой подачи при изменении площади неплотности управляющего клапана и длительности управляющего импульса (давление в аккумуляторе стенда  $p_{ак} = 40$  МПа).

Закономерность изменения расхода на управление от износа управляющего клапана описывает уравнение регрессии вида:

$$Q=f(\mu f_{\Sigma}, \tau_e)= 2,067 + 0,0097 \cdot \tau_e + 1,145e+04 \mu f_{\Sigma} \quad (4.2)$$

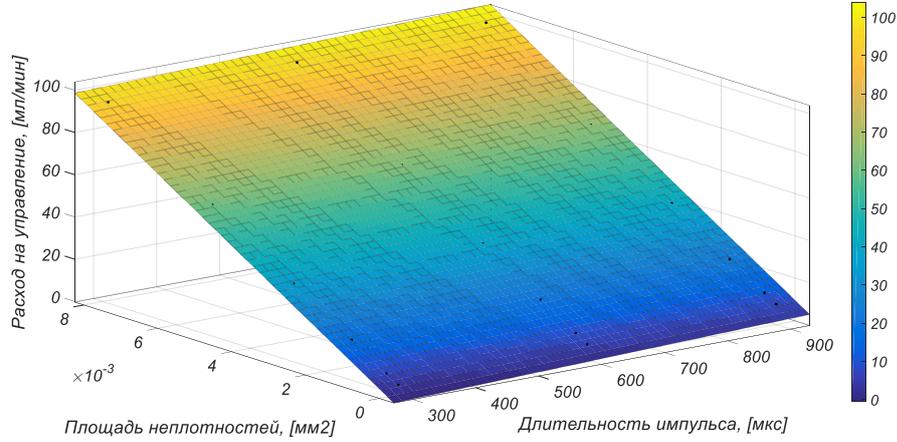


Рис. 4.7. График зависимости расхода на управление при изменении площади неплотности управляющего клапана и длительности управляющего импульса (давление в аккумуляторе стенда  $p_{ак} = 40$  МПа).

Аналогичным образом получены регрессионные зависимости при давлении 100 МПа (рис.4.8, 4.9, выражения (4.3) и (4.4)).

Для цикловой подачи:

$$q=-11,05 + 0,03488 \cdot \tau_e - 275,6 \cdot \mu f_{\Sigma} + 3.556e-05 \cdot (\mu f_{\Sigma})^2 + 2,345 \cdot \mu f_{\Sigma} \cdot \tau_e \quad (4.3)$$

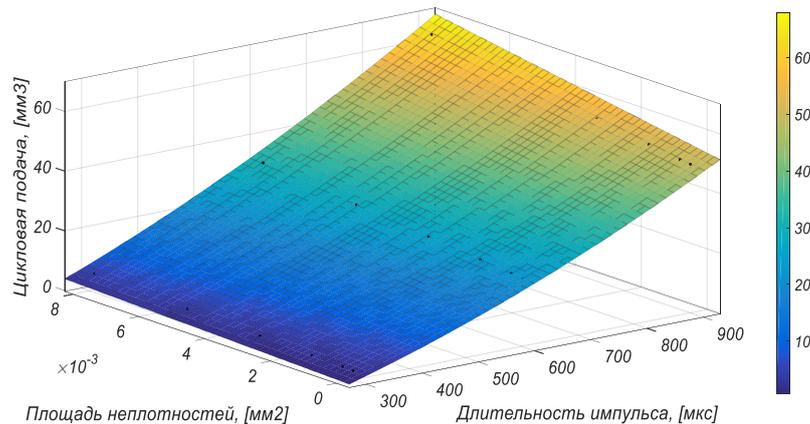


Рис. 4.8. График зависимости цикловой подачи при изменении площади неплотности управляющего клапана и длительности управляющего импульса (давление в аккумуляторе стенда  $p_{ак} = 100$  МПа).

Для расхода топлива на управление (давление 100 МПа):

$$Q = 3,998 + 0,01441 \cdot \tau_e + 1,876e+04 \mu f_{\Sigma} \quad (4.4)$$

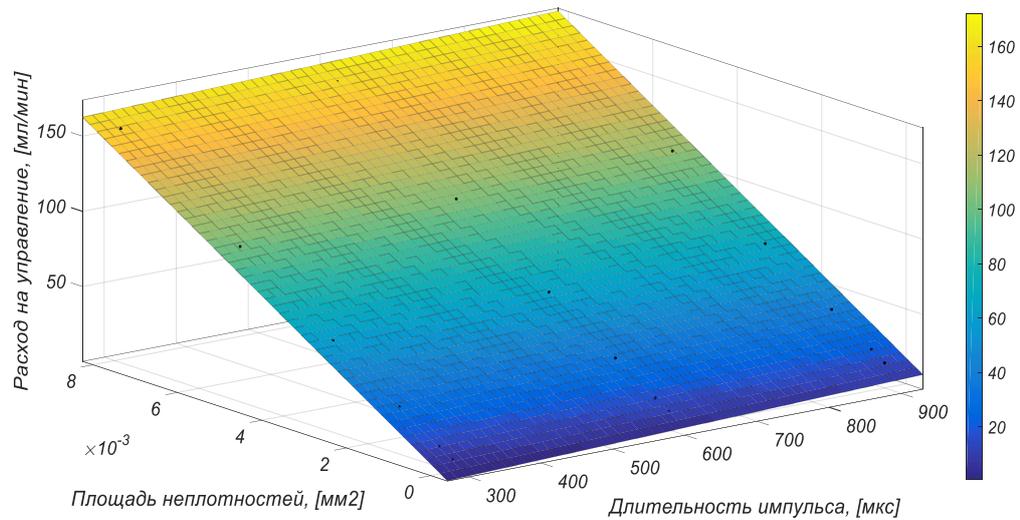


Рис. 4.9. График зависимости расхода на управление при изменении площади неплотности управляющего клапана и длительности управляющего импульса (давление в аккумуляторе стенда  $p_{ак} = 100$  МПа). Статистические показатели исследования приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Статистические показатели регрессионных моделей зависимостей цикловой подачи топлива  $q$  и расхода топлива на управление  $Q$ , при износе управляющего клапана.

| Зависимость                   | Давление, [МПа] | Вид уравнения   | Статистические параметры |                |        |
|-------------------------------|-----------------|---|--------------------------|----------------|--------|
|                               |                 |   | SSE                      | R <sup>2</sup> | RMSE   |
| $q=f(\mu f_{\Sigma}, \tau_e)$ | 40              | $1,391 - 0,01144 \cdot \tau_e - 327,5 \cdot \mu f_{\Sigma} + 2,819e-05 \cdot (\mu f_{\Sigma})^2 + 1,218 \mu f_{\Sigma} \cdot \tau_e$        | 0.3085                   | 0.9995         | 0.154  |
|                               | 100             | $-11,05 + 0,03488 \cdot \tau_e - 275,6 \cdot \mu f_{\Sigma} + 3,556e-05 \cdot (\mu f_{\Sigma})^2 + 2,345 \cdot \mu f_{\Sigma} \cdot \tau_e$ | 0.5805                   | 0,999          | 0,2113 |
| $Q=f(\mu f_{\Sigma}, \tau_e)$ | 40              | $2,067 + 0,0097 \cdot \tau_e + 1,145e+04 \mu f_{\Sigma}$  | 0.6201                   | 1              | 0.2033 |
|                               | 100             | $3,998 + 0,01441 \tau_e + 1,876e+04 \mu f_{\Sigma}$   | 2,818                    | 0,9999         | 0,4335 |

Очевидно, что на цикловую подачу  $q_i$  и расход топлива на управление

$Q_i$  влияет не только длительность управляющего сигнала  $\tau_e$ , как задаваемый управляющий параметр, но и износ (суммарная площадь неплотностей управляющего клапана  $\mu f_{\Sigma}$ ), как структурный параметр, изменяющийся в процессе наработки ЭГФ, в зависимости от ряда факторов (пункт 2.4).

С целью проверки предположения о том, что давление в обратной магистрали ЭГФ номинального и ЭГФ предельного технического состояния будет иметь отличия и может стать информативным диагностическим показателем, проведён поисковый эксперимент, предусматривающий помимо измерения расхода топлива на управление, измерение давления в обратной магистрали при функционировании ЭГФ в стендовых условиях, а также испытание и отладку систем измерения.

Испытания системы измерения давления доказали возможность использования её показаний в дальнейших исследованиях (рис.4.10).

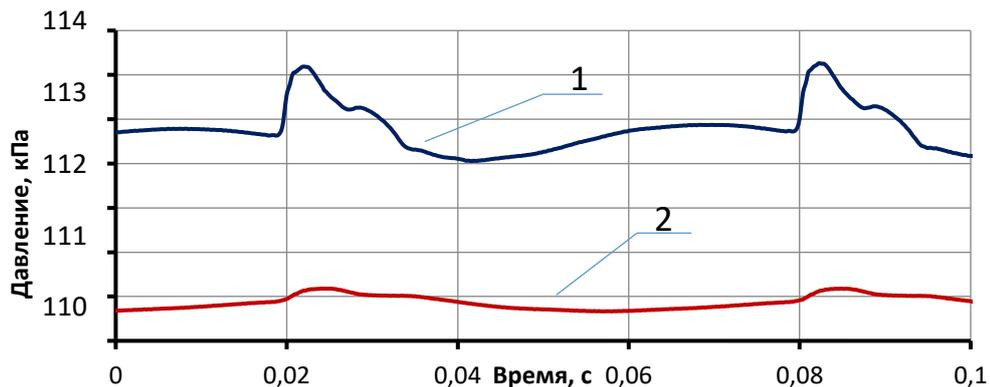


Рис. 4.10. Результаты поисковых испытаний с применением системы измерения давления на стенде для тестирования ЭГФ.

1 – Давление 160 МПа, длительность импульса 800 мкс;

2 – Давление 30 МПа, длительность импульса 800 мкс.

Далее была проведена проверка системы измерения давления топлива, применительно к условиям разрабатываемого метода в соответствии с методикой, изложенной в п. 3.2. Контроль давления в обратной магистрали стенда осуществлялся в режимах, близких к режиму холостого хода двигателя с давлением 40 МПа, при длительности сигнала управления  $\tau_e = 300$  мкс,  $\tau_e = 600$  мкс,  $\tau_e = 900$  мкс (рис. 4.11, 4.12, 4.13).

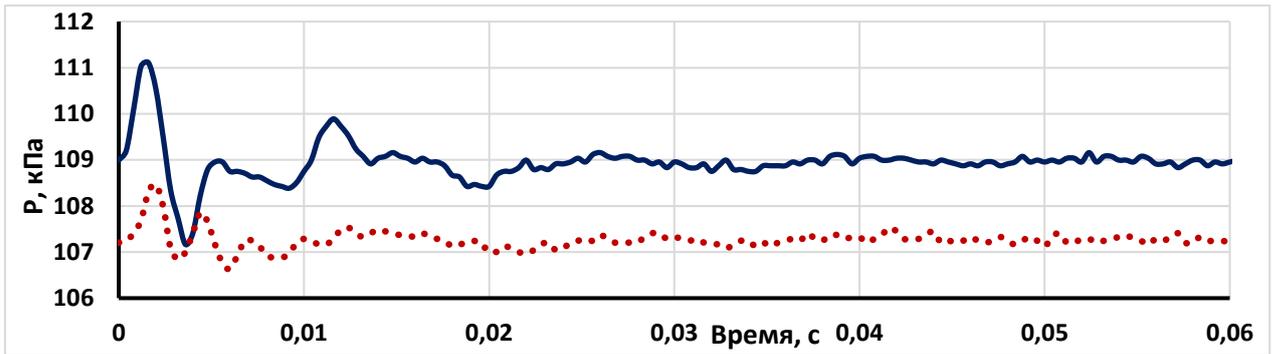


Рис. 4.11. Графики давления в обратной магистрали стенда, при срабатывании ЭГФ с длительностью сигнала управления  $\tau_e = 300$  мкс.

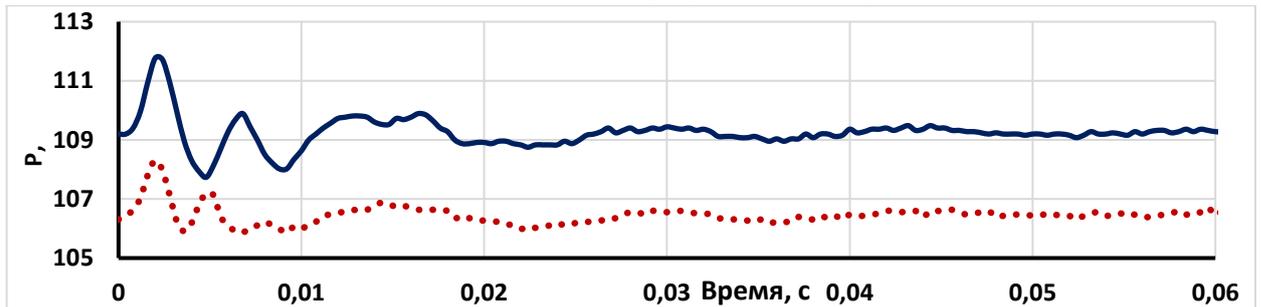


Рис. 4.12. Графики давления в обратной магистрали стенда, при срабатывании ЭГФ с длительностью сигнала управления  $\tau_e = 600$  мкс.

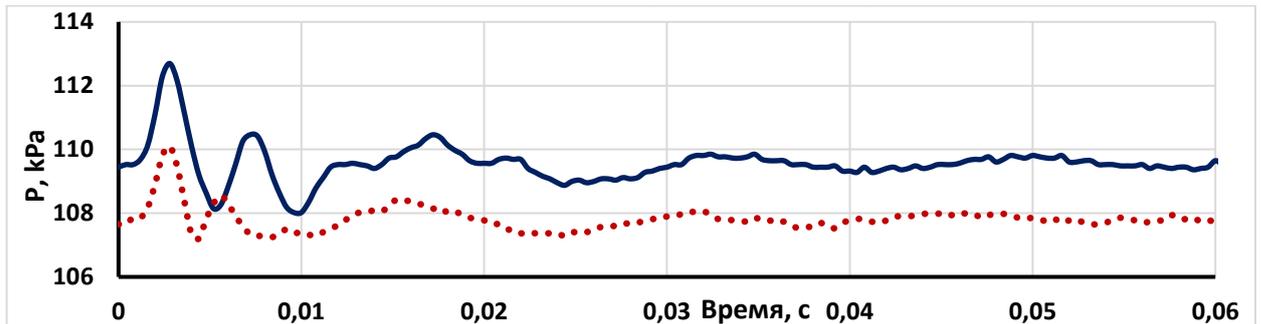


Рис. 4.13. Графики давления в обратной магистрали стенда, при срабатывании ЭГФ с длительностью сигнала управления  $\tau_e = 900$  мкс.

Обозначения графиков 4.11 – 4.13:

- номинальное техническое состояние – прерывистая линия;
- предельное техническое состояние – сплошная линия.

Анализ результатов, даёт вывод о том, что на заданных режимах, независимо от длительности управляющего сигнала, давление и среднее давление, соответствующее ЭГФ предельного технического состояния в сливной магистрали, имеет более высокие значения амплитуды и периода колебаний, чем давление, соответствующее ЭГФ номинального технического состояния. Время стабилизации давления в обратной магистрали стенда, после срабатывания

ЭГФ предельного технического состояния, значительно больше аналогичного показателя у ЭГФ номинального технического состояния.

Отличия давления в обратной магистрали стенда, при функционировании ЭГФ номинального и предельного технического состояния, могут определять характер изменения давления и в общей обратной магистрали АТПС, что позволит выявить диагностические параметры, характеризующие техническое состояние форсунок в составе АТПС автомобиля.

В ходе исследования возник вопрос о влиянии технического состояния ЭГФ на динамическую и статическую составляющую расхода топлива на управление (глава 2, п. 2.4 диссертации).

С целью выявления влияния технического состояния ЭГФ на перечисленные составляющие расхода топлива, были проведены дополнительные стендовые испытания ЭГФ при подключении и отключении управляющего сигнала (рис. 4.14, 4.15).



Рис. 4.14. Графики зависимости расхода топлива на управление ЭГФ, при давлении 40 МПа, с подключением и отключением управляющего сигнала (линии – расчёт, фигуры-маркеры – эксперимент);

1 – номинальное техническое состояние, сигнал отключен; 2 – номинальное техническое состояние, сигнал подключен; 3 – предельное техническое состояние, сигнал отключен; 4 – предельное техническое состояние, сигнал подключен.

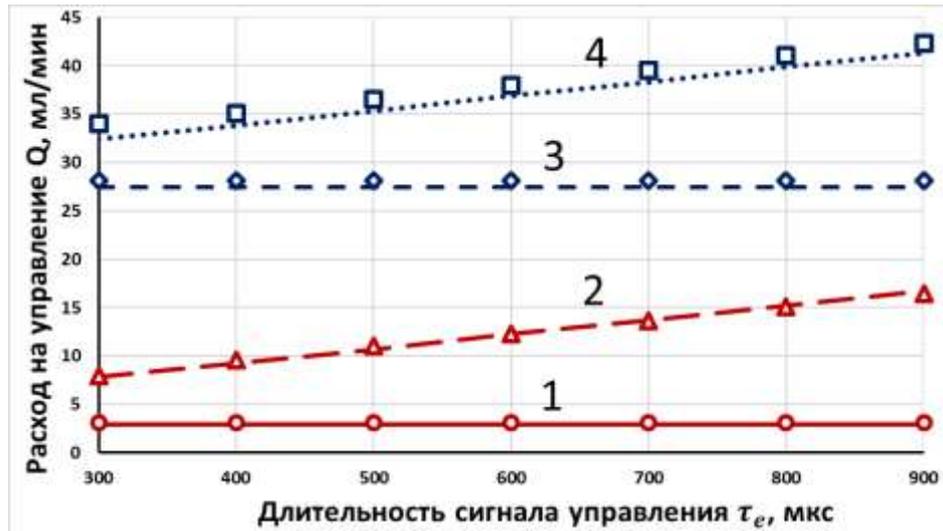


Рис 4.15. Графики зависимости расхода топлива на управление ЭГФ при давлении при давлении 100 МПа, с подключением и отключением управляющего сигнала (линии – расчёт, фигуры-маркеры – эксперимент); 1 – номинальное техническое состояние, сигнал отключен; 2 – номинальное техническое состояние, сигнал подключен; 3 – предельное техническое состояние, сигнал отключен; 4 – предельное техническое состояние, сигнал подключен.

Полученные данные позволяют сделать вывод о преобладании статических утечек над динамическими при износе управляющего клапана, а также о слабом влиянии длительности впрыска на величину утечек. В дальнейшем это позволяет упростить обработку диагностического сигнала (с допущением, что изменение длительности импульса при коррекции ЭБУ количества топлива на холостом ходу в течение цикла по разным форсункам мало влияет на результаты определения индивидуального расхода топлива на управление).

Способ с отключением и подключением управляющего сигнала, при одновременном измерении расхода топлива в подающей и обратной магистрали, может быть полезен на автомобиле, в том числе для точной калибровки цикловых подач при условии наличия соответствующего программного обеспечения ЭБУ [160].

Давление топлива, возникающее в обратной магистрали, непосредственно характеризует протекание процесса срабатывания управляющего клапана (рис. 4.10, 4.11, 4.12, 4.13). Этот параметр может обладать всеми признаками

диагностического параметра. Кроме того, контроль давления в общей обратной магистрали не требует вмешательства в рабочий процесс АТПС и двигателя автомобиля, для изменения управляющих параметров, что является особенно значимым условием, при реализации предлагаемого метода.

### **4.3. Результаты исследования процесса формирования диагностических параметров в общей магистрали при изменении технического состояния управляющего клапана и расположения форсунок**

Ключевыми составляющими, определяющими результат проводимого исследования, являются показатели и зависимости, позволяющие оценивать техническое состояние ЭГФ, по давлению и расходу топлива в общей обратной магистрали. Основной научной задачей, в реализации разрабатываемого метода диагностики ЭГФ, являлось преобразование измеренных физических величин, в диагностические параметры, обладающие однозначностью, чувствительностью, стабильностью и информативностью.

Расход топлива на управление  $Q_i$  непосредственно связан с параметром технического состояния – величиной износа управляющего клапана (п. 4.2). Однако конкретизировать индивидуальный расход на управление через расход в общей обратной магистрали не представляется возможным без дополнительных измерений. Согласно гипотезе и теоретическим предпосылкам (п. 2.2 - 2.4), дополнительным параметром выступает давление в обратной магистрали. Это позволяет перейти от общего диагностирования к поэлементному.

Измерение общего расхода топлива производилось известным методом, описанным в разделе 3.7.2 и 3.8, при этом средняя относительная погрешность измерения составила 3,8%.

Для определения индивидуального расхода на управление  $Q_i$  необходимо, на основе данных об изменении давления в общей обратной магистрали, разбить измеренный общий расход на доли, принадлежащие каждой ЭГФ.

В основе процесса формирования давления в общей обратной магистрали лежат теоретические предпосылки, изложенные в пунктах 2.2 - 2.4.

Давление в общей обратной магистрали является сложным колебательным процессом, зависящим от множества факторов, таких как:

- физические свойства топлива;
- температура окружающей среды;
- особенности технического состояния ЭГФ и подключения к линии общей обратной магистрали.

Параметрами, характеризующими колебательный процесс в давления топлива, в линии общей сливной магистрали являются:

- величина давления;
- амплитуда и частота колебаний;
- периоды следования, по циклам работы ЭГФ.

Проведенные многочисленные эксперименты позволили заключить, что амплитудно-фазовые параметры давления в общей обратной магистрали изменяются от технического состояния ЭГФ, но форма зависимости давления от времени по циклу работы различна. Это потребовало поиск метода обработки сигнала, обеспечивающего универсальность и информативность.

Принимая сказанное во внимание, для численной оценки процесса изменения давления в общей обратной магистрали, по результатам расчётов и экспериментальных исследований был принят диагностический параметр  $S_i$  – площадь, ограниченная графиком давления, относительно линии среднего давления  $p_i$  на участке времени  $t_i$  (рис. 4.16, 4.17). При этом было выявлено, что неисправная форсунка с повышенными утечками надёжно определяется на фоне номинальных (рис. 4.17).

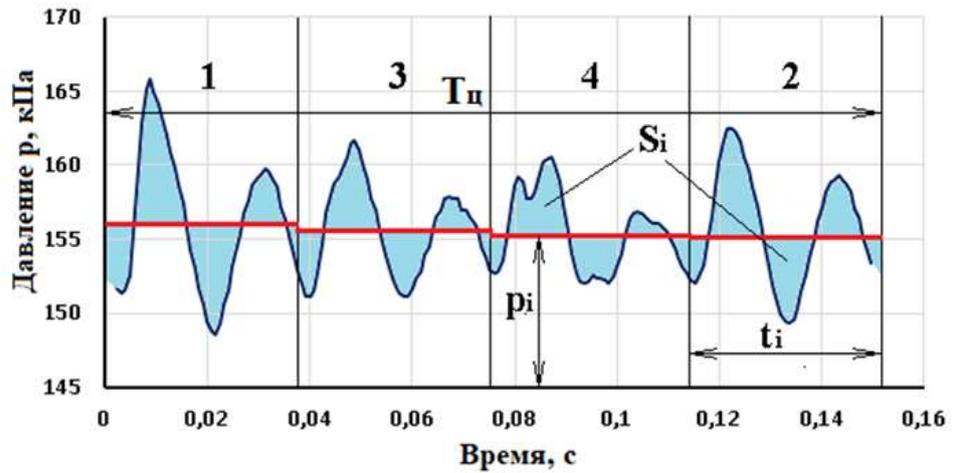


Рис. 4.16. График давления в общей обратной магистрали, при всех ЭГФ номинального технического состояния. На графике:

- $T_{ц}$  – участок времени, синхронизированный с полным циклом работы двигателя, соответствующий порядковому срабатыванию всех цилиндров, состоящий из участков  $t_i$ ;
- $t_i$  – участок времени, синхронизированный со срабатыванием каждой ЭГФ на участке времени  $T_{ц}$ ;
- $p_i$  – среднее давление на участке времени  $t_i$ .

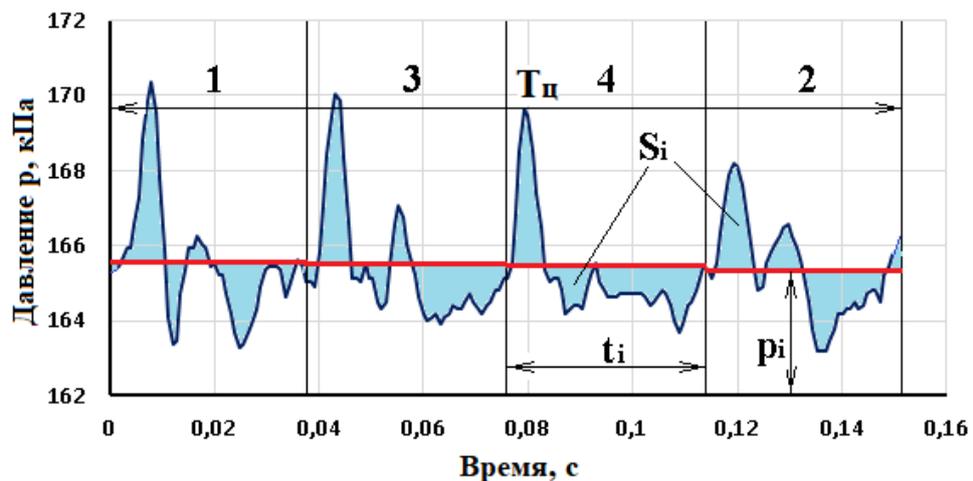


Рис. 4.17. График давления в общей обратной магистрали. ЭГФ 2-го цилиндра имеет предельное техническое состояние.

Таким образом, при принятых условиях, можно записать:

$$S_i = \int_0^{t_i} [p] dx \quad (4.5)$$

Для повышения точности определения индивидуального расхода на управление через общий расход (т.е. доли расхода от каждой ЭГФ), необходимо учесть изменение свойств топлива, а также расположение точки контроля давления. Последнее условие является необходимым, т.к. конфигурация обратных магистралей может различаться. Например, в одном случае измерительной точкой будет общий вывод в непосредственной близости от четвертого (или шестого) цилиндров, а в другом относительно первого. Может различаться также и порядок чередования работы форсунок, и количество срабатываний за цикл. Например, для четырехцилиндрового двигателя при подключении к обратной магистрали со стороны четвертого цилиндра при изменении температуры и удалении ЭГФ относительно точки измерения давления, прослеживается определенная закономерность, представленная на рис. 4.18.

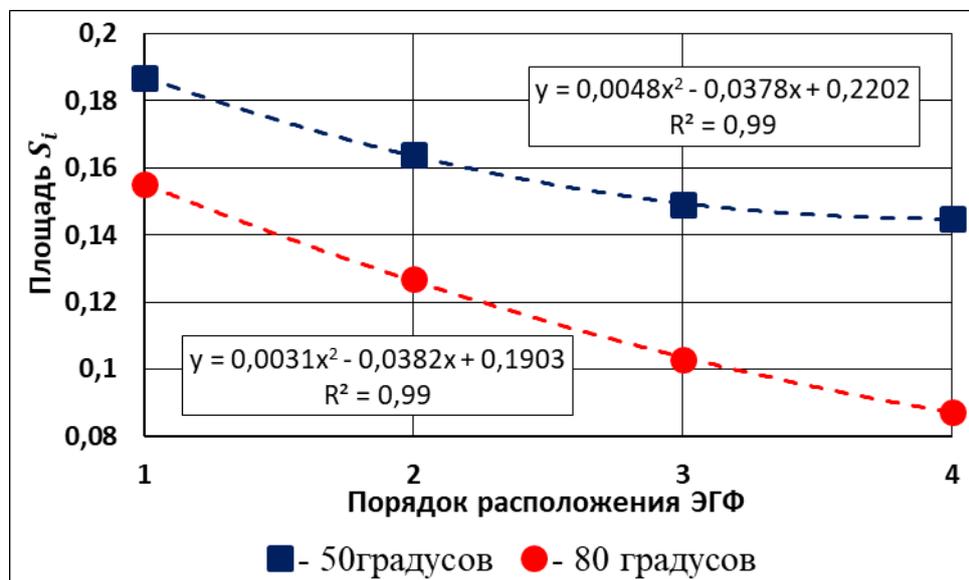


Рис. 4.18. График зависимости площади  $S_i$  от расположения ЭГФ номинального технического состояния относительно точки измерения давления при изменении температуры топлива в ТАВД, для 4-х цилиндрового двигателя ISf 2.8.

Изменение площадей  $S_i$  относительно точки подключения (рис. 4.18) объясняется следующим. При срабатывании управляющего клапана, динамическая составляющая давления в полости слива и далее, в магистрали зависит от баланса статического  $Q_{ст}$  и динамического  $Q_{дин}$  расхода через клапан (рис. 4.19). Условия движения топлива через управляющий клапан можно выразить следующим образом:

- для герметичного клапана:

$$Q_{ст} = 0; Q = Q_{дин}; \Delta Q = max; [p]dx = max; S_i = max \quad (4.6)$$

- для негерметичного клапана:

$$Q_{ст} > 0; Q = Q_{дин} + Q_{ст}; \Delta Q < max; [p]dx < max; S_i < max \quad (4.7)$$

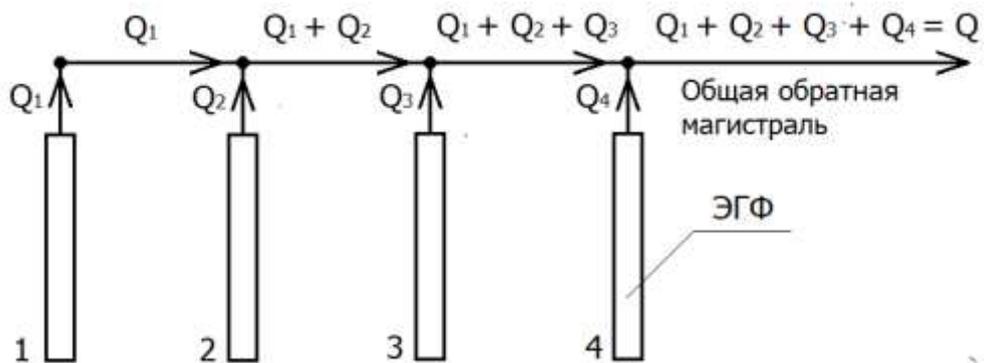


Рис. 4.19. Схема движения топлива в общей обратной магистрали.

Вследствие того, что динамическая составляющая давления на выходе из ЭГФ, для всех форсунок номинального технического состояния одинакова, то значение  $S_i$  в общей обратной магистрали для таких форсунок зависит только от их расположения относительно точки измерения давления (рис. 4.18). При выходе из ЭГФ волна давления делится на две составляющие, так как трубопровод обратной магистрали на выходе из форсунки раздваивается, при этом рассеивание волны давления в направлении, противоположном сливу увеличивается, а площадь  $S_i$  — уменьшается по мере увеличения длины «тупикового» участка магистрали перед форсункой. Данная зависимость  $S_i$ , от расположения форсунок по цилиндрам двигателя, хорошо описывается полиномом второй степени (рис. 4.19).

Существенное влияние на показания давления может оказывать температурный фактор (рис. 4.18). Для качественного отображения диагностических параметров, работы следует проводить при стабилизации температуры, на полностью прогретом двигателе.

Анализ также показывает, что  $S_i$  у форсунки предельного технического состояния мало зависит от её расположения. Это происходит вследствие снижения динамической составляющей давления, при срабатывании, на фоне повышенной утечки.

Взаимосвязь параметра  $S_i$  с индивидуальным расходом ЭГФ в общей обратной магистрали  $Q_i$  однозначна (не имеет экстремума в пределах возможного на практике индивидуального расхода на управление) и чувствительна к изменению расхода топлива на управление (рис. 4.20).

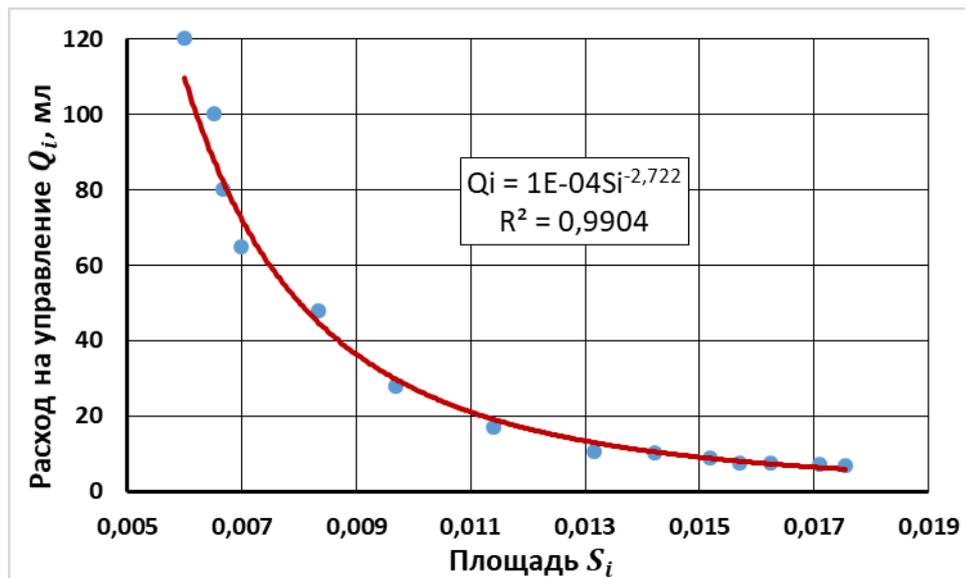


Рис. 4.20. График зависимости расхода на управление от изменения площади  $S_i$ .

Стабильность принятого диагностического параметра  $S_i$  оценивали дисперсией (разбросом) его величины при многократных измерениях по соответствующим участкам времени  $t_i$ , повторяющимся в каждом цикле работы двигателя – участка времени  $T_{ц}$ . Этот параметр включает погрешности системы измерения, а также способа обработки сигнала давления. Данная ме-

тодика приведена в разделе 3.10. Расчетное значение дисперсии составило 0,002898, или 3,7%. Таким образом, можно заключить, что параметр  $S_i$  достаточно стабилен.

Для того, чтобы воспользоваться выявленной зависимостью, представленной на рисунке 4.20 и повысить точность метода, необходимо площади сопоставить с расположением относительно точки подключения и порядка работы. Сделать это можно с помощью учета доли индивидуального расхода в общем балансе расходов. Зависимости, приведенные на рисунке 4.18, позволяют произвести коррекцию для четырехцилиндрового двигателя.

Для двигателя с произвольным числом цилиндров, там, где конфигурация и длина обратной магистрали заранее не определена, целесообразно воспользоваться разработанным алгоритмом вычисления индивидуального расхода на управления через корректирующие коэффициенты. При этом на первом этапе производится измерение общего расхода на управление и сравнивается с номинальным значением, т.е. когда утечки от всех форсунок минимальны и примерно равны.

При определении индивидуального расхода на управление, необходимо первоначально выявить в АТПС наличие и расположение форсунки предельного технического состояния. Для этой цели выполняется предварительный расчёт индивидуального расхода на управление  $Q_i$  относительно средних значений общего расхода  $Q$  и суммарной площади  $S = \sum S_i$ , на участках времени  $T_{ц}$ :

$$Q_i = \frac{Q \cdot S}{16S_i} \quad (4.8)$$

По результатам предварительного расчёта, определяются коэффициенты коррекции текущих значений площадей  $S_i$ , учитывающие выявленную конфигурацию технического состояния и расположения, для 4-х цилиндрового двигателя ЭГФ (таблица 4.4). В случае, если общий расход, превышен более чем на 25%, с помощью расчета площади выявляется факт наличия или

отсутствия форсунки с повышенным относительно других расходом на управление. Поэтому для форсунок одинакового (или близкого друг к другу) технического состояния вводятся коэффициенты  $k_n$ , а в случае выявления форсунки с повышенными утечками – коэффициенты  $k_m$ . В противном случае, погрешность определения индивидуального расхода в некоторых случаях достигала 20%, что недостаточно для надежного распознавания технического состояния.

Коэффициенты  $k_n$  и  $k_m$ , учитывающие влияние расположения и порядка работы ЭГФ на показатели  $S_i$ , выведены путем обработки и анализа массива расчётных и экспериментальных данных, на основе соотношения текущих значений и значений среднего в балансе  $S_i$ .

Таблица 4.4. Коэффициенты  $k_n$  и  $k_m$ , коррекции текущих значений  $S_i$ .

| Коэффициент | № ЭГФ соответственно номеру цилиндра |             |             |             |
|-------------|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|             | 1                                    | 2           | 3           | 4           |
| $k_n$       | 0,77                                 | 0,92        | 1,14        | 1,34        |
| $k_{m1}$    | <b>1,15</b>                          | 1,07        | 0,99        | 0,95        |
| $k_{m2}$    | 0,98                                 | <b>0,93</b> | 1,04        | 0,99        |
| $k_{m3}$    | 1,11                                 | 1,26        | <b>0,99</b> | 0,77        |
| $k_{m4}$    | 0,95                                 | 1,00        | 1,06        | <b>0,96</b> |

Коэффициенты  $k_{m1}, k_{m2}, k_{m3}, k_{m4}$  – соответствуют номеру цилиндра с ЭГФ предельного технического состояния.

При умножении значений соответствующих текущих площадей  $S_i$ , на соответствующие известные коэффициенты  $k_n$  и  $k_m$ , получаем расчётные значения  $S_{ik}$ , исключаяющие зависимость параметра  $S_i$  от расположения ЭГФ.

Смысл указанных коэффициентов заключается в том, что они позволяют скорректировать индивидуальную долю в общем расходе относительно среднего значения расхода, с учетом порядка работы и расположения относительно точки измерения давления.

Расчётная площадь для номинального технического состояния:

$$S_{ik} = S_i \cdot k_n \quad (4.9)$$

Расчётная площадь для предельного технического состояния:

$$S_{ik} = S_i \cdot k_m \quad (4.10)$$

Так как расчёт будем выполнять на основе отличия индивидуальных показателей от показателей средних значений  $S_{ikcp}$  и  $Q_{icp}$ , то следующим шагом определим показатели среднего значения:

$$\begin{cases} Q_{icp} = \frac{Q}{i} \\ S_{ikcp} = \frac{\sum S_{ik'}}{i} \end{cases} \quad (4.11)$$

где:  $Q$  – измеренный общий расход в обратной магистрали;

$i$  – число ЭГФ.

Зависимость  $Q_i(S_{ik})$  представлена с учётом балансных соотношений для  $Q_i$  и для  $S_{ik}$ , зависимостью  $n_{Qi}(k_{si})$ , содержащую величины:

$$n_{Qi} = \frac{Q_i}{Q_{icp}} \quad (4.12)$$

где:  $n_{Qi}$  – коэффициент, учитывающий отклонение значений  $Q_i$  от  $Q_{icp}$ ;

$$k_{si} = \frac{S_{ikcp}}{S_{ik}}, \quad (4.13)$$

где:  $k_{si}$  – коэффициент, учитывающий отклонение значений  $S_{ik}$  от  $S_{ikcp}$ .

Заключительным шагом является определение коэффициента  $n_{Qi}$ , при использовании уравнения зависимости  $n_{Qi}(k_{si})$ , полученной по итогам анализа расчётных и экспериментальных данных (рис. 4.21). Полученная зависимость связывает индивидуальный расход топлива на управление ЭГФ  $Q_i$ , с диагностическим параметром  $S_i$ , приведённым к параметру  $S_{ik}$ , с помощью коэффициентов коррекции текущих значений площади  $S_i$  (таблица 4.4).

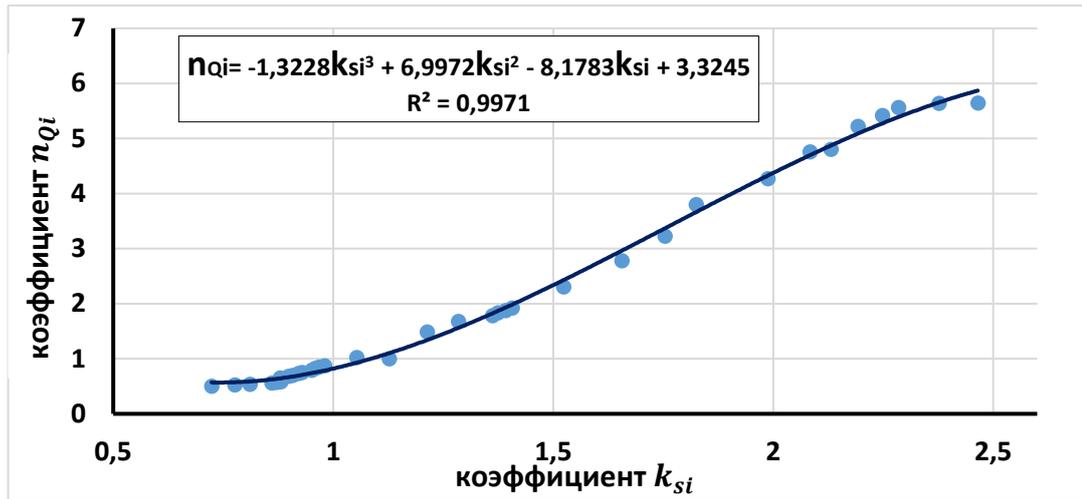


Рис. 4.21. Функциональная зависимость  $Q_i(S_i)$ , выраженная через средние показатели  $Q_{icp}$  и  $S_{icp}$ .

$$n_{Qi} = -1,3228k_{si}^3 + 6,9972k_{si}^2 - 8,1783k_{si} + 3,3245 \quad (4.14)$$

Далее определяется расход на управление  $Q_i$ :

$$Q_i = Q_{icp} \cdot n_{Qi} \quad (4.15)$$

Результаты проведённых исследований легли в основу последовательного алгоритма, описывающего сущность разработанного метода диагностики электрогидравлических форсунок (рис.4.22).

Исходными диагностическими данными являются синхроимпульс, график давления и количество импульсов, за временной интервал измерения. После определения среднего давления  $p_{icp}$  на участках  $t_i$ , выполняется расчёт площадей  $S_i$ . Затем, в балансе общего расхода  $Q$ , относительно среднего значения  $\sum S_i$ , производится предварительный расчёт  $Q_i$ . После чего  $Q_i$  сравнивается со значением расхода ЭГФ предельного технического состояния  $Q_{пр}$ . По результатам данного сравнения выбирается соответствующий коэффициент коррекции текущих значений  $k_n$  или  $k_m$ , в соответствии с расположением ЭГФ предельного технического состояния. На следующем этапе определяется расчётная площадь  $S_{ik}$  и коэффициент учитывающий отклонение  $S_{ik}$ ,

от среднего значения  $S_{i\text{кр}}$ . Затем, при использовании уравнения зависимости  $n_{Qi}(k_{si})$ , определяется коэффициент  $n_{Qi}$ , учитывающий отклонение расхода на управление  $Q_i$ , от среднего значения  $Q_{i\text{кр}}$ . Далее вычисляется индивидуальный расход на управление цикловой подачей ЭГФ -  $Q_i$ .

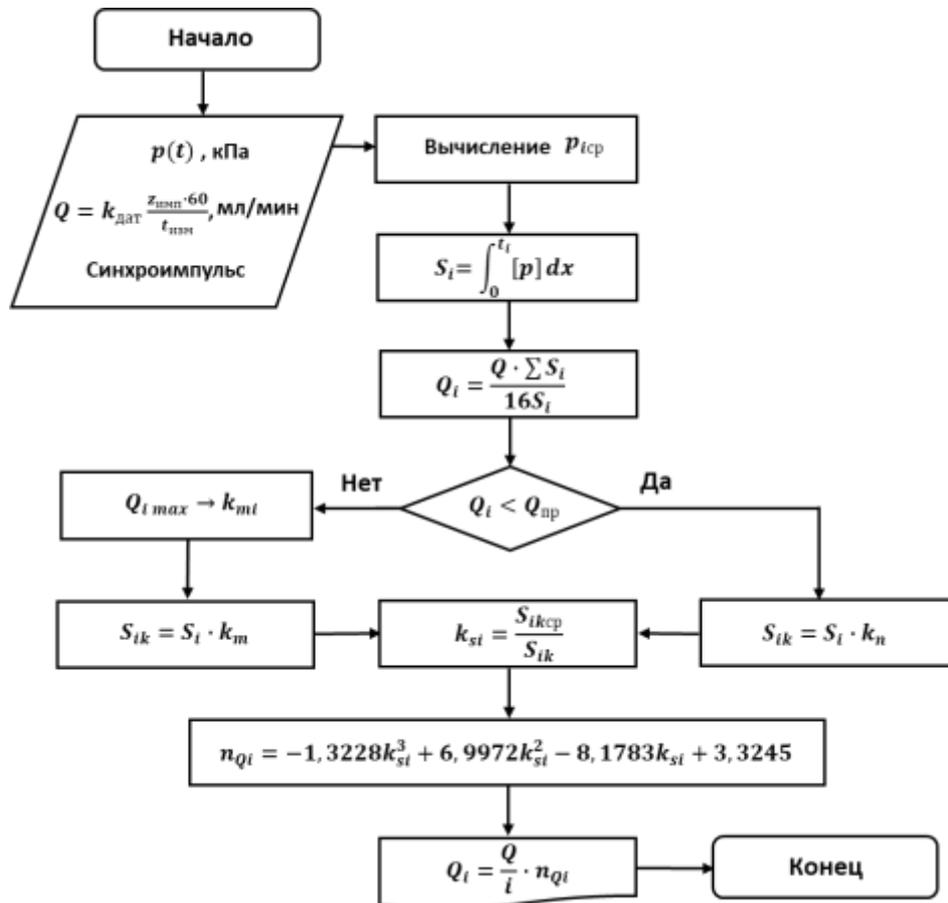


Рис. 4.22. Блок-схема алгоритма диагностики ЭГФ по давлению и расходу топлива в общей обратной магистрали.

Пример вычисления расхода по приведенному алгоритму представлен на рисунке 4.23 - 4.24. Рисунок 4.23 отражает результаты сравнения методов диагностики ЭГФ по индивидуальному расходу на управление в случае, когда на двигатель установлены форсунки близкого друг к другу технического состояния. На рисунке 4.24 форсунка первого цилиндра имеет превышение расхода на управление и ее техническое состояние оценено как предельное.

При этом вероятность появления диагностических ошибок первого и второго рода составляет 7,5%.

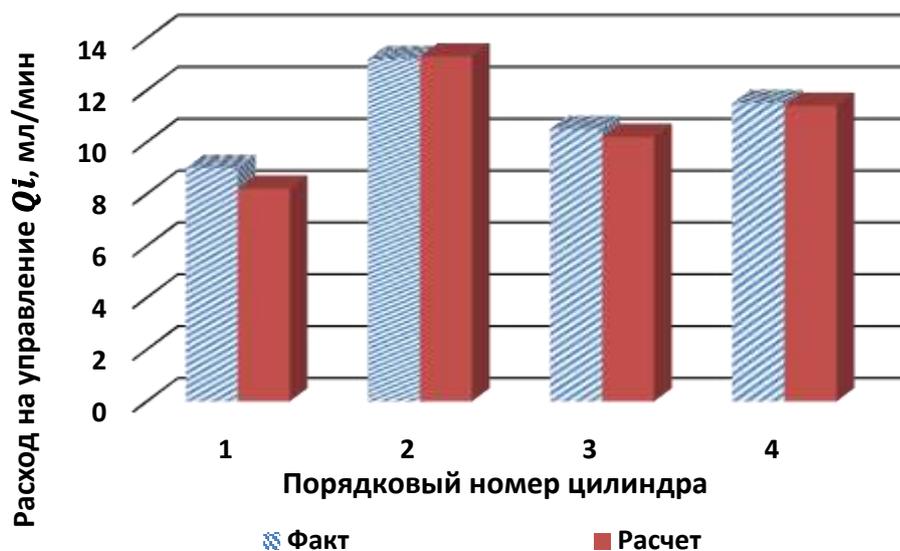


Рис. 4.23. Результаты сравнения расхода топлива на управление ЭГФ измеренного существующим методом (факт) и разработанным методом (расчет) (неисправные форсунки отсутствуют).

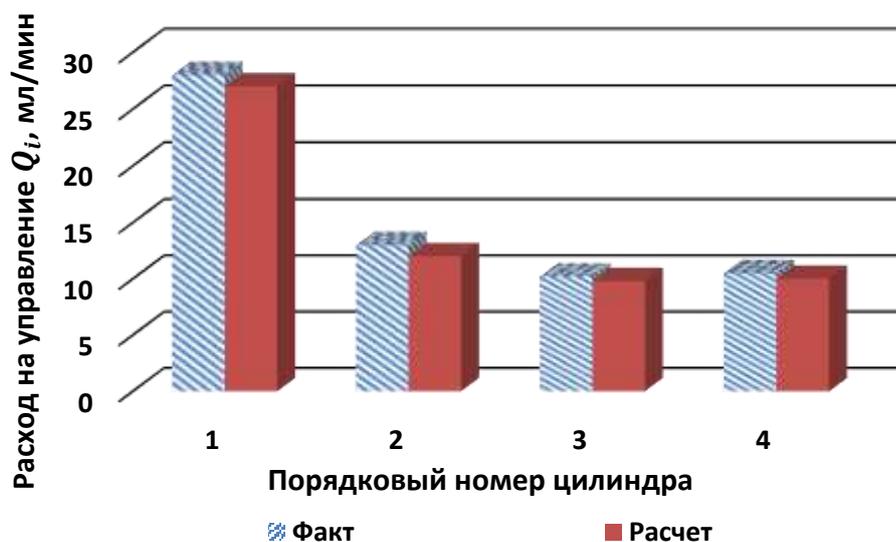


Рис. 4.24. Результаты сравнения расхода топлива на управление ЭГФ измеренного существующим методом (факт) и разработанным методом (расчет) (неисправна форсунка первого цилиндра).

#### **4.4. Результаты производственной проверки и технико-экономическая оценка результатов исследования**

##### **4.4.1. Техничко-экономическая оценка результатов исследования в условиях автотранспортных предприятий (на примере МУП ИркутскАвтоТранс)**

Экономический эффект от внедрения метода диагностики электрогидравлических форсунок Common Rail по расходу и давлению топлива в общей обратной магистрали получается за счет повышения информативности контроля технического состояния каждой ЭГФ, без разборочно-сборочных мероприятий. При этом, сравнение предлагаемого метода диагностики, целесообразно осуществить с существующей технологией диагностирования, на основе снижения трудоёмкости, стоимости, а также снижения затрат на запасные части и комплекты.

В производственной проверке участвовали автотранспортные средства предприятий МУП ИркутскАвтоТранс: автобусы, оснащенные аккумуляторной топливоподающей системой (Common Rail) с двигателями 4ISBe, 6ISBe, ISf 3.8, а также ЯМЗ 534. У данных автобусов форсунки расположены под клапанной крышкой и измерение индивидуального расхода с каждой из них невозможно.

Внедрение метода диагностики ЭГФ, предусматривает дополнение уже имеющихся на предприятии средств диагностирования дилерского уровня Cummins Insite (для двигателей Cummins), а также ДК-5 (для двигателей семейства ЯМЗ), устройством диагностики по общей обратной магистрали. Имеющиеся же СТД, не предусматривают определение индивидуальных утечек с каждой из форсунок. Более того, данные диагностические средства не содержат контроля балансировки цилиндров (компенсации количества топлива на холостом ходу). В случае, если система самодиагностики зафиксировала неисправность, связанную с недостаточностью высокого давления топ-

лива в общей подающей магистрали, или возникло затруднение пуска двигателя, повышенный расход топлива и дымление, дальнейшие измерения предусматривают поиск места возможной утечки из линии высокого давления. Как правило, данный процесс включает демонтаж всех ЭГФ с двигателя, с последующей проверкой на специализированном стенде.

В связи с оптимизацией производственных фондов, такие работы АТП осуществляет в специализированном авторизованном центре, где контролируются герметичность аварийного клапана и функциональные показатели форсунок.

В качестве межконтрольного пробега, примем пробег автобусов равный 200 тыс. км. На МУП ИркутскАвтоТранс, в среднем, при данной наработке для одного транспортного средства меняется/ремонтируется 2-3 комплекта ЭГФ. При этом, до 50% на момент проверки оказываются годными для дальнейшей эксплуатации.

Учитывая значительный разброс ресурса инжекторов (раздел 1.3, рис.1.9) даже в рамках одного комплекта на автомобиле, на предприятии установлена целесообразность индивидуального ремонта или замены ЭГФ. При этом трудоемкость контроля существующим методом, без внедрения предлагаемого метода диагностики ЭГФ, будет выше.

Внедрение предлагаемого метода ведёт к значительному снижению трудоёмкости, так как проведение диагностики электрогидравлических форсунок не требует их демонтажа с двигателя. При выявлении неисправных форсунок, выявляется и их расположение, поэтому необходимость демонтажа, ремонта или замены, реализуется только для неисправных форсунок. В случае же отсутствия таковых, монтажные работы вовсе исключаются и, в данном примере, преимущества применения нового метода - очевидны.

Следует учесть, что значимым фактором расходов, при снятии – установке ЭГФ, является замена ремонтных монтажных комплектов (резиновые уплотнения, коннекторы, шайбы и др.).

Невысокая трудоёмкость диагностики ЭГФ позволяет проводить дополнительный (профилактический) контроль и мониторинг их технического состояния в течении года и осуществлять прогнозирование их остаточного ресурса. Данная возможность продлевает срок службы ещё исправных ЭГФ и предупреждает случаи полного отказа форсунок, с более затратными последствиями. Внедрение разработанного метода позволит проводить диагностику, соответственно и демонтаж, собственными силами АТП, исключая демонтаж и проверку исправных ЭГФ.

Таким образом, количество форсунок, подлежащих ремонту в специализированном сервисном центре, будет сведено до необходимого минимума. Данный факт значительно способствует сокращению эксплуатационных расходов АТП, связанных не только в РОВ, но и со временем простоя АТС.

Рассмотрим типичный случай из эксплуатационной практики, когда одна ЭГФ на 4-х цилиндровом двигателе имеет предельное техническое состояние, а диагностирование выполняется с применением сравниваемых методов.

Примем допущения в расчете экономической эффективности диагностирования [24, 25] при внедрении предлагаемого метода диагностики:

1. При расчетах, трудоемкость снятия/установки ЭГФ считаем среднестатистической, для данного автотранспортного предприятия.
2. Будем считать, что необходимые расходные комплектующие (резиновые уплотнения, коннекторы, шайбы и др.) есть в наличии (допущение).
3. Для АТП стоимость работ рассчитываем исходя из стоимости часовой тарифной ставки, без учета всего фонда заработной платы диагноста и слесаря, поскольку они состоят в штате предприятия.
4. Приведенные затраты нового СТД в сфере производства равными его балансовой стоимости:  $Z_2 = B$ .
5. Расчёт выполним без учёта производительности предлагаемого метода, так как более высокая производительность, а соответственно частота

диагностирования, влияет на выявление и предупреждение случайных и непредсказуемых отказов с более серьёзными техническими и материальными последствиями.

6. Учитывая стоимость нового варианта СТД (менее 100 т. руб.), исключим амортизационные расходы и капитальные вложения в сфере эксплуатации.

Исходные данные, необходимые для расчета приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5. Исходные данные для расчета экономической эффективности.

| Наименование показателей  | Обозначение       | Ед. изм. | Значение |
|---|-------------------|----------|----------|
| 1   | 2                 | 3        | 4        |
| Балансовая стоимость диагностического комплекта ДК-5 + Cummins Insite                 | $B_1$             | руб.     | 89300    |
| Балансовая стоимость диагностического комплекта ДК-5 + Cummins Insite + Устройство Д. | $B_2$             | руб.     | 19300    |
| Количество АТС  | $n_a$             | ед.      | 35       |
| Общий годовой пробег  | $L_{\Gamma}$      | тыс. км  | 50000    |
| Количество РОВ на 1 АТС в год   | $n_{\text{ров}}$  | ед.      | 1        |
| Количество Д на 1 АТС в год   | $n_d$             | ед.      | 1        |
| Трудоёмкость диагностики с применением автосканера                                    | $t_{\text{скан}}$ | час      | 0,2      |
| Трудоёмкость диагностики разработанным методом  | $t_{\text{разр}}$ | час      | 0,3      |
| Количество инженеров-диагностов   | $n$               | чел.     | 1        |
| Часовая тарифная ставка   | $C_{\text{ч}}$    | руб/час  | 227      |
| Действительный годовой фонд рабочего времени  | $\Phi_d$          | час      | 1668,8   |
| Средний срок службы СТД   | $T_{\text{сл}}$   | лет      | 6        |
| Нормативный коэфф. эффективности кап. вложений  | $E_n$             | —        | 0,15     |
| Коэфф. отчислений на ТР и плановое ТО СТД   | $K_{\text{тр}}$   | —        | 0,05     |
| Коэфф., учитывающий прочие накладные расходы  | $K_{\text{нр}}$   | —        | 1,89     |

Продолжение табл. 4.5.

| 1   | 2                  | 3       | 4     |
|---|--------------------|---------|-------|
| Коэфф., учитывающий отчисление в фонд соц. страхования                                    | $K_{\text{соц}}$   | –       | 1,029 |
| Коэфф., учитывающий отчисление в фонд ОМС   | $K_{\text{мед}}$   | –       | 1,051 |
| Коэфф., учитывающий отчисление в ПФР  | $K_{\text{пенс}}$  | –       | 1,2   |
| Коэфф., учитывающий отчисления на страховые нужды, связанные с особенностями производства | $K_{\text{страх}}$ | –       | 1,007 |
| Топливо, отпускной тариф  | $T_{\text{топл}}$  | руб/л   | 49,7  |
| Электроэнергия, отпускной тариф   | $T_{\text{э}}$     | руб/кВт | 3,50  |
| Норма прибыли   | $\Pi$              | %       | 20    |
| НДС   | $\text{Н}$         | %       | 20    |

Годовой экономический эффект от применения метода ремонта, с использованием внедрённого метода диагностики, определится по следующей формуле:

$$\mathcal{E} = Z_1 + U'_1 + K'_1 - Z_2 - U'_2 - K'_2, \quad (4.16)$$

где:  $Z_1$  и  $Z_2$  – приведенные затраты в сфере производства, приходящиеся на одно базовое и новое СТД, руб.;

$U'_1$  и  $U'_2$  – годовые эксплуатационные издержки потребителя (без учета амортизации на реновацию) при использовании базового и нового СТД соответственно в расчете на годовой объем работы, обеспечиваемый новым СТД, руб.

Трудоёмкость работ, связанных с диагностикой ЭГФ существующим методом, предусматривает демонтаж всех ЭГФ с двигателя и включает первичное диагностирование с помощью автосканера:

$$t_{\text{д1}} = t_{\text{пэгф}} \cdot n_{\text{эгф}} + t_{\text{монт}} + t_{\text{скан}}, \quad (4.17)$$

где:  $t_{\text{пэгф}}$  – трудоёмкость проверки одной ЭГФ на стенде;

$n_{\text{эгф}}$  – количество ЭГФ;

$t_{\text{скан}}$  – трудоёмкость первичной диагностики автосканером,  $t_{\text{д}} = 0,2$  часа.

$$t_{д1} = 0,17 \cdot 4 + 2,3 + 0,2 = 3,18 \text{ часа}$$

Трудоёмкость работ, связанных с диагностикой ЭГФ предлагаемым методом, не зависит от количества проверяемых форсунок на двигателе и не требует их демонтажа:

$$t_{д2} = t_{скан} + t_{разр} , \quad (4.18)$$

где:  $t_{разр}$  – трудоёмкость диагностирования разработанным методом.

$$t_{д2} = 0,2 + 0,3 = 0,5 \text{ часа}$$

Запишем трудоёмкость и затраты на проведение диагностики и ремонта ЭГФ существующим и предлагаемым методом:

$$C_{ров_i} = C_{пэгф} \cdot n_{эгф} + C_{рэгф} \cdot m_{эгф} + t_{монт} \cdot C_{монт} \quad (4.19)$$

$$C_{ров_1} = 300 \cdot 4 + 800 \cdot 1 + 2,3 \cdot 1000 = 4300 \text{ руб.}$$

$$C_{ров_2} = 300 \cdot 1 + 800 + 1,7 \cdot 1000 = 2800 \text{ руб.}$$

$$T_{сп_i} = t_{пэгф} \cdot n_{эгф} + t_{рэгф} \cdot m_{эгф} + t_{монт} \quad (4.20)$$

$$T_{сп_1} = 0,17 \cdot 4 + 0,6 \cdot 1 + 2,3 = 4 \text{ ч.}$$

$$T_{сп_2} = 0,5 \cdot 1 + 0,6 \cdot 1 + 1,7 = 2,8 \text{ ч.,}$$

где:  $C_{пэгф}$  и  $n_{эгф}$  – стоимость проверки одной ЭГФ на стенде и их количество, при проверке соответственно;

$C_{рэгф}$ ,  $t_{рэгф}$  и  $m_{эгф}$  – стоимость ремонта, трудоёмкость ремонтных работ одной ЭГФ и их количество в ремонте соответственно;

$C_{монт}$  и  $t_{монт}$  – стоимость нормо-часа работ и трудоёмкость и связанных со снятием/установкой компонентов.

Расчет затрат на запасные части, на одно РОВ, для 1-го АТС (ремонт ЭГФ и расходные материалы), производим по следующей формуле:

$$Z_{зч_i} = C_{рэгф} \cdot n_{эгф} + C_{комп} \cdot m_{комп} \quad (4.21)$$

$$Z_{зч_1} = 800 \cdot 1 + 1800 \cdot 4 = 8000 \text{ руб.}$$

$$Z_{зч_2} = 800 \cdot 1 + 1800 \cdot 1 = 2600 \text{ руб.},$$

где:  $C_{эгф}$  и  $n_{эгф}$  – стоимость одной ЭГФ и их количество соответственно;

Общие затраты, для всего парка за год, на проведение ремонтно-профилактических воздействий, диагностирование и запасные части по каждому из вариантов (до внедрения и после него) определим, как сумму затрат на проведение работ и стоимость заменяемых запасных частей и комплектующих:

$$C_{общ_1} = (C_{ров} + C_{зч}) \cdot n_a \quad (4.22)$$

$$C_{общ_1} = (4300 + 8000) \cdot 35 = 430500 \text{ руб.}$$

$$C_{общ_2} = (2800 + 2600) \cdot 35 = 189000 \text{ руб.}$$

Приведенные затраты  $Z_i$  определяли в соответствии со следующей формулой:

$$Z_i = C_i + E_n \cdot K_i, \quad (4.23)$$

$$Z_1 = 89300 + 0,15 \cdot 0 = 89300 \text{ руб.}$$

$$Z_2 = 119300 + 0,15 \cdot 30000 = 123800 \text{ руб.},$$

где:  $C_i$  – себестоимость изготовления  $i$ -го варианта СТД, руб.;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности (прибыльности) капитальных вложений в новое оборудование (учитывающий процентную ставку кредитования), принимаемый равным  $E_n=0,15$ ;

$K_i$  – капитальные вложения на изготовление  $i$ -го варианта СТД, руб.

ТСД были определены по формуле, руб.:

$$U'_i = C_{зп_i} + C_{тр_i} + C_{топл_i} + C_{нр_i} + C_{общ_i} = \quad (4.24)$$

$$U'_1 = 15731 + 44,7 + 1739,5 + 10987 + 430500 = 459000 \text{ руб.}$$

$$U'_2 = 10487 + 59,5 + 2609,25 + 3590,50 + 189000 = 206106 \text{ руб.},$$

где:  $C_{зп_i}$  – годовые затраты на заработную плату операторов-диагностов, включая расходы, связанные с отчислениями в фонды социального и медицинского страхования и пенсионный фонд, руб.;

$C_{тр_i}$  – затраты на текущий ремонт и содержание диагностического оборудования, руб.;

$C_{э_i}$  – затраты на электроэнергию, руб.;

$C_{топл_i}$  – затраты на топливо, руб.;

$C_{пр_i}$  – прочие накладные расходы, руб.

$C_{обш_i}$  – общие затраты на проведение ремонтно-профилактических воздействий, диагностирования и запасных частей по каждому из вариантов.

Годовые затраты на заработную плату оператора-диагноста вместе с начислениями, руб.:

$$C_{зп_1} = Q_i \cdot T_i \cdot C_{ч} \cdot K_{доп} \quad (4.25)$$

$$C_{зп_1} = 35 \cdot 1,5 \cdot 227 \cdot 1,307 = 15731 \text{ руб.}$$

$$C_{зп_2} = 35 \cdot 0,5 \cdot 227 \cdot 1,307 = 5192 \text{ руб.},$$

где:  $T_i$  – продолжительность диагностирования АТПС одного автомобиля  $i$ -м СТД (с проверкой ЭГФ на стенде), ч.;

$C_{ч}$  – часовая ставка оператора-диагноста, руб./ч.

$K_{доп}$  – коэффициент, учитывающий отчисления в фонды:

$$K_{доп} = K_{соц} \cdot K_{мед} \cdot K_{пенс} \cdot K_{страх} \quad (4.26)$$

$$K_{доп} = 1,029 \cdot 1,051 \cdot 1,2 \cdot 1,007 = 1,307,$$

где:  $K_{соц} = 1,029$  – коэффициент, учитывающий отчисление в фонд социального страхования;

$K_{мед} = 1,051$  – коэффициент, учитывающий отчисление в фонд обязательного

медицинского страхования;

$K_{\text{пенс}} = 1,2$  – коэффициент, учитывающий отчисление в пенсионный фонд;

$K_{\text{страх}} = 1,007$  – коэффициент, учитывающий отчисления на страховые нужды, связанные с особенностями производства.

Затраты на текущий ремонт и планово-техническое обслуживание  $i$ -го диагностического оборудования, руб.:

$$C_{\text{тр}i} = \frac{B_i \cdot K_{\text{тр}}}{100} \quad (4.27)$$

$$C_{\text{тр}1} = \frac{89300 \cdot 0,05}{100} = 44,7 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{тр}2} = \frac{119300 \cdot 0,05}{100} = 59,5 \text{ руб.,}$$

где:  $K_{\text{тр}}$  – коэффициент, учитывающий отчисление на текущий ремонт и содержание  $i$ -го диагностического оборудования.

Затраты на электроэнергию:

$$C_{\text{э}1} = g_1 \cdot T_{\text{э}} \cdot Q_i \quad (4.28)$$

$$C_{\text{э}1} = 0,09 \cdot 3,50 \cdot 35 = 11,03 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{э}2} = 0,09 \cdot 3,50 \cdot 35 = 11,03 \text{ руб.,}$$

где:  $g_i$  – расход электроэнергии на диагностирование одного автомобиля при использовании  $i$ -го СТД, с зарядкой или питанием от сети кВт;

$T_{\text{э}}$  – отпускной тариф, руб/кВт.

Затраты на топливо:

$$C_{\text{топл}1} = g_{\text{топл}1} \cdot T_{\text{топл}} \cdot Q_i \quad (4.29)$$

$$C_{\text{топл}1} = 1 \cdot 49,7 \cdot 35 = 1739,50 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{топл}2} = 1,5 \cdot 49,7 \cdot 35 = 2609,25 \text{ руб.,}$$

где:  $g_{\text{топл}i}$  – расход топлива при диагностировании одного автомобиля при

использовании  $i$ -го СТД, л;

$T_{\text{отп}}$  – отпускной тариф, руб/л.

Прочие накладные расходы:

$$C_{\text{нр1}} = \frac{C_{\text{эп}i} \cdot K_{\text{доп}}}{K_{\text{нр}}} \quad (4.30)$$

$$C_{\text{нр1}} = \frac{15731 \cdot 1,307}{1,89} = 10878,53 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{нр2}} = \frac{5192 \cdot 1,307}{1,89} = 3590,50 \text{ руб.,}$$

где:  $K_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий прочие накладные расходы.

Сопутствующие капитальные отчисления (амортизация):

$$K'_1 = \frac{B_1}{T_{\text{сл1}}} = \frac{89300}{6} = 14834 \text{ руб.} \quad (4.31)$$

$$K'_2 = \frac{B_2}{T_{\text{сл2}}} = \frac{119300}{6} = 19834 \text{ руб.,}$$

где:  $T_{\text{сл}i}$  – средний срок службы  $i$ -го ТСД.

Годовая стоимость диагностирования:

$$C_{\text{д}} = U'_2 \cdot \Pi \cdot Н, \quad (4.32)$$

где:  $\Pi$  – норма прибыли, %;  $Н$  – налог на добавленную стоимость.

$$C_{\text{д1}} = 459000 \cdot 1,2 \cdot 1,2 = 660960 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{д2}} = 206106 \cdot 1,2 \cdot 1,2 = 296793 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект, для парка АТС:

$$\mathcal{E} = \mathcal{Z}_1 + U'_1 + K'_1 - \mathcal{Z}_2 - U'_2 - K'_2 \quad (4.33)$$

$$\mathcal{E} = 89300 + 458992 + 14834 - 123800 - 205736 - 19834 = 213756 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости внедрённого метода диагностики определится как:

$$O = \frac{B_2}{\varepsilon} = \frac{30000}{213756} = 0,14 \text{ г.}, \quad (4.34)$$

где:  $B_2$  – балансовая стоимость комплекта для диагностики внедряемым методом.

В таблице 4.6. представлены сравнительные показатели внедряемого метода по отношению к существующему.

Таблица 4.6. Сравнительные показатели рассматриваемых методов.

| Наименование показателей                           | Обозначение      | Ед. изм. | Показатели, при применении метода ремонтно-обслуживающих воздействий |              | Улучшение показателей, при внедрении предлагаемого метода, % |
|--|------------------|----------|--|--------------|--|
|  |                  |          | Существующий   | Предлагаемый |  |
| 1  | 2                | 3        | 4  | 5            | 6  |
| Трудоемкость РОВ                                   | $t_{\text{ров}}$ | чел-час  | 2,3  | 1,7          | 26,1   |
| Трудоемкость Д                                     | $t_{\text{д}}$   | чел-час  | 3,18   | 0,5          | 84,3   |
| Количество Д исходя из трудоёмкости $t_{\text{д}}$ | $n_{\text{д}}$   | ед.      | 1  | 6            | 84,3   |
| Стоимость РОВ и Д                                  | $C_{\text{ров}}$ | руб.     | 4800   | 1645         | 65,7   |
| Стоимость запчастей                                | $C_{\text{зч}}$  | руб.     | 8000   | 2600         | 67,5   |

#### **4.4.2. Техничко-экономическая оценка результатов исследования в условиях специализированных сервисных предприятий**

Применение разработанного метода и нового оборудования в сервисном предприятии, прежде всего, способствует повышению производительности труда мастера – диагноста, но эффективность работы сервисного предприятия не всегда зависит от производительности. Предприятие может зарабатывать больше, например, ссылаясь на безальтернативность применяемых методов, однако такой подход не всегда однозначен и требует глубокого анализа внешних коммерческих факторов и специфики рынка подобных услуг. Поэтому использование экспресс-диагностики предлагаемым методом имеет ряд специфических вопросов.

Тем не менее, при решении внутрипроизводственных задач сервисного предприятия, снижение трудоёмкости и применение нового оборудования, может быть весьма полезно. Данное утверждение справедливо, например, при возникновении гарантийных случаев, где снижение трудоёмкости особенно актуально для предприятия.

##### **Затраты на гарантийное обслуживание:**

Гарантийные обязательства перед заказчиком составляет 90 дней.

Если в автосервисе был сделан ремонт форсунок и заказчик обратился в гарантийный срок, с какими-либо техническими проблемами, (и если этот случай попадает под гарантийные обязательства исполнителя) автосервис производит повторный ремонт.

Работы, оплачиваемые исполнителям (работникам автосервиса) при гарантийном ремонте:

1. Демонтаж/монтаж форсунок 2000 руб. (стоимость округлена, так как доступ к форсункам на разных автомобилях разная, соответственно и стоимость за работу разная).
2. Проверка форсунок на стенде 300 руб/шт. Чаще всего встречаются двигателя с 4 или 6 форсунками. Для определения точного технического состояния

форсунок проверяются всегда все форсунки. То есть затраты составят от 1200 до 1800 руб.

3. Ремонтные работы ЭГФ 1000 руб/шт. Согласно статистике, в гарантийный период заказчик обращается по причине выхода из строя 1 форсунки (попадание окалины с бака, попадание металлической стружки в сопло распылителя (если было проведение промывочных работ, этот случай считается гарантийным), заклинивание нового распылителя.

Затраты, без учета налогов, на зарплату работникам, осуществляющим гарантийный ремонт, при выходе из строя 1 форсунки в 4х-цилиндровом двигателе, существующим методом:

$$Z_{зп_i} = C_{монт} + C_{пэгф_{ст}} + C_{рэгф}, \quad (4.35)$$

где:  $C_{пэгф_{ст}}$  - стоимость проверки ЭГФ на стенде.

$$Z_{зп_1} = 2000 + 1200 + 1000 = 4200 \text{ руб.}$$

Изначально используя метод диагностики ЭГФ по расходу и давлению топлива в общей обратной магистрали, можно определить техническое состояние каждой форсунки, не снимая их с двигателя. То есть и демонтаж можно будет производить только неисправной форсунки.

В этом случае, затраты на зарплату составят:

$$Z_{зп_2} = C_{пэгф} + C_{монт} + C_{пэгф_{ст}} + C_{рэгф} \quad (4.36)$$

$$Z_{зп_2} = 300 + 500 + 300 + 1000 = 2100 \text{ руб.}$$

Разница в затратах на зарплату составит:

$$Z_{разница} = Z_{зп_1} - Z_{зп_2} \quad (4.37)$$

$$Z_{разница} = 4200 - 2100 = 2100 \text{ руб.}$$

Если же в ходе экспресс-диагностики, проводимой по гарантии предлагаемым методом, выясняются причины, не гарантийного характера, то расхо-

ды составят:  $Z_{\text{зп } 2} = 300$  руб. Тогда разница в затратах, при проведении диагностики сравниваемыми методами, ещё более очевидна:

$$Z_{\text{разница}} = C_{\text{монт}} + C_{\text{пэгф}_{\text{ст}}} - C_{\text{пэгф}} \quad (4.38)$$

$$Z_{\text{разница}} = 2000 + 1200 - 300 = 2900 \text{ руб.}$$

#### 4.5. Результаты и выводы по четвёртой главе

1. Статистическая обработка результатов расчета эксперимента с применением F- критерия Фишера, при доверительной вероятности 95% позволила заключить, что математическая модель адекватно описывает процесс функционирования электрогидравлической форсунки, при износе управляющего клапана в условиях эксплуатации.

2. Выявленные закономерности изменения расхода топлива на управление в общей обратной магистрали и цикловых подач электрогидравлических форсунок от износа управляющего клапана показывают, что на расход и цикловую подачу влияют длительность управляющего импульса  $\tau_e$  и износ, (суммарная площадь неплотностей управляющего клапана  $\mu f_{\Sigma}$ ) по следующим зависимостям:

- для расхода на управление  $b_0 + b_1 \cdot \tau_e + b_2 \mu f_{\Sigma}$ ;
- для цикловой подачи  $a_0 + a_1 \cdot \tau_e + a_2 \cdot \mu f_{\Sigma} + a_3 \cdot (\mu f_{\Sigma})^2 + a_4 \mu f_{\Sigma} \cdot \tau_e$ .

Также установлено, что коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  зависят от давления в топливной рампе на режиме холостого хода.

Полученные закономерности расхода топлива на управление  $Q=f(\mu f_{\Sigma}, \tau_e)$  и цикловых подач  $q=f(\mu f_{\Sigma}, \tau_e)$ , от износа управляющего клапана, легли в основу разработанного метода диагностики электрогидравлических форсунок.

3. Выявлены диагностические параметры  $S_i$ , характеризующие процесс изменения давления в общей обратной магистрали, при изменении технического состояния управляющего клапана. Установлено, что значения  $S_i$  зависят

от порядка работы и расположения форсунок. Для расчётов используется приведённая площадь  $S_{ik}$  – параметр, лишённый зависимости от порядка работы и расположения, полученный с помощью учитывающих эти факторы коэффициентов.

4. Зависимость, для расчёта индивидуального расхода топлива на управление  $Q_i(p_i)$ , реализована на основе коэффициентов  $n_{Q_i}(k_{si})$ , учитывающих взаимосвязь величин  $Q_i$  и  $Q_{icp}$ ,  $S_{ikcp}$  и  $S_{ik}$ .

5. Научно обоснован и разработан метод диагностики электрогидравлических форсунок (защищен патентом РФ № 2672992), позволяющий определять индивидуальный расход на управление каждого инжектора и выявлять форсунки предельного технического состояния. По результатам исследования разработан алгоритм, реализующий данный метод.

6. Экономический эффект при внедрении разработанного метода диагностики электрогидравлических форсунок в условиях АТП достигается за счёт увеличения информативности диагностирования на стадии первичной диагностики (без вмешательства в конструкцию и без нарушения работоспособности двигателя). При этом трудоёмкость диагностики снижается на 84,3%, монтажных работ на 26,1%, затрат на запасные части на 67,5%. Снижение трудоёмкости диагностики позволяет в шесть раз увеличить частоту годового контроля технического состояния ЭГФ, что позволяет минимизировать случаи полного отказа форсунок и прогнозировать их остаточный ресурс. Стоимость ремонтно – обслуживающих воздействий и диагностики для предприятия снижается на 65,7%. Годовой экономический эффект, при внедрении разработанного метода диагностики электрогидравлических форсунок в парке из 35 АТС, составляет 213756 руб.

Экономический эффект 50-69% в сервисных предприятиях достигается так же, за счёт информативности и малой трудоёмкости предлагаемого метода, при проведении гарантийных работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований, изложены новые научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для развития автотранспортной отрасли страны. По итогам выполненной исследовательской работы, сделаны следующие выводы:

1) Разработанная математическая модель процесса функционирования автомобильных электрогидравлических форсунок дизельного двигателя учитывает изменение износа управляющего клапана, в виде суммарной площади неплотностей управляющего клапана  $\mu f_{\Sigma}$ , а также изменения геометрических параметров запорного конуса, в зависимости от режима функционирования (давления в рампе, длительности управляющего импульса, порядка работы и взаимного расположения). Эта модель позволяет аналитически исследовать взаимосвязь диагностических параметров давления и расхода в общей обратной магистрали с изменением технического состояния электрогидравлических форсунок.

2) Выполненные исследования процесса функционирования электрогидравлических форсунок при изменении их технического состояния показывают, что в зависимости от износа управляющего клапана, выражаемого в виде суммарной площади неплотностей  $\mu f_{\Sigma}$ , изменяются цикловая подача и расход на управление. Эти закономерности отражают полученные регрессионные зависимости:

- для цикловой подачи  $a_0 + a_1 \cdot \tau_e + a_2 \cdot \mu f_{\Sigma} + a_3 \cdot (\mu f_{\Sigma})^2 + a_4 \mu f_{\Sigma} \cdot \tau_e$ .

- для расхода на управление  $b_0 + b_1 \cdot \tau_e + b_2 \mu f_{\Sigma}$ ;

где: коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  зависящие от давления в топливной рампе на режиме холостого хода,  $\tau_e$  – длительность управляющего импульса, [мкс].

Выявлены диагностические параметры, характеризующие износ управляющих клапанов электрогидравлических форсунок:

- величина общего расхода на управление;

- параметр  $S_i$ , характеризующий процесс изменения давления в общей обратной магистрали при срабатывании каждой форсунки с учетом порядка работы и расположения.

3) Научно обоснован и разработан метод диагностики электрогидравлических форсунок (защищен патентом РФ № 2672992), позволяющий на основе учета закономерностей формирования давления и расхода топлива в общей обратной магистрали дизельного двигателя, определять индивидуальный расход на управление каждого инжектора и выявлять форсунки предельного технического состояния.

4) Проверка результатов научного исследования в производственных условиях предприятий МУП ИркутскАвтоТранс и в сервисном авторизованном предприятии Delphi и Denso «ВИАН-Дизель» показала, что трудоёмкость диагностики электрогидравлических форсунок предлагаемым методом снижается на 84,3%, трудоемкость монтажных работ на 26,1%, затрат на запасные части на 67,5%. Это позволяет в шесть раз увеличить частоту контроля технического состояния ЭГФ, прогнозировать их ресурс и минимизировать случаи преждевременных отказов форсунок. При этом стоимость ремонтно – обслуживающих воздействий и диагностики снижается на 50-69%.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Автомобильный справочник. Пер. с англ. ООО «СтарСПб» - 3-е изд., перераб. И доп. – М.: ООО Книжное издательство «За рулем», 2012. – 1280 с.: ил.
2. Александров А.В. Методические основы разработки диагностического комплекса для оценки технического состояния автомобильных двигателей. Дисс. канд. техн. наук. 05.04.02. – М.: 2013. – 160 с.
3. Ананьин А.Д. Диагностика и техническое обслуживание машин / [А. Д. Ананьин, В.М. Михлин, И.И. Габитов, А.В. Неговора.]. - Москва: Академия, 2008. – 428 с.: ил.
4. Аринин, И.Н. Диагностирование технического состояния автомобиля / И.Н. Аринин. – М.: Транспорт, 1978. – 176 с.
5. Астахов И.В. Подача и распыливание топлива в дизелях / И.В. Астахов, В.И. Трусков, А.С. Хачиян и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 359 с.
6. Ахметов А.Ф. Повышение эффективности диагностирования и ремонта насос-форсунок автотракторных и комбайновых дизелей. 05.20.03. Дисс. канд. техн. наук. Уфа: 2015. – 134 с.
7. Баширов Р.М. Исследование аккумуляторных топливоподающих систем как фактор дальнейшего повышения технико-экономических показателей дизелей [Текст]: дис. докт. техн. наук. Уфа, 1979. - 463 с.
8. Байтимеров Р.М. Разработка дизельной системы топливоподачи с управляемой формой характеристики впрыскивания с использованием математического моделирования / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 05.04.02. – Челябинск, 2016 –148 с.
9. Блянкинштейн И.М. Научные основы совершенствования технологического оборудования для технического сервиса автотранспортных диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет.

Иркутск, 2013.

10. Богачев, С.А. Электрогидравлическая форсунка с двухпозиционным клапаном / С.А. Богачев, Ю.Е. Хрящев // Известия вузов. Машиностроение. – 2002. – №2-3. – с. 61-75.
11. Валиев А.Р. Повышение эффективности ремонта электрогидравлических форсунок аккумуляторных топливных систем автотракторных дизелей. 05.20.03. Дисс. ...канд. техн. наук. Уфа: 2012. – 163 с.
12. Вахитов Р.А. Анализ неисправностей электрогидравлических форсунок типа Common Rail [Текст]/Габитов И.И., Валиев А.Р., Вахитов Р.А.// Тракторы и сельхозмашины – 2011. – Вып.№11 – стр. 41-43.
13. Вахитов Р.А. Совершенствование технического обслуживания и ремонта форсунок топливных систем CommonRail автотракторных и комбайновых дизелей. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2013. – 16 с.
14. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. – М.: «Колос», 1973 –196 с.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. –М.: «Высшая школа», 1998. –576 с.
16. Врублевский А.Н. Математическая модель быстродействующего электромагнита для топливной системы ДВС. /Врублевский А.Н., А.Л. Григорьев, А.М. Бовда. // Всеукраинский научно-технический журнал «Двигатель внутреннего сгорания».вып 2 2007 с. 138-143
17. Врублевский А.Н. Метод многокритериальной идентификации математической модели топливной системы / А.Н. Врублевский // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов – X., 2009. – Вып 23. – С. 95–99.
18. Врублевский А.Н. Обоснование схемы и выбор параметров топливного насоса для аккумуляторной топливной аппаратуры дизеля / А.Н. Врублевский // «Автомобильная промышленность». Вып. 28, 2011 г., стр. 69-74
19. Врублевский А.Н., Влияние параметров электрогидравлической форсунки на процесс топливоподачи /Автомобильный транспорт, вып. 26, 2010. с. 67-72.

20. Габитов И.И. Улучшение эксплуатационных показателей топливной аппаратуры сельскохозяйственных дизелей путем научного обоснования и реализации в ремонтном производстве технологических процессов, методов и средств диагностирования. Дисс. ... докт. техн. наук. – Спб – Пушкин, 2001 – 323 с.
21. Габитов И.И. Техническое обслуживание и диагностика топливной аппаратуры автотракторных дизелей / И.И. Габитов, Л.В. Грехов, А.В. Неговова. Учебное пособие. – М: «Легион-Автодата», 2008. – 240 с.
22. Говорущенко Н.Я. Диагностика технического состояния автомобилей. - М.: Транспорт, 1970. - 256 с.
23. Голубков Л.Н. Разработка элементов системы управления и исследование аккумуляторной топливной системы с электрогидравлическими форсунками / Л.Н. Голубков, Н.А. Соленов, Д.А. Михальченко, П.В. Душкин // Вестник МАДИ, вып. 3 (30), 2012. – с. 20-27.
24. Горбунова З. В. Экономика отрасли: автотранспортное предприятие : учебное пособие / З. В. Горбунова, В. С. Колчин. - Иркутск: ИРНИТУ, 2016. - 138 с. - КК № 14236.
25. Горбунова З. В. Экономика отрасли: автомобильный сервис: учебное пособие / З. В. Горбунова, В. С. Колчин. - Иркутск: ИРНИТУ, 2016. - 102 с. - КК № 14249.
26. Городецкий К.И. Многопараметровая топливная характеристика дизеля Cummins/ Городецкий К.И., Гольнев В.С., Ершов Е.П., Раскин А.М., Прищепенко А.Н., Шуваев Д.Н // Тракторы и сельхозмашины 2012. № 2. С. 44-47.
27. ГОСТ 24029-80. Категории контролепригодности объектов диагностирования.
28. ГОСТ 25044-81. Техническая диагностика. Диагностирование автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных, строительных и дорожных машин. Основные положения. -М: Изд-во стандартов, 1982, 9 с.
29. ГОСТ 26656-85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования. - М.: Изд-во стандартов, 1986, 15 с.

30. ГОСТ 8.326-78 Метрологическое обеспечение разработки, изготовления и эксплуатации не стандартизованных средств измерения. Основные положения. Переиздан окт. 1984. Введен 01.07.79. - М.: Изд-во стандартов, 1985,- 14 с.
31. Грехов Л.В. Научные основы разработки систем топливоподачи в цилиндры двигателей внутреннего сгорания. Дисс. д-ра техн. наук 05.04.02. М.: 1999. – 375 с.
32. Грехов Л.В. Топливная аппаратура дизелей с электронным управлением. – М.: Легион-Автодата, 2003. – 176 с.
33. Грехов Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с.
34. Гриценко А.В. Разработка методов тестового диагностирования работоспособности систем питания и смазки двигателей внутреннего сгорания (экспериментальная и производственная реализация на примере ДВС автомобилей) Дисс. ... д-ра техн. наук, Челябинск: 2014. – 397 с.
35. Данилов С.И. Диагностирование аккумуляторной топливоподающей аппаратуры дизелей / Данилов С.И., Марусин А.В., Данилов, И.К. // Сборник: Актуальные вопросы применения инженерной науки. Материалы Международной студенческой научно-практической конференции. Министерство сельского хозяйства РФ, Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева. 2019. С. 245-249.
36. Данилов С.И. Анализ неисправностей и устройство диагностирования топливной аппаратуры дизелей сельскохозяйственной техники / Данилов С.И., Марусин А.В // Сборник: Эффективность технической эксплуатации и автосервиса транспортных и технологических машин. Сборник научных статей по материалам III Международной научной конференции. 2017. С. 57-61.
37. Денисов А.С. Особенности разработки интерфейса передачи данных с прибора для диагностирования двигателей внутреннего сгорания на базе микроконтроллера ATMEGA 644 / Денисов А.С., Куверин И.Ю. // Сборник

статей Международной научно-практической конференции: достижения и инновации в науке, технологиях и медицине . Под общей редакцией Г.Ю. Гуляева. 2016. С. 27-30.

38. Джонсон М. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. / Джонсон М., Лион Ф. – М.: Мир, 1981. – 610 с.

39. Денисов А.С. Использование моделирующих программ при разработке средств диагностики дизельных двигателей на базе микроконтроллерных систем /Денисов А.С., Куверин И.Ю. // В сборнике: Совершенствование автотранспортных систем и сервисных технологий Сборник научных трудов по материалам XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 95-летию юбилею доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ Авдонькина Фёдора Николаевича (1923-1996). 2018. С. 172-182.

40. Денисов А.С. Использование пьезоэлектрических датчиков впрыска топлива при разработке средств диагностирования двигателей внутреннего сгорания / Денисов А.С., Куверин И.Ю. // В сборнике: Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств Сборник научных трудов по материалам XIV Международной научно-технической конференции. 2019. С. 388-393.

41. Емельянов Л.А. Развитие комплекса математических моделей дизеля, оснащенного аккумуляторной топливной системой с электронным управлением. 05.04.02. Дисс. ...канд. техн. наук. М: 2007. – 182 с.

42. Ефимов К.В. Оптимизация параметров электрогидравлической форсунки для дизеля с микропроцессорной системой управления. Дисс. ...канд. техн. наук. М: 2004. – 196 с.

43. Ждановский Н.С., Аллилуев В.А., Николаенко А.В., Улитовский Б.А. Диагностика автотракторных двигателей. –Л.: 1977. –264 с.

44. Зенкин Е.Ю. Диагностирование неисправностей топливной аппаратуры системы Common Rail путём измерения расхода топлива в линиях слива / Е.Ю. Зенкин // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов – Х.,

2005. – Вып. 17. – С. 52–54.

45. Зенкин Е.Ю. Методика оценки герметичности электрогидравлической форсунки аккумуляторной системы топливоподачи дизеля. Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 142/2013. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. — Севастополь, 2013. – с. 108-111.

46. Иванов А.М. Основы конструкции современного автомобиля /Иванов А.М., Солнцев А.Н., Гаевский В.В., Клюкин П.Н., Осипов В.И., Попов А.И. – М.: ООО изд. «За рулем», 2012. – 336 с.: ил.

47. Иванов Д.Н. Диагностирование плунжерной пары топливного насоса высокого давления при ремонте на основе динамического режима испытания. Дисс .канд. техн. наук. –СпБ –Пушкин, 2005 -190 с.

48. Исследование методов диагностики дизельных двигателей внутреннего сгорания // Отчет о НИР Ленинградского электротехнического института / Науч. Рук. Морозов С.Ф. –Л.: 1980, -165 с.

49. Катаргин В. Н. Особенности проявления отказов форсунок Common Rail / Катаргин В.Н., Кузнецов С.А., Алябьев Е.В. // В сборнике: Политранспортные системы. Материалы IX Международной научно-технической конференции. Сибирский государственный университет путей сообщения. 2017. С. 419-422.

50. Катаргин В. Н. Структура отказов форсунок топливной системы типа common rail и пути ремонта компонент / Катаргин В.Н., Зеер Г.М., Кузнецов С.А. // В сборнике: Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства. Международная научно-практическая конференция. Сибирский федеральный университет; ред. В. В. Минин. 2016. С. 535-539.

51. Козеев А.А. Повышение эффективности диагностирования инжекторов автотракторных и комбайновых двигателей. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – Уфа, 2010 – 109 с.

52. Колчин А.В. Электронный прибор для диагностирования автотракторных дизелей. // Двигателестроение. –1988, №5 с.20-22.

53. Колчин А.В., Бобков Ю.К. Новые методы и средства диагностирования автотракторных дизелей. – М.: «Колос», 1982 – 111 с.
54. Конрад Райф. Системы управления дизельными двигателями (в кратком изложении). Перевод с нем. ЧМП РИА «GMM-пресс». – М.: ООО изд. «За рулем», 2013. – 232 с.: ил.
55. Конрад Райф. Современные системы впрыска топлива дизельных двигателей. Перевод с нем. ЧМП РИА «GMM-пресс». – М.: ООО изд. «За рулем», 2013. – 176 с.: ил.
56. Коньков А.Ю. Диагностирование технического состояние дизеля в эксплуатации на основе быстропротекающих рабочих процессов. 05.04.02. Дисс. ...д-ра. техн. наук. Хабаровск: 2010. – 414 с.
57. Коньков А.Ю. Способ измерения цикловой подачи топлива в цилиндрах тепловозного дизеля в условиях эксплуатационных испытаний / Коньков А.Ю., Лашко В.А., Яранцев М.В. Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2012. № 1. С. 119-124.
58. Коньков А.Ю. Прибор для диагностирования технического состояния топливной аппаратуры дизеля по давлению в форсуночной трубке / Коньков А.Ю., Петрухин А.О. Информатика и системы управления. 2014. № 2 (40). С. 56-65.
59. Крамаренко Г.В. и др. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов / Под ред. Г.В. Крамаренко. - 2-е изд. - М.: Транспорт, 1983. - 488 с, ил., табл.
60. Кривцов С.Н. Предпосылки применения динамического метода, для диагностики аккумуляторных топливоподающих систем автомобильных дизелей / Кривцов С.Н., Якимов И.В. // сборник 6-ой международной научно-практической конференции, Новосибирск 2015, СибФТИ, с. 342-346.
61. Кривцов С.Н. Модернизация стендов по регулировке ТНВД для работы с системой Common Rail. / Кривцов С.Н., Федотов А.И., Кривцова Т.И. // Автотранспортное предприятие №6 2015. – с. 31-34.
62. Кривцов С.Н. Измерение индуктивности электромагнита, как фактор

повышения качества регулировки электрогидравлических форсунок CommonRail при ремонте // Автомобильная промышленность №7 2015. –с. 9-11.

63. Кривцов С.Н. Динамический метод диагностирования автомобильных дизельных двигателей, оснащенных аккумуляторной топливоподающей системой // Автомобильная промышленность №9 2015. – с. 26-30.

64. Кривцов С.Н. Динамика роста и падения давления топлива в аккумуляторной топливоподающей системе дизеля при его пуске и остановке как диагностический параметр // Автотранспортное предприятие №11 2015 с. 45-48.

65. Кривцов С.Н. Алгоритм диагностирования топливоподающей системы автомобильного дизеля по параметрам динамики нарастания и сброса давления топлива в общей магистрали // Автотранспортное предприятие №12 2015. с. 50-53.

66. Кривцов С.Н. Математическое описание процесса формирования давления топлива в аккумуляторных топливоподающих системах автомобилей с дизельными двигателями // Журнал ААИ №3 2016 с. 38-41.

67. Кривцов С.Н. Обоснование необходимости совершенствования стратегии технического сервиса аккумуляторных топливоподающих систем автомобильных дизельных двигателей // Автотранспортное предприятие №8 2016 с. 44-47.

68. Кривцов С.Н. Методический подход к формированию динамической модели автомобиля с дизельным двигателем, оснащенный аккумуляторной топливоподающей системой // Автомобильная промышленность 2016 №10 с. 24-27.

69. Кривцов С.Н. Экспериментальное исследование влияния технического состояния электрогидравлических форсунок на топливную экономичность автомобиля с дизельным двигателем, оснащенный аккумуляторной топливоподающей системой / Кривцов С.Н., Зимин В.Г., Якимов И.В., Кривцова Т.И. // Труды НАМИ №1 (268), 2017. – с. 29-36.

70. Кривцов С.Н. Методологические основы рационального применения

методов диагностики автомобилей с дизельным двигателем и аккумуляторной топливоподающей системой в технологических процессах их технического обслуживания и ремонта / Кривцов С.Н., Зедгенизов В.Г. // Вестник ИрГТУ №4, 2017 с. 176-187.

71. Кривцов С.Н. Надежность автомобильных электрогидравлических форсунок с пьезоприводом / Кривцов С.Н., Кузакова В.В. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2019. № 10. С. 56-60.

72. Кривцов С.Н. Методологические основы диагностики автомобилей с дизельными двигателями, оснащенными аккумуляторными топливоподающими системами / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук 05.22.10 – Иркутск, 2017 – 441 с.

73. Кузнецов А.Г. Динамическая модель дизеля. Автомобильная промышленность, 2010 № 2. – с. 30-33.

74. Техническая эксплуатация автомобилей: учебник для вузов / Под ред. Кузнецова Е.С. М: Транспорт, 1991. 413 с.

75. Курманов П.В. Совершенствование процесса топливоподачи аккумуляторной топливной системы транспортного дизеля путем повышения быстродействия ЭГФ. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – Ярославль, 2011. – 162 с.

76. Левин М.И. Автоматическая безразборная диагностика дизелей. Информационные аспекты. // Двигателестроение №3, 1986 –с. 25-27; №5, 1986. –с. 34-37.

77. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. (Расчет и элементы проектирования). – М.: изд. «Энергия», 1969. – 64 с.: ил.

78. Лянденбургский В.В. Совершенствование встроенной системы диагностирования автомобилей КамАЗ с использованием мониторинга технического состояния транспортных средств /Лянденбургский В.В., Родионов Ю.В., Рыбакова Л.А. Автотранспортное предприятие. 2014. № 1. С. 51-54.

79. Лянденбургский В.В. Алгоритм поиска неисправностей дизелей / Лянденбургский В.В., Тарасов А.И., Судьев В.В. // Молодой ученый. 2015. № 4 (84). С. 214-217.
80. Лянденбургский В.В. Метод поиска неисправностей автомобилей / Лянденбургский В.В., Экимов П.М., Марущенко С.П., Нефедов М.В., Фахрутдинов И.И. // В сборнике: Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XV Национальной научно-технической конференции. 2019. С. 51-56.
81. Мазинг М.В. О сертификационных испытаниях топливной аппаратуры нового поколения / М.В. Мазинг, Г.Г. Тер-Мкртчян, Е.Е. Старков // Журнал ААИ №3 (92). 2015 – с. 50-53.
82. Марков, В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 376 с.: ил.76.
83. Марков В. А. Физико-химические свойства смесевых дизельных биотоплив с добавками растительных масел и их воспламеняемость / Чайнов Н.Д., Лобода С. С. // Вестник Московского Государственного технического университета им. н.э. Баумана, вып. 4(79), 2018. – с. 115-128.
84. Михальченко Д.А. Дополнение комплекса методов расчета топливоподачи и показателей рабочего цикла дизеля // Вестник МАДИ (ТУ), вып. 4 (19), 2009. – с. 34-39.
85. Мирошников Л.В. Теоретические основы технической диагностики автомобилей: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1976, 126 с.
86. Насос-форсунка с пьезоэлектрическим клапаном. Конструкция и принцип действия. Пособие по программе самообразования 352. Перевод и верстка ООО"ФОЛЬКСВАГЕН ГрупРус", 2005. – 24 с.
87. Неговора А.В. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных дизелей совершенствованием конструкции и технологии диагностирования. Дисс. ... докт. техн. наук. – СПб – Пушкин, 2004 – 323 с.
88. Неговора А.В. Передовые технологии технического обслуживания и

ремонта топливной аппаратуры дизелей / Неговора А.В., Габитов И.И. // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2015. №3 (35). С. 40-44.

89. Неговора А.В., Совершенствование методики испытания топливоподающей системы дизелей / Неговора А.В., Низамутдинов А.И. // Российский электронный научный журнал - 2013г. №1 – с.10 – 13. <http://journal.bsau.ru/1-july/php/>

90. Нигматуллин Ш.Ф. Диагностирование насоса топливной системы типа CommonRail на основе параметрической идентификации колебаний давления в аккумуляторе. Ш.Ф. Нигматуллин, М.М. Габдрахимов, М.М. Валиев // Вестник БГАУ / Vestnik BSAU, 2011, № 4. – с. 64-66.

91. Никитин Е.А., Станиславский Л.В., Улановский Э.А. Диагностирование дизелей. –М.: Машиностроение, 1987 –224 с.

92. Огороднов С.М. Исследование расхода топлива легкового коммерческого автомобиля «ГАЗель NEXT» экспериментальным методом / С.М. Огороднов, А.Н. Тихомиров, Д.В. Шаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 2 (104). С. 131-139.

93. Петровский Д.И. Диагностирование топливной системы высокого давления по амплитудно-фазовым параметрам. Дисс.канд. техн. наук. –М.: 2004, 152 с.

94. Пигарина А.А. Разработка и исследование электрогидравлической форсунки для аккумуляторной системы топливоподачи автомобильных быстроходных дизелей. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Владимир, 2003 – 165 с.

95. Пинский Ф.И. Сравнительное исследование электрогидравлических форсунок автомобильных дизелей / Пинский Ф.И., Полухин Е.Е., Шленов М.И. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2004. № 3-4. С. 21-24.

96. Пинский Ф.И. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания / Пинский Ф.И., Давтян Р.И., Чер-

- няк Б.Я. – М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2001. – 136 с.
97. Пинский Ф.И. Электронное управление впрыскиванием топлива в дизелях. – Коломна: Изд-во филиала ВЗПИ, 1989. – 146 с.
98. Погуляев Ю.Д. Новая система топливоподачи для дизеля, позволяющая управлять давлениями предварительных впрысков и впрысков после основного. / Погуляев Ю.Д., Наумов В.Н., Байтимеров Р.М., Чижов Д.А., Машков К.Ю. // Автомобильная промышленность. 2014. № 12. С.7-9.
99. Погуляев Ю.Д. Расчетное исследование новой системы топливоподачи для дизеля // Погуляев Ю.Д., Байтимеров Р.М., Наумов В.Н. Строительные и дорожные машины. 2014. № 1. С. 25-29.
100. Прохоренко А. А. моделирование гидродинамических процессов в электрогидравлической форсунке дизеля в среде Matlab/Simulink / Прохоренко А.А., Мешков Д.В. // НТУ «ХПИ», 2006.
101. Ритт Х. EDC7 COMMON RAIL Диагностика. / Харалд Ритт, Людвиг Вурст. MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft, 2007. 262 с
102. Сергеев А.Г. Метрологическое обеспечение автомобильного транспорта. М: Транспорт, 1988. -247 с.
103. Системы управления дизельными двигателями. Пер с нем. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. – 480 с.
104. Соснин Д.А. Новейшие автомобильные электронные системы. / Соснин Д.А., Яковлев В.Ф. –М.: Солон-пресс, 2005. -240 с.
105. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений.-Л.: Энергоатомиздат, 1987 –320 с.
106. Статистические методы обработки эмпирических данных. - Рекомендации ВШИИНМАШ. -М.: Издательство стандартов, 1978.
107. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ // Петрович М.Л., Давидович М.И. - М.: Финансы и статистика, 1989. -191 с: ил. (Мат. обеспечение прикладной статистики).
108. Федотов А.И. Диагностика автомобиля: учебник для вузов. Иркутск.: изд. ИрГТУ, 2012. - 468 с.: Ил.

109. Федотов А.И. Методика подготовки магистерских диссертаций: Методическое пособие для выполнения практических занятий. Иркутск.: 2012. - 105 с.: Ил.
110. Федотов А.И. Основы теории эксплуатационных свойств автомобиля: Учебник. Изд-во ИрГТУ, Иркутск. 2016. 288 с.
111. Федотов А.И. Основы научных исследований
112. Фонов В.В. Компоненты перспективных топливных систем аккумуляторного типа с электронным управлением для транспортных дизелей. 05.04.02. М.: 2004. – 198 с.
113. Шатров М.Г. Экспериментальное исследование гидродинамических эффектов в топливной аппаратуре common Rail при многократном впрыскивании / М. Г. Шатров, Л. Н. Голубков, А. Ю. Дунин, П. В. Душкин // Журнал ААИ №2 (97) 2016. – с. 15-17.
114. Юдин М.И. Планирование эксперимента и обработка его результатов: монография / М.И. Юдин. – Краснодар: КГАУ, 2004 – 239 с.
115. Якимов И.В. Функциональные характеристики электрогидравлической форсунки дизельного двигателя, при изменении управляющих и структурных параметров /Якимов И.В., Кривцов С.Н., Кривцова Т.И.//Материалы VII Международной научной конференции ВСГУТУ 2018с. 177-181.
116. Якимов И.В. Устройство для диагностики электрогидравлических форсунок дизеля по расходу и динамике изменения давления топлива в общей обратной магистрали//Сборник II Всероссийской научно-практической конференции ЗабГУ 2018 с.136-142.
117. Якимов И.В. Анализ формирования утечек топлива в электрогидравлических форсунках автомобильного дизельного двигателя / Якимов И.В., Кривцов С.Н. // Вестник ИрГТУ №6 2016 с. 163-168.
118. Якимов И.В. Определение исходных данных для математической модели электрогидравлической форсунки / Якимов И.В., Кривцов С.Н. // Вестник ИрГТУ №8, с. 182-189.
119. Якимов И.В., Кривцов С.Н. Способ испытания приборов высокого дав-

ления топливной системы дизеля на работающем двигателе и устройство для его осуществления, Российская федерация // Патент на изобретение № 2762992.- заявка № 2017119798.- 7.06.2017.

120. Boecking, F. Passenger Car Common Rail Systems for Future Emissions standards / F. Boecking, U. Dohle, J. Hammer, S. Kampmann // / MTZ worldwide. – 2005. – Vol. 66. – №7-8. – P. 14-16.

121. Bosch Diesel Injection Systems. Automotive aftermarket. – R Bosch GmbH, 2007. – 167 ppts.

122. Common Rail System (CRS) Service Manual: General Edition. – Denso Corporation Service Department. Showa-cho, Kariya, Aichi Prefecture, 2008. – 185 pp.

123. Coppo M, Dongiovanni C, Negri C 2007 A Linear Optical Sensor for Measuring Needle Displacement in Common-Rail Diesel Injectors. Sensors and Actuators A: Physical. Volume 134, Issue 2. pp. 366-373.

124. Egger, K. New Common Rail Injection System with Piezo Actuation for Diesel Passenger Cars / K. Egger, J. Warga, W. Klugl // / MTZ worldwide. – 2002. Vol. 63. – №9. – P. 14-17.

125. EP 2 453 1 24 A1 Frankl, Jason. Method of determining injection parameters for an injector. Date of publication: 16.05.2012 Bulletin 2012/20

126. F. Yan, , J. Wang Common rail injection system iterative learning control based parameter calibration for accurate fuel injection quantity control International Journal of Automotive Technology April 2011, Volume 12, Issue 2, pp 149-157

127. Hubertus Günther. Diesel Diagnose. Vogel und Druck GmbH&Co, KG, Würzburg. –2003. – 176 pp.

128. Hummel, K. Third-Generation Common Rail System with Piezo Inline Injectors from Bosch for passenger Cars / K. Hummel, F. Boecking, J. Gross, J. Stein, U. Dohle // MTZ worldwide. – 2004. – Vol.65. –№3. – P. 9-12.

MEACS 2017 IOP Publishing

129. Krivtsov S.N. , Yakimov I.V, Ozornin S.P., Numerical analysis and experimental studies on solenoid, *Materials Science and Engineering* 327 (2018) doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042057
130. Leonhard, R. 2000 bar Diesel Common Rail by Bosch for Passenger Cars /R. Leonhard, J. Warga // *MTZ worldwide*. – 2008. – Vol. 69. – №10. – P. 26-31.
131. Leonhard, R. Pressure-amplified Common Rail System for Commercial Vehicles / R. Leonhard, M. Parche, C. Alvarez-Avila, J. Krauß, B. Rosenau // *MTZ worldwide*. – 2009. – Vol. 70. –№5. – P. 10-15.
132. Leonhard, R. Solenoid Common Rail Injector for 1800 Bar / R. Leonhard, J. Warga, T. Pauer, M. Ruckle, M. Schnell // *MTZ worldwide*. – 2010. – Vol. 71. – №2. – P. 10-15.
133. Luckert, P. The New Four-Cylinder Diesel Engine for The Mercedes-Benz B-Class / P. Luckert, J. Scommers, P. Werner, T. Roth // *MTZ worldwide*. – 2011. – Vol. 72. – №11. – P. 18-24.
134. Mahr, B. Future and Potential of Diesel Injection Systems Future and Potential of Diesel Injection Systems / B. Mahr // *Thermo- and Fluid-Dynamic Processes in Diesel Engines 2*. – Springer-Verlag. – 2004. – P. 5-17.
135. Matsumoto, S. The new Denso Common Rail diesel solenoid injector / S. Matsumoto, K. Date, T. Taguchi, O.E. Herrmann // *MTZ worldwide*. – 2013. –Vol. 74. – №2. – P. 44-48.
136. R. Payri, F.J. Salvador, P. Martí-Aldaraví, J. Martínez-López. "Using one-dimensional modeling to analyse the influence of the use of biodiesels on the dynamic behavior of solenoid-operated injectors in common rail systems: Detailed injection system model." *Energy Conversion and Management* 54.1 (2012): 90-99. Print.
137. Piano, A., Millo, F., Postrioti, L., Biscontini, G. et al., "Numerical and Experimental Assessment of a Solenoid Common-Rail Injector Operation with Advanced Injection Strategies," *SAE Int. J. Engines* 9(1):565-575, 2016, doi:10.4271/2016-01-0563.
138. Pogulyaev Y.D. Detailed dynamic modeling of common rail piezo injector/

- Pogulyaev Y.D., Baitimerov R.M., Rozhdestvenskii Y.V. // *Procedia Engineering* . "International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2015" 2015. C. 93-98.
139. R. Payri, F.J. Salvador, P. Martí-Aldaraví, J. Martínez-López. "Using one-dimensional modeling to analyse the influence of the use of biodiesels on the dynamic behavior of solenoid-operated injectors in common rail systems: Detailed injection system model." *Energy Conversion and Management* 54.1 (2012): 90-99. Print.
140. Schoppe, D. Delphi Common Rail System with Direct Acting Injector / D. Schoppe, S. Zulch, M. Hardy, D. Geurts, R.W. Jorach, N. Baker // *MTZ worldwide*. – 2008. – Vol. 69. – №10. – P. 32-38.
141. Schoppe, D. Servo-driven diesel Common Rail injection system / D. Schoppe, K. Stahl, G. Kruger, V. Dian // *MTZ worldwide*. – 2012. – Vol. 73. – №3. – P. 18-23.
142. Steinparzer, F. The New BMW Four-Cylinder Diesel Engine Part 2: Function and Vehicle Results / F. Steinparzer, W. Mattes, P. Nefischer, T. Steinmayr / *MTZ worldwide*. – 2007. – Vol. 68. – №12. – P. 24-27.
143. Theobald, J. Fuel injection system key component for future emission targets / J. Theobald, K. Schintzel, A. Krause, U. Doerges // *MTZ worldwide*. – 2011. – Vol. 72. – №4. – P. 4-9.
144. US 6,546,912 B2 on-line Individual fuel injector diagnostics from instantaneous engine speed measurements. T. Tuken. Apr. 15, 2003. – 16 pp.
145. US 6,712,045 B1. Engine control for a common rail fuel system using fuel spill determination. James E. McCarthy, Jr., Canton, Mar. 30, 2004 – 13 pp.
146. US 7,317,983 B2 Fuel injection controlling apparatus for internal combustion engine 8.01.2008.
147. US 7,370,638 B2 fuel injection control system ensuring steady balance in pressure in accumulator. Y. Hayakawa. May 13, 2008 - 23 pp.
148. US 7,937,988 B2 Method and device for checking for leakage in a fuel injection valve of an internal combustion engine. 10,2011.

149. US 7,958,779 B2 angular velocity/angular acceleration calculator, torque estimator, and combustion state estimator. T. Nagano et al. Jun. 14, 2011. – 14 pp.
150. US 8,100,344 B2 fuel injector with fuel pressure sensor. J. Kondo et al. Jan. 24, 2012. – 17 pp.
151. US 8,365,585 B2 method to determine the fuel temperature in a common rail injection system. G. Barra et al. Feb. 5, 2013. – 14 pp.
152. US 8,459,105 B2 method for diagnosing fuel injectors. Yong-Wha Kim et al. Jun. 11, 2013 – 13 pp.
153. US 8,459,234 B2 fuel injection device, fuel injection system, and method for determining malfunction of the same. K. Nakata et al Jun. 11, 2013. – 29 pp.
154. US 8,511,275 B2 Method and system for a common rail fuel system. P. Nistler et al. Aug. 20, 2013. – 12 pp.
155. US 2008/0264157 A1 Method and device for cheking for leakage in a fuel injection valve of internal combustion engine. T. Degler et al. Oct. 30, 2008. – 7 pp.
156. US 5,773,716 method and unit for diagnosing leakage of an internal combustion engine high-pressure injection system Pierpaolo Antonioli, Pirossasco; Francesco De Cristofaro, Roberto Imarisio, Carlo Andrea Malvicino, Riccardo Buratti, Jun. 30, 1998 9 pp.
157. US 6,021,758 method and apparatus for engine cylinder balancing using sensed engine speed. David M. Carey; Taner Tuken. Feb. 8, 2000. – 14 pp.
158. US 8,281,768 B2 Method and apparatus for controlling fuel rail pressure using fuel pressure sensor error. Kenneth J. Chinpinski et al. Oct. 9, 2012 – 10 pp.
159. I.V. Yakimov, S. N. Krivtsov, A. S. Potapov, O. A. Svirbutovich, Fuel flow and pressure in common return line as a diagnostic parameter of electro-hydraulic injectors technical state, *Materials Science and Engineering* 632 (2019) doi:10.1088/1757-899X/63.
160. I.V. Yakimov, S. N. Krivtsov, E. V. Bondarenko, A leak detection method for electrohydraulic injectors of diesel engines in operation, *Advances in Engineering Research* 2018/05/21, doi:10.2991/avent18.2018.86.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Приложение 1.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2672992

**Способ испытания приборов высокого давления топливной системы дизеля на работающем двигателе и устройство для его осуществления**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU)*

Авторы: *Кривцов Сергей Николаевич (RU), Якимов Игорь Владимирович (RU)*

Заявка № 2017119798

Приоритет изобретения 07 июня 2017 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 21 ноября 2018 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 07 июня 2037 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев

## Приложение 2.

Скрипт подсчёта импульсов датчика расхода топлива в USB Oscilloscope.

```
// Текстовые константы
sNameStrobChannel = "Канал датчика коленвала";

// запрос параметров у пользователя
// Общие настройки
var Setup = CreateConfigure("Strob Config");
Setup.AddItem(sNameStrobChannel, 1); |
Setup.AddItem("Датчик расхода (значение)", 0.46);
Setup.AddItem("Датчик расхода (ед.измерения)", "мл/имп");
Setup.Configure();
iStrobChannel = Setup.GetValue(sNameStrobChannel);
var coeff = Setup.GetValue("Датчик расхода (значение)");
// Среднее значение сигнала по каналу
fAveStrobValue=AveValueAt(iStrobChannel,NumberOfSamples/2,NumberOfSamples);
// Ищем положительные и отрицательные фронты
for (iStart=1,iStrobCount=0;iStart>0;iStrobCount++)
{
    iStart=SynchByEx(iStrobChannel,0,fAveStrobValue,iStart+1,NumberOfSamples,1,0);
}
// Количество импульсов в два раза меньше чем фронтов
iStrobCount=(iStrobCount-1)/2;
var время = NumberOfSamples/Frequency;
var impmin= iStrobCount*60/время;
var impmin2 = Math.round(impmin*100)/100;
var rashod = coeff*impmin;
// Выводим на экран результат
ReportOut("Время файла: " + время + "\n");
ReportOut("По каналу № " + iStrobChannel + " найдено импульсов : " + iStrobCount + "\n");
ReportOut("Импульсов в мин: " + impmin2 + "\n");
ReportOut("Расход по каналу, мл/мин " + Math.round(rashod*10)/10 );
```

### Основные функции программного обеспечения GT-SUITE., использованного для моделирования исследуемых процессов.

GammaTechnologies является разработчиком GT-SUITE, ведущего программного обеспечения для моделирования систем CAE (англ. Computer-aidedengineering). CAE – общее название для программ и программных пакетов, предназначенных для решения различных инженерных задач: расчётов, анализа и симуляции физических процессов. Расчётная часть пакетов чаще всего основана на численных методах решения дифференциальных уравнений (метод конечных элементов, метод конечных объёмов, метод конечных разностей и др.).

Программная среда представляет полный набор (семь) библиотек:

- Библиотека потоков (любые жидкость, газ или смесь).
- Библиотека акустики (как нелинейная, так и линейная).
- Термальная библиотека (все виды теплопередачи).
- Механическая библиотека (кинематика, динамика тел, частотная область).
- Электрическая и электромагнитная библиотека (схемы, электромеханические устройства).
- Библиотека химии (химическая кинетика)
- Библиотека управления (обработка сигналов)

Используя данные библиотеки, можно создавать точные модели практически любой инженерной системы, включая транспортные средства, двигатели, трансмиссии, общие силовые агрегаты и механические системы, гидравлику, смазку и трение, термическое управление, охлаждение, обработку после доработки и многое другое.

#### 1. Импорт шаблонов в проект.

Для этого переходим в «Меню файла», «Создать», «GT ProjectMap» (.gtm). Это создаст всплывающее диалоговое окно, из которого будут выбраться шаблоны, для каждого типа моделирования. Затем выбрав GT-SUITE или GT-SUITEmp – это тип лицензии, который будет использоваться (рис. ПЗ.1).



Рисунок ПЗ.1. Меню файла.

Из окна шаблонов необходимо выбрать «FuelInjection (англ. Впрыск топлива)» и нажать «Finish (англ. Завершить)» (рис. ПЗ.2).

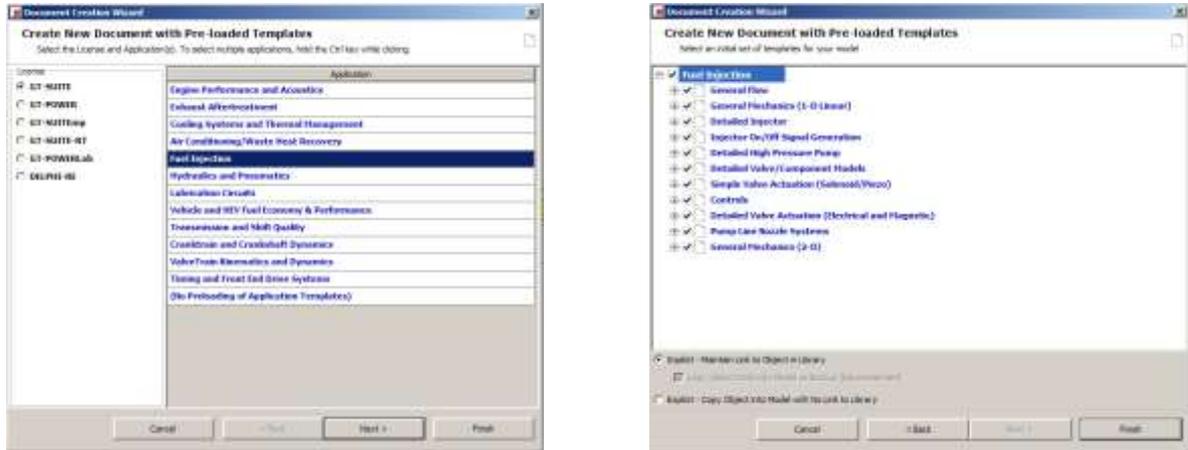


Рисунок ПЗ.2. Окно шаблонов.

После завершения и закрытия окна, программа перейдет в режим моделирования, в котором отображены все необходимые компоненты для построения топливной форсунки. На рисунке ПЗ.3 приведена базовая структура окна GT-ISE.

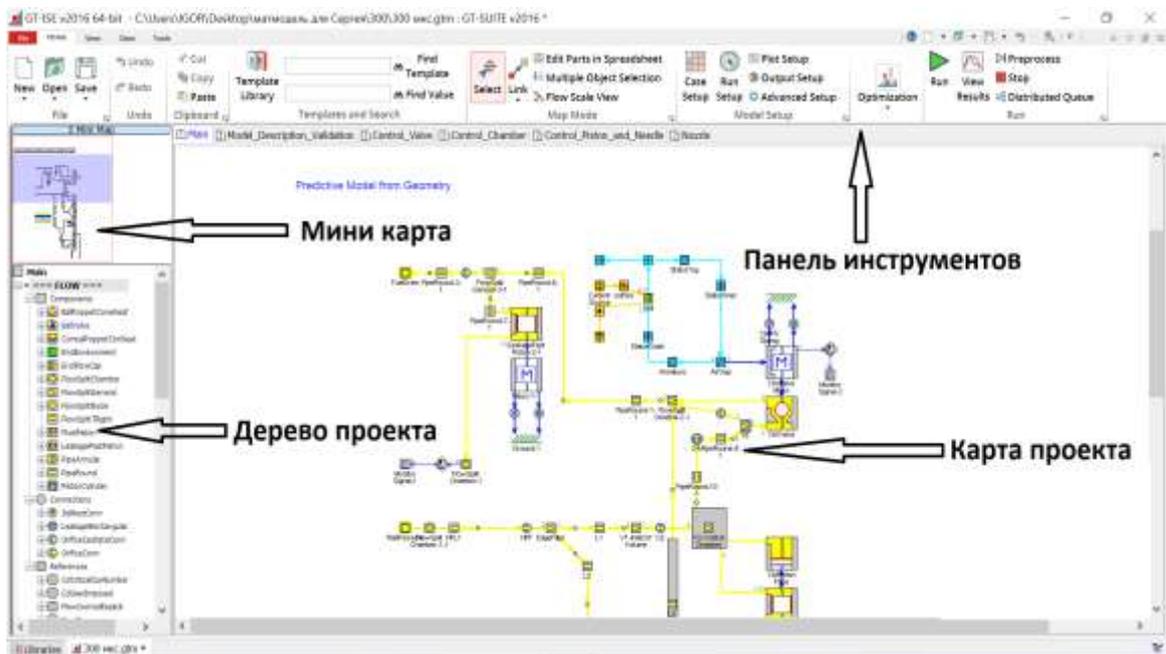


Рисунок ПЗ.3. Рабочее окно GT-SUITE.

Основная идея GT-ISE заключается в том, что предоставляются шаблоны, которые содержат незаполненные атрибуты, необходимые для моделей в коде. Шаблоны определяются как объекты, а когда объекты размещаются на карте проекта, они становятся частями.

После того, как все необходимые шаблоны импортированы, приступаем к моделированию дизельной форсунки системы Common Rail.

## 2. Определение объектов.

Рассмотрим наглядно основные части топливной форсунки и шаблоны, которые используются в моделировании (рис ПЗ.4 - ПЗ.7).

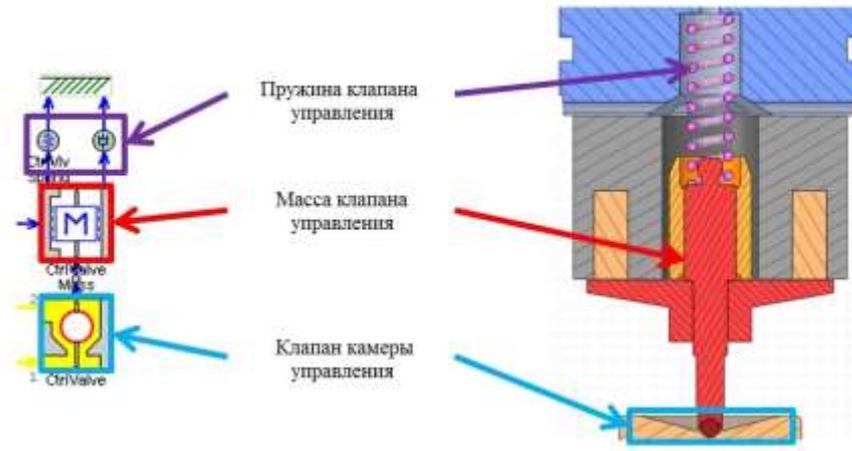


Рисунок ПЗ.4. Клапан управления.

Конструкция клапана управления включает: пружину клапана управления; массу клапана управления; клапан камеры управления.

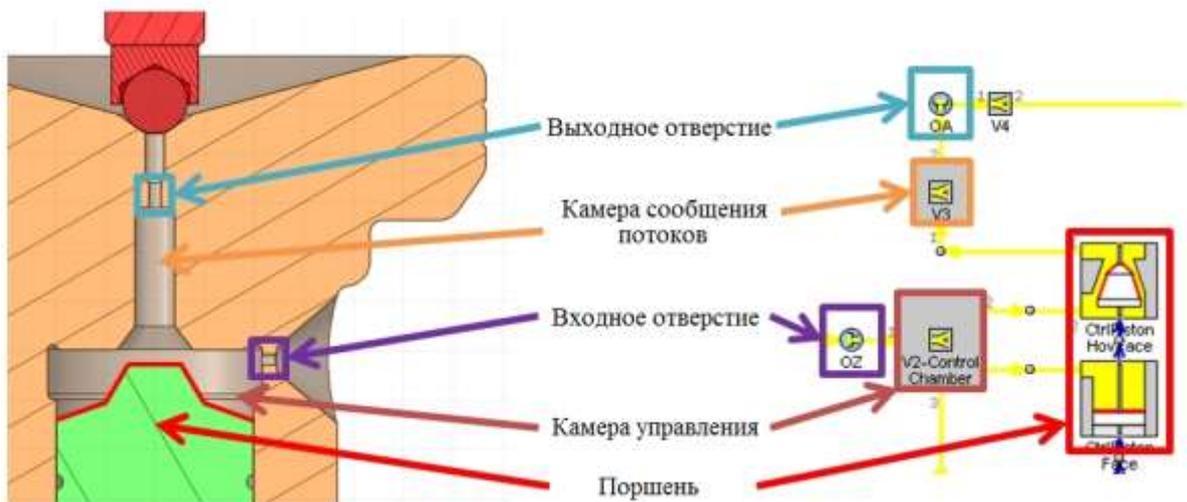


Рисунок ПЗ.5. Камера управления.

Составные части камеры управления: выходное отверстие; камера сообщения потоков; входное отверстие; камера управления; поршень.

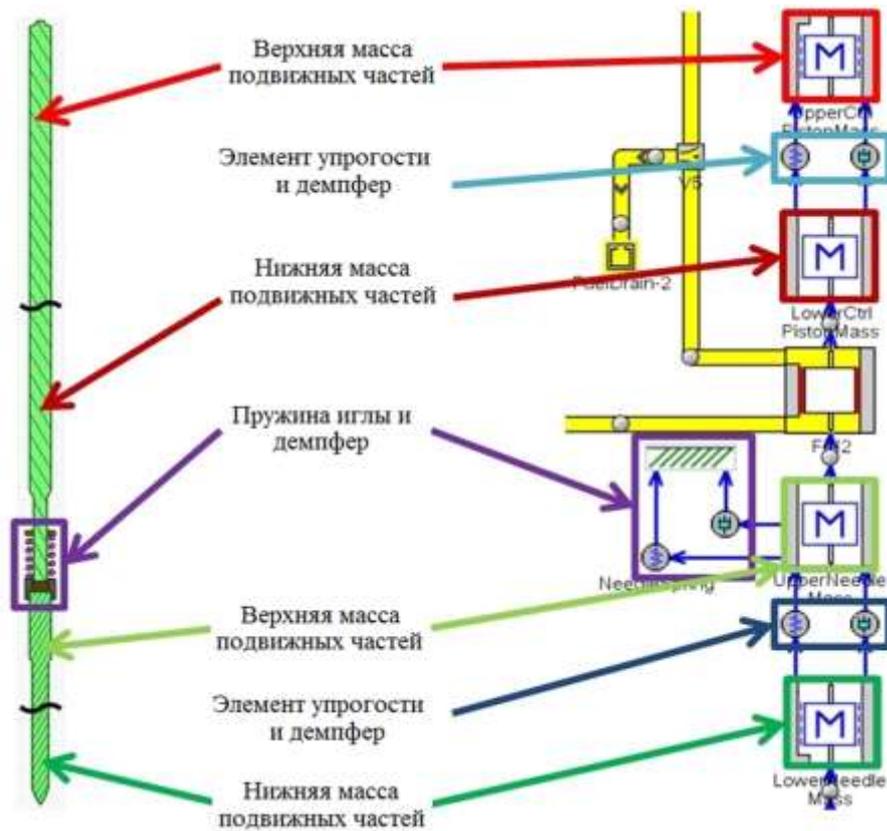


Рисунок ПЗ.6. Управляющий поршень и пружина игольчатого клапана.

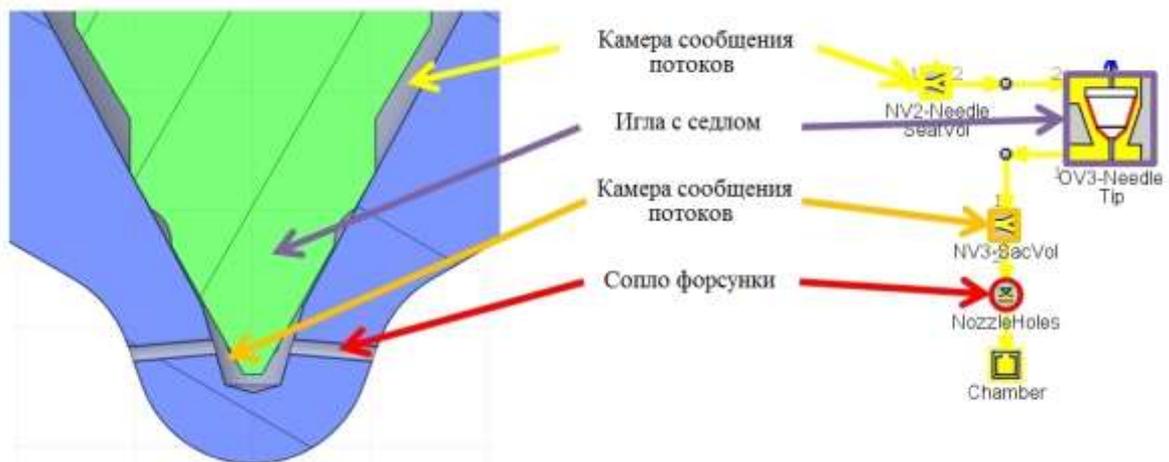


Рисунок ПЗ.7. Распылитель форсунки

Составные части распылителя форсунки: камера сообщения потоков; игла с седлом; сопло форсунки.

3. Размещение компонентов и создание связей между ними.

Далее размещаем элементы из дерева проекта в карту проекта (рис. ПЗ.8):

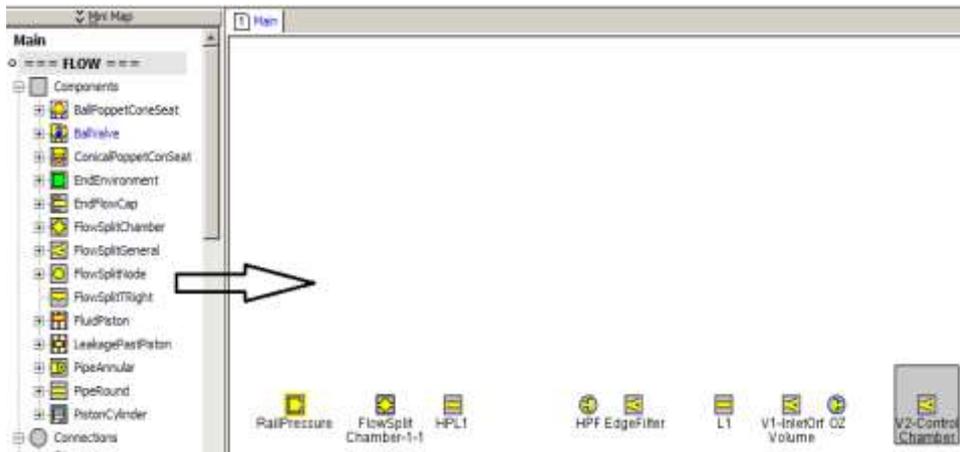


Рисунок ПЗ.8. Размещение объектов на карте проекта.

Для того чтобы соединить между собой компоненты топливной форсунки необходимо на панели инструментов выбрать инструмент «Создать ссылки». Также можно щелкнуть правой кнопкой мыши в пустой раздел на карте и выбрав «Создать режим связи», смотрите (рис. ПЗ.9).

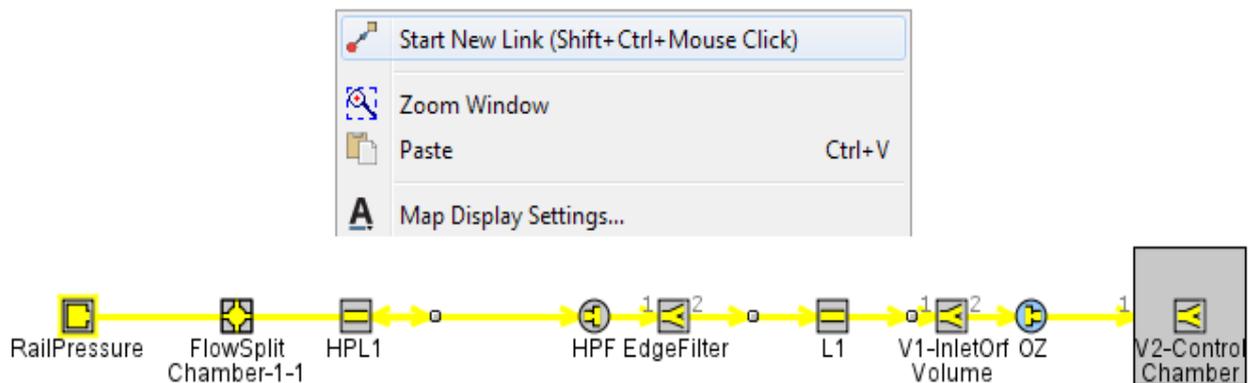


Рисунок ПЗ.9. Создание связей.

После размещения и создания связей между всеми элементами получаем модель топливной форсунки, и далее топливной системы (рис. ПЗ.10).

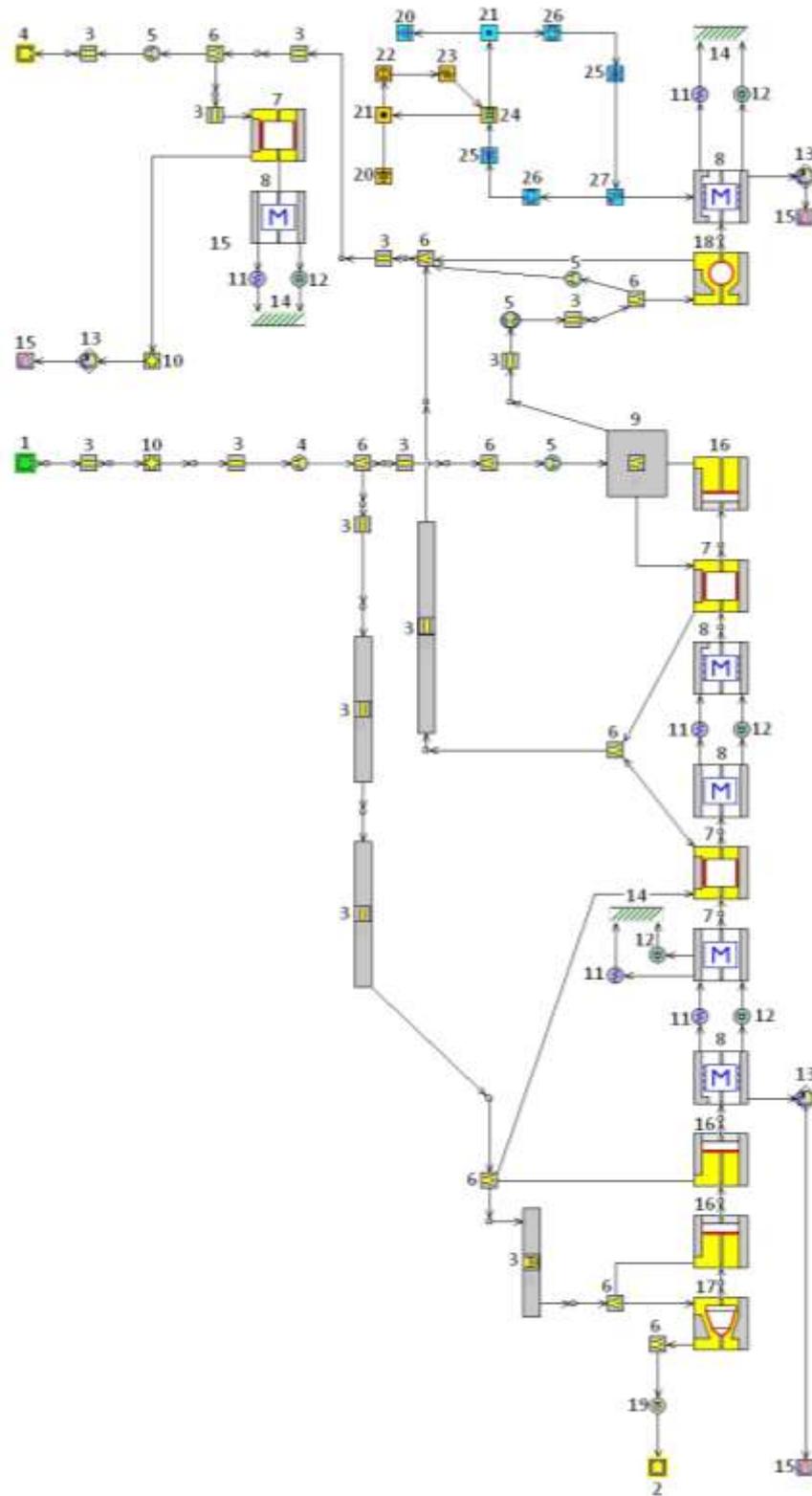


Рисунок ПЗ.10. Структурная схема для моделирования процесса функционирования электрогидравлической форсунки BOSCH 0445110376.

Далее интегрируем модель форсунки в модель топливоподающей системы.

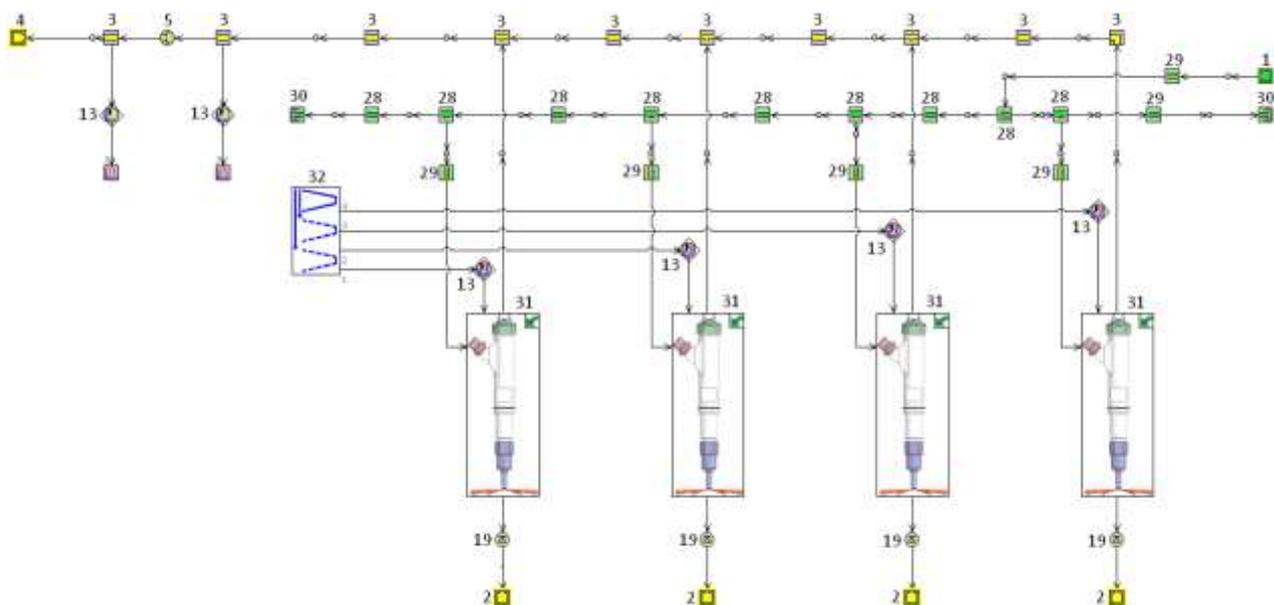


Рисунок ПЗ.11. Структурная схема для моделирования процесса функционирования топливоподающей системы двигателя ISf 2.8 Cummins, автомобиля «Газель-бизнес».

Обозначения к рисункам ПЗ.10 и ПЗ.11:

1. Источник высокого давления; 2. Среда впрыскивания; 3. Трубка; 4. Слив; 5. Проходное сечение; 6. Камера сообщения потоков; 7. Зазор поршня; 8. Масса подвижных частей; 9. Камера управления; 10. Объёмная камера; 11. Элемент упругости; 12. Демпфер; 13. Схематический соединитель; 14. Корпус; 15. Монитор сигнала; 16. Поршень; 17. Наконечник запорной иглы; 18. Клапан камеры управления; 19. Распылитель; 20. Заземление; 21. Электрические соединения; 22. Источник сигнала; 23. Резистор; 24. Катушка; 25. Статор; 26. Якорь; 27. Магнитный зазор; 28. Сегмент; АДТ 29; Трубки высокого давления; 30. Торцевые сегменты; АДТ 31; ЭГФ; 32. Блок управления двигателем.

Для того, чтобы изменить тот или иной параметр элемента форсунки, необходимо воздействовать на интересующий нас элемент путем двойного нажатия левой клавиши мыши. Откроется окно «template» - (англ. шаблон). Пример ввода данных о размере жиклёра представлен на рисунке ПЗ.12.

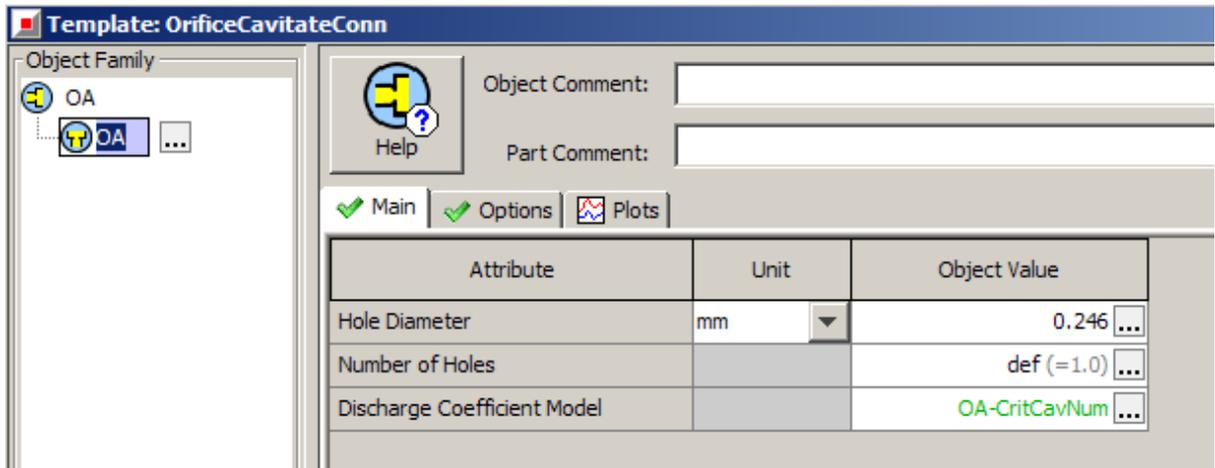


Рисунок ПЗ.12. Выбор параметров проходного сечения.

В этом же окне, во вкладке «Plots» выбираются результаты расчёта – искомые графики и величины (рис. ПЗ.13).

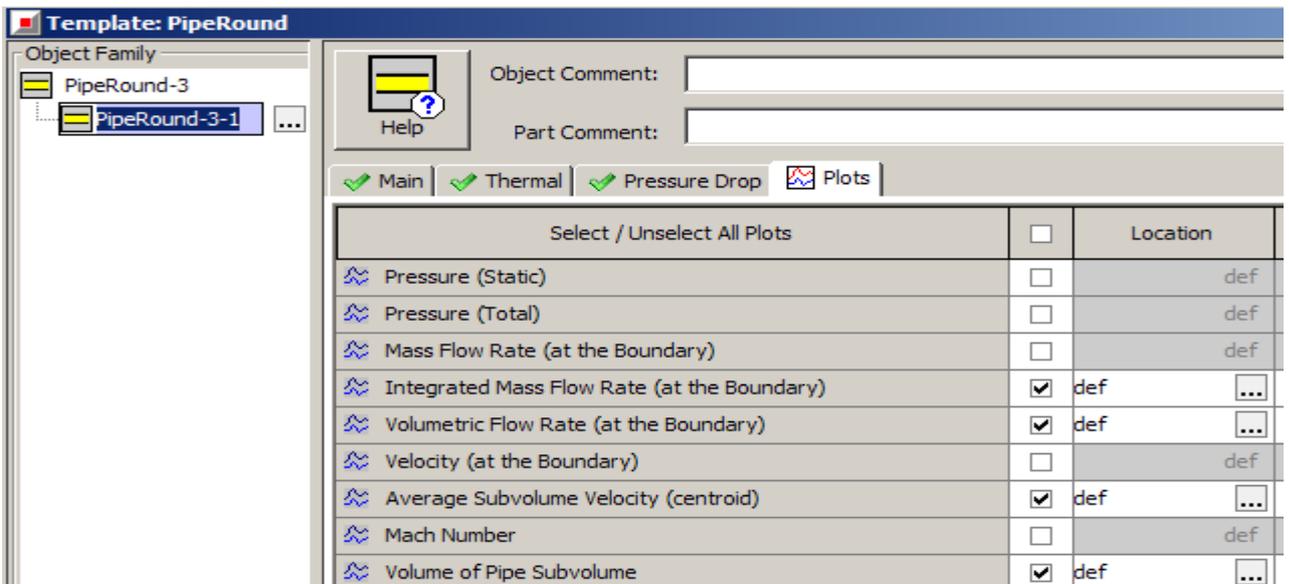


Рисунок ПЗ.13. Выбор результатов расчёта.

Так же можно настроить программу, на расчет одной модели при индивидуальном наборе или изменении каких-либо параметров, например, параметров давления. Для этого дважды нажимаем левой клавишей мыши на интересующий элемент, после чего перейдите в папку «Case» и включите все графики, установив флажок справа от «Выбрать / Отменить выбор всех сюжетов», смотрите рисунок ПЗ.14.

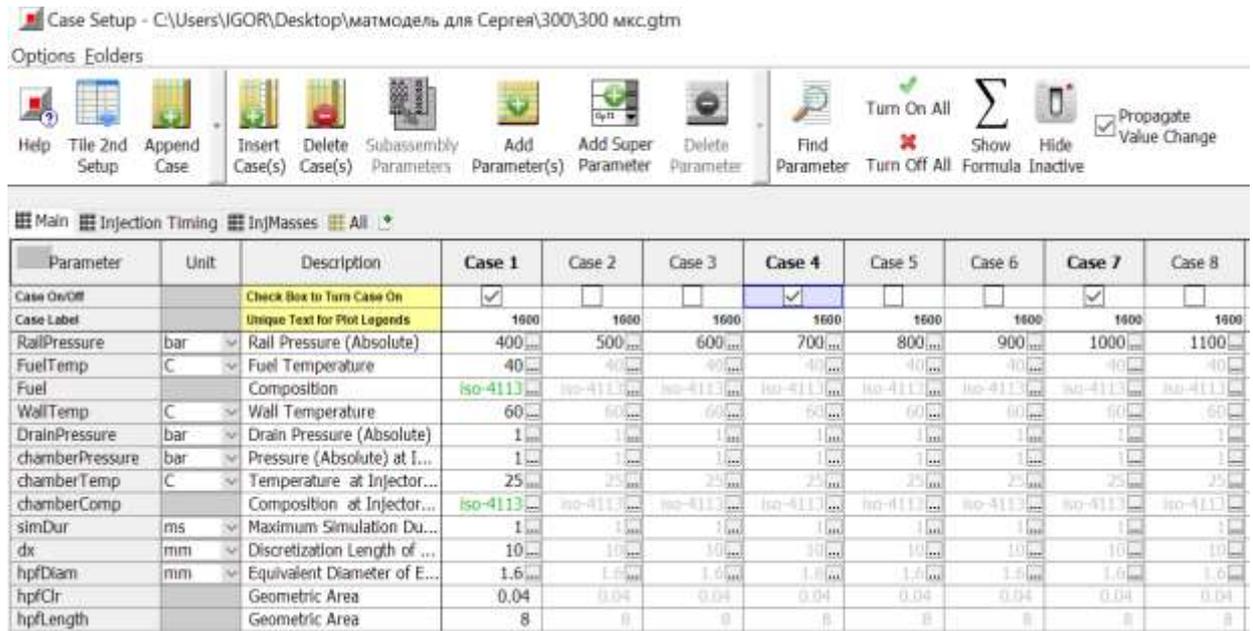


Рисунок ПЗ.14. Выбор моделирования при изменении давления в аккумуляторе.

После того, как модель полностью построена, необходимо ввести информацию для описания типа моделирования и значений, которые должны выводиться по умолчанию, рисунок ПЗ.14.

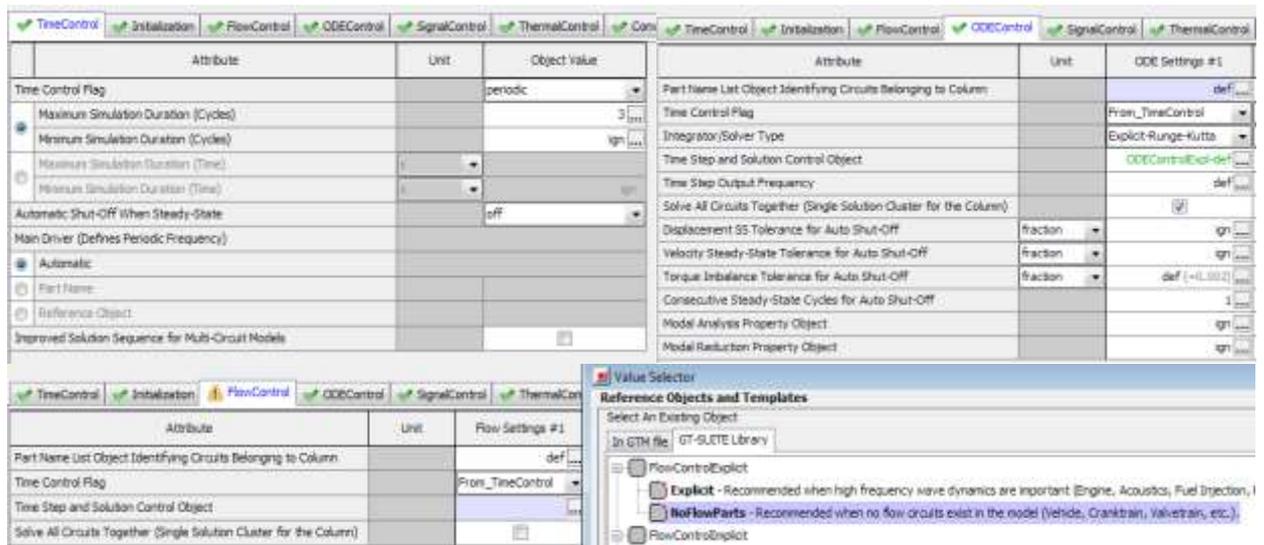


Рисунок ПЗ.14. Выбор способа моделирования и вывода значений «по умолчанию».

Для запуска программы нажимаем кнопку RUN на панели инструментов GT-ISE, подтверждаем процесс симуляции и место сохранения результатов.

Пример симуляции процесса функционирования электрогидравлической форсунки, с показом графиков расчётных величин (рис. ПЗ.15).

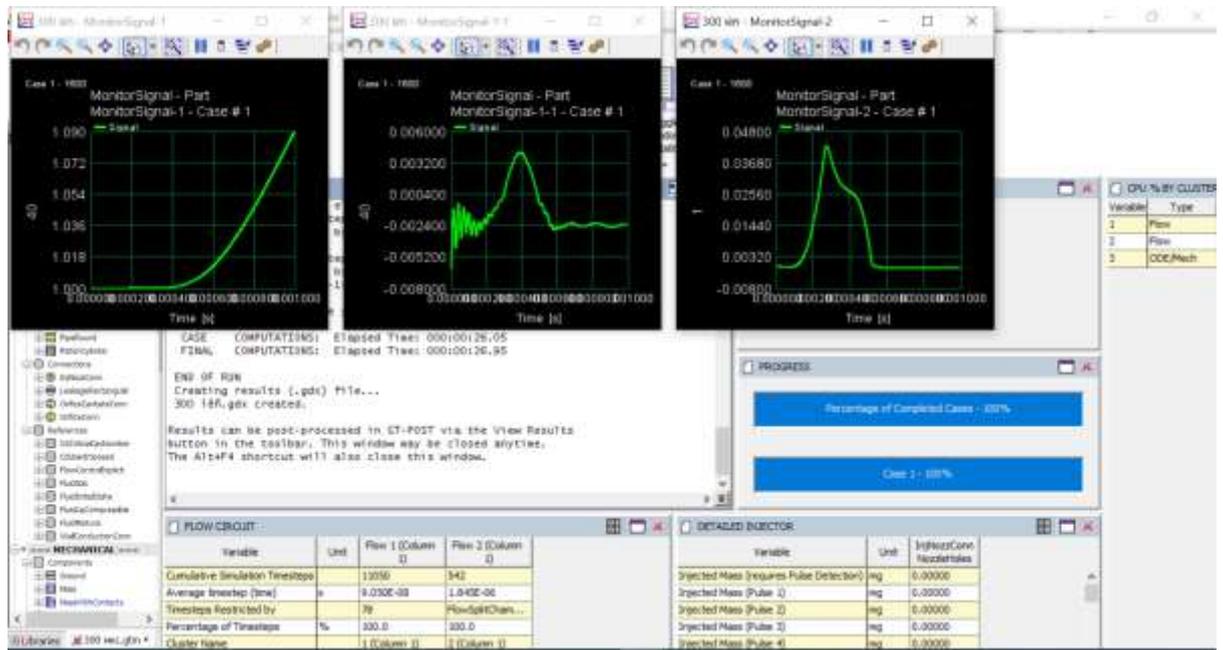


Рисунок ПЗ.15. Рабочее окно процесса симуляции.

Результаты вычислений выводятся кнопкой View Results. В открывшемся окне в дереве проекта, находим интересующие рассчитанные параметры и данные (рис. ПЗ.16).

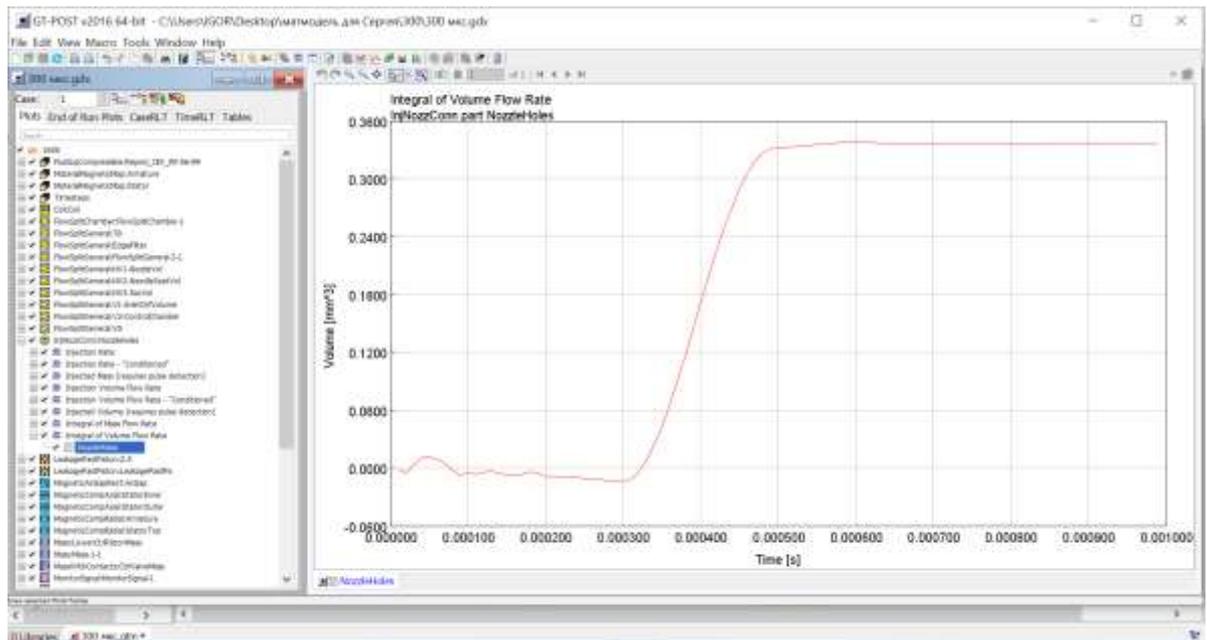


Рисунок ПЗ.16. Окно выбора результатов расчёта.

## Приложение 4.



Муниципальное унитарное предприятие «Иркутскавтотранс» г. Иркутска

Утверждаю

Заместитель директора по техническим вопросам и  
обеспечению производства МУП «ИАТ» г. Иркутска

Алесев Ю.В.

«05 марта» 2020 г.

## АКТ

внедрения результатов диссертационной работы аспиранта кафедры «Автомобильный транспорт», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет Якимов Игорь Владимировича

Мы, нижеподписавшиеся, в лице начальника РММ Хомича А.А., инженера РММ Рудьман Г.П. с одной стороны и представители кафедры «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ИрНИТУ в лице заведующего кафедрой д.т.н., профессора Федотова А.И., д.т.н. Кривцова С.Н. и аспиранта Якимова И.В. составили настоящий акт о том, что результаты научных исследований аспиранта Якимова И.В. внедрены в технологические процессы технического обслуживания и ремонта автобусов с системами питания Common Rail.

В период с 2016 по 2019 гг. в условиях предприятия МУП «ИАТ» г. Иркутска апробированы и внедрены метод и устройство для диагностики электрогидравлических форсунок автомобиля с дизельным двигателем по параметрам давления и расхода топлива в общей обратной магистрали.

Производственная проверка предлагаемой технологии диагностирования технического состояния электрогидравлических форсунок показала, что ее применение на предприятии:

- сокращает время непроизводительных простоев автобусов, за счет снижения трудоемкости определения технического состояния форсунок систем Common Rail на 84%, по сравнению с методами диагностики, используемыми на предприятии;
- сокращает время монтажных работ по системе питания на 26%;
- затраты на запасные части по системе питания на 67,5% за срок службы автобуса;

Применение метода и устройства для диагностики электрогидравлических форсунок автомобиля с дизельным двигателем по параметрам давления и расхода топлива в общей обратной магистрали позволяет получать экономический эффект до 6,2 тыс руб. на одно автотранспортное средство в год.

Представители МУП «ИАТ» г. Иркутска:  
начальник РММ

Инженер РММ

Представители ФГБОУ ИрНИТУ:  
зав. кафедрой «Автомобильный транспорт»,-  
д.т.н., профессор

профессор кафедры «Автомобильный транспорт»  
д.т.н.

Аспирант кафедры «Автомобильный транспорт»



А.И. Федотов

С.Н. Кривцов

И.В. Якимов

## Приложение 5.

**ООО «Виан Дизель»**

664035 г. Иркутск, ул. Рабочего Штаба, д. 31, тел.: 8(3952)61-54-82,  
89021715482,

*e-mail: 38diesel@mail.ru, caim: vian-diesel.ru*

ИНН/КПП 3849068692/384901001 ОГРН 1183850008704 БИК 042520607

Р/сч 40702810918350019087 к/сч. 30101810900000000607 Байкальский банк Сбербанка России г. Иркутск

## АКТ

внедрения результатов научных исследований диссертационной работы  
Якимова Игоря Владимировича

«Метод диагностики электрогидравлических форсунок автомобиля с  
дизельным двигателем по параметрам давления и расхода топлива в общей  
обратной магистрали»

Мы, нижеподписавшиеся в лице директора ООО «ВИАН-Дизель» Варзина В.Н. и аспиранта кафедры ФГБОУ ВО ИРНИТУ Якимова И.В. составили настоящий акт составлен о том, что в период с 2017 по настоящее время в условиях ООО «ВИАН-Дизель» разработаны, апробированы и внедрены в производственный процесс следующие научные разработки:

- Метод диагностики электрогидравлических форсунок автомобиля с дизельным двигателем по параметрам давления и расхода топлива в общей обратной магистрали;

- Устройство для диагностики электрогидравлических форсунок автомобиля с дизельным двигателем по параметрам давления и расхода топлива в общей обратной магистрали.

Внедрение научных разработок диссертационной работы Якимова И.В. позволило установить, что они обладают следующими показателями эффективности:

- информативность проверки электрогидравлических форсунок, имеющих расположение под клапанной крышкой, по индивидуальным утечкам в общем расходе через обратную магистраль повышена на 50... 69%;

- производственная программа выполняемых диагностических работ увеличена на 57% без изменения штата сотрудников.

Аспирант кафедры  
«Автомобильный транспорт»  
ФГБОУ ВО ИРНИТУ

Якимов И.В.

Директор ООО «ВИАН-Дизель»



Варзин В.Н.

## Приложение 6.



УТВЕРЖДАЮ  
 проректор по учебной работе  
 ФГБОУ ВО ИРНИТУ, к.х.н.  
 \_\_\_\_\_ Смирнов В.В.

## АКТ

внедрения результатов диссертационной работы аспиранта кафедры  
 «Автомобильный транспорт» Якимова Игоря Владимировича в учебный  
 процесс ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский  
 технический университет»

1. **Наименование работы:** «Метод диагностики электрогидравлических форсунок автомобиля с дизельным двигателем по параметрам давления и расхода топлива в общей обратной магистрали».
2. **Наименование организации, где осуществляется внедрение:** Научно-образовательное подразделение «Институт Авиамашиностроения и транспорта» ФГБОУ ВО ИРНИТУ, кафедра «Автомобильный транспорт».
3. **Внедренные результаты работы:** метод и устройство для диагностики электрогидравлических форсунок автомобиля с дизельным двигателем по параметрам давления и расхода топлива в общей обратной магистрали.
4. **Заключение:** результаты научных исследований аспиранта Якимова И.В. внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров по дисциплине «Техническая диагностика колесных транспортных средств», направление 23.03.03 – «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»; магистров по дисциплине «Диагностика автомобилей», направление 23.04.03 – «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», профиль «Техническая эксплуатация автомобилей» и аспирантов по дисциплине «Диагностика автомобилей», направление 23.06.01 – «Техника и технологии наземного транспорта», направленность 05.22.10 - «Эксплуатация автомобильного транспорта (Диагностика)».

Заведующий кафедрой

«Автомобильный транспорт»

ФГБОУ ВО ИРНИТУ, д.т.н., профессор

А.И. Федотов

Аспирант кафедры «автомобильный транспорт»

И.В. Якимов