ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра «Эксплуатация и ремонт машин»

Направление подготовки 35.04.06 «Агроинженерия»

Направленность (профиль) «Технический сервис в сельском хозяйстве»

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**на соискание квалификации «магистр»**

**(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

# ТЕМА: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И РЕМОНТА НАСОС - ФОРСУНОК АВТОТРАКТОРНЫХ И КОМБАЙНОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Студент магистратуры _____ Зиатдинов Ф.Г.

Научный руководитель, _____ Вафин Н.Ф.

Рецензент д.т.н., проф. _____ Нуруллин Э.Г.

Обсуждена на заседании кафедры и допущена к защите

(протокол № 8 от 4 февраля 2022 г.)

Зав. кафедрой, д.т.н., профессор _____ Адигамов Н.Р.

Казань-2022

**ФГБОУ ВО Казанский государственный аграрный университет**

**Институт механизации и технического сервиса**

# РЕЦЕНЗИЯ

**на выпускную квалификационную работу**

Выпускника *Зиатдинова Фирзара Гусмановича*

Направление *35.04.06 - Агроинженерия*

Направленность *Технический сервис в сельском хозяйстве*

Тема ВКР *Повышение эффективности диагностирования и ремонта насос-форсунок автотракторных и комбайновых дизелей*

Объем ВКР: текстовые документы содержат: 101 страниц, в т.ч. пояснительная записка 94 стр.; включает: таблиц 19, рисунков и графиков 33, фотографий 5 штук, список использованной литературы состоит из 52 наименований.

1. Актуальность темы, ее соответствие содержанию ВКР *Тема достаточно актуальна и соответствует содержанию.*

2. Глубина, полнота и обоснованность решения поставленных задач *Поставленные задачи обоснованы и решены в полном объеме.*

3. Качество оформления ВКР *Хорошее*

4. Положительные стороны ВКР (новизна разработки, применение информационных технологий, практическая значимость и т.д.) *Повышение эффективности диагностирования и ремонта насос- форсунок автотракторных и комбайновых дизелей путем разработки метода и средств поэлементного их диагностирования с обоснованием допустимых отклонений структурных параметров насос- форсунок от контрольных значений с учетом их наработки. Закономерности влияния отклонений структурных параметров насос- форсунок на их выходные диагностические параметры с учетом их наработки. Разработана методика поэлементного без разборного диагностирования насос-форсунок с электронным управлением с возможностью определения конкретной*

*неисправной детали по данным без разборного диагноза. Результаты исследования. проведенные в данной работе необходимо внедрить ремонтно-обслуживающие предприятия АПК РТ в широких масштабах.*

5. Компетентностная оценка ВКР

| Компетенция | Оценка компетенции* |
|---|---|
| способностью к абстрактному мышлению, анализу, синтезу (ОК-1) | 4 |
| готовностью действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения (ОК-2) | 5 |
| готовностью к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала (ОК-3) | 5 |
| готовностью к коммуникации в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном языке для решения задач профессиональной деятельности (ОПК-1) | 4 |
| готовностью руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия (ОПК-2) | 5 |
| способностью самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения (ОПК-3) | 5 |
| способностью использовать законы и методы математики, естественных, гуманитарных и экономических наук при решении стандартных и нестандартных профессиональных задач (ОПК-4) | 4 |
| владением логическими методами и приемами научного исследования (ОПК-5) | 5 |
| владением методами анализа и прогнозирования экономических эффектов и последствий реализуемой и планируемой деятельности (ОПК-6) | 4 |
| способностью анализировать современные проблемы науки и производства в агроинженерии и вести поиск их решения (ОПК-7) | 5 |
| способностью и готовностью организовать на предприятиях агропромышленного комплекса высокопроизводительное использование и надежную работу сложных технических систем для производства, хранения, транспортировки и первичной переработки | 5 |

| | |
|---|---|
| продукции растениеводства и животноводства (ПК-1) | |
| способностью и готовностью применять знания о современных методах исследований (ПК-4) | 5 |
| способностью и готовностью организовывать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую работу, вести поиск инновационных решений в инженерно-технической сфере АПК (ПК-5) | 5 |
| **Средняя компетентностная оценка ВКР** | 4,7 |

* Уровни оценки компетенции:
***«Отлично»*** – студент освоил данную компетенцию на высоком уровне. Он может применять (использовать) её в нестандартных производственных ситуациях и ситуациях повышенной сложности. Обладает отличными знаниями и умениями по всем аспектам данной компетенции. Владеет полными навыками применения данной компетенции в производственных и (или) учебных целях.
***«Хорошо»*** – студент полностью освоил компетенцию, эффективно применяет её при решении большинства стандартных производственных и (или) учебных задач, а также в некоторых нестандартных ситуациях. Обладает хорошими знаниями и умениями по большинству аспектов данной компетенции.
***«Удовлетворительно»*** – студент не полностью освоил компетенцию. Он достаточно эффективно применяет освоенные знания при решении стандартных производственных и (или) учебных задач. Обладает хорошими знаниями по многим важным аспектам данной компетенции.
***«Неудовлетворительно»*** – студент не освоил или находится в процессе освоения данной компетенции. Он не способен применять знания, умение и владение компетенцией как в практической работе, так и в учебных целях.

6. Замечания по ВКР

*1. В структуре работы следовало объединить разделы 3,4,5, т.к в них представлены материалы, связанные с методикой, оборудованием и результатами экспериментальных исследований.*

*2. Название 2-го раздела дублирует цель исследований, хотя в ней представлены теоретические исследования.*

*3. В разделе 4 желательно было бы привести побольше фотографий.*

*4. Не на все использованные источники имеется ссылка.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рецензируемая выпускная квалификационная работа отвечает (~~не отвечает~~) предъявляемым требованиям и заслуживает оценки *ОТЛИЧНО*, а ее автор *Зиатдинов Ф.Г.* достоин (~~не достоин~~) присвоения квалификации «магистр»

Рецензент:

*д.т.н., профессор* _____ / *Нуруллин Э.Г.* /
*учёная степень, ученое звание* *подпись* *Ф.И.О*

*03.02.2022 г.*

С рецензией ознакомлен*

_____ / *Зиатдинов Ф.Г.* /
*подпись* *Ф.И.О*

*03.02.2022 г.*

*Ознакомление обучающегося с рецензией обеспечивается не позднее чем за 5 календарных дней до дня защиты выпускной квалификационной работы.

# ОТЗЫВ

о работе над магистерской диссертацией магистранта Института механизации и технического сервиса Казанского ГАУ Зиатдинова Ф.Г. на тему: «Повышение эффективности диагностирования и ремонта насос-форсунок автотракторных и комбайновых дизелей».

Актуальность темы магистерской диссертации Зиатдинова Ф.Г. обосновывается исследованиями, проведенными в магистерской диссертации и необходимостью системного изложения накопленных знаний в области диагностирования и ремонта насос-форсунок автотракторных и комбайновых дизелей.

За время работы над диссертацией соискатель умело использовал знания, полученные в университете.

В период обучения и в ходе выполнения магистерской диссертации Зиатдинов Ф.Г. изучил необходимую научно-техническую и специальную литературу по теме своей диссертации. Он овладел методикой проведения экспериментов и методами обработки опытных данных, а также всеми необходимыми компетенциями, предусмотренными ФГОС ВО. Это позволило ему технически грамотно написать магистерскую диссертацию в соответствии с требованиями ЕСНД и ЕСТД.

Считаю, что магистерская диссертация Зиатдинова Ф.Г. соответствует предъявляемым требованиям, а ее автор заслуживает присуждения ему степени магистра по направлению «Агроинженерия».

Руководитель выпускной
квалификационной работы
доцент каф. Эксплуатация и РМ — Н.Ф. Вафин

Ознакомлен с содержанием отзыва _____ / Ф.Г. Зиатдинов /
подпись — Ф.И.О.

«4» февраля 2022г.

# АННОТАЦИЯ

к выпускной квалификационной работе (магистерской диссертации)
Зиатдинова Фирзара Гусмановича на тему:

Повышение эффективности диагностирования и ремонта насос-форсунок автотракторных и комбайновых дизелей

Магистерская диссертация посвящена повышению эффективности диагностирования и ремонта насос-форсунок автотракторных и комбайновых дизелей путем раз- работки метода и средств поэлементного их диагностирования с обоснованием допустимых отклонений структурных параметров насос-форсунок от контрольных значений с учетом их наработки.

Данная работа содержит введение, в котором приводятся актуальность темы, цели и задачи исследований, 5 глав, выводы и рекомендации по результатам исследований и включает _____ страниц машинописного текста, ___ рисунков, ____ таблиц, ____ наименований библиографических источников.

Первая глава посвящена анализ состояния вопроса и постановка задач исследования, в котором рассмотрены Состояние инженерно-технической службы в АПК, методы и средства диагностирования и ремонта ТПС дизелей, труктурные и диагностические параметры насос-форсунки и средства оптимизации рабочего процесса топливоподающей системы дизелей.

Во второй главе приводятся теоретические исследования, в частности, Обоснование объекта исследования ,совершенствование математической модели рабочего процесса насос-форсунок, идентификация разработанной математической модели применительно к насос-форсунке с наработкой.

В третьей главе приводится программа методика проведения экспериментальных исследований.

В четверной главе приведены результаты экспериментальных исследований и технология исследования рабочего процесса насос-форсунки, влияние изменений структурных параметров насос-форсунок на их диагностические параметры.

В пятой главе приводится описание разработки методики и средств диагностирования и оценка эффективности их внедрения в производства.

Работа заканчивается выводами и рекомендации.

**ANNOTATION**

for the final qualifying work (master's thesis)

Ziatdinov Firzar Gusmanovich on the topic:

Improving the efficiency of diagnosing and repairing unit injectors of autotractor and combine diesel engines

The master's thesis is devoted to improving the efficiency of diagnosing and repairing pump injectors of autotractor and combine diesel engines by developing a method and means of their element-by-element diagnostics with the justification of permissible deviations of the structural parameters of pump injectors from control values, taking into account their operating time.

This work contains an introduction, which provides the relevance of the topic, goals and objectives of the research, 5 chapters, conclusions and recommendations based on the results of the research and includes _____ pages of typewritten text, ___ drawings, ____ tables, ____ names of bibliographic sources.

The first chapter is devoted to the analysis of the state of the issue and the formulation of research objectives, which considers the state of the engineering and technical service in the agro-industrial complex, methods and tools for diagnosing and repairing the diesel fuel system, structural and diagnostic parameters of the pump injector and means for optimizing the working process of the diesel fuel supply system.

The second chapter provides theoretical studies, in particular, Substantiation of the object of study, improvement of the mathematical model of the working process of pump injectors, identification of the developed mathematical model in relation to the pump injector with operating time.

The third chapter provides a program methodology for conducting experimental studies.

The fourth chapter presents the results of experimental studies and the technology of studying the working process of the unit injector, the influence of changes in the structural parameters of unit injectors on their diagnostic parameters.

The fifth chapter provides a description of the development of methods and diagnostic tools and an assessment of the effectiveness of their implementation in production.

The work ends with conclusions and recommendations.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ 9
1.1 Состояние инженерно-технической службы в АПК 9
1.2 Методы и средства диагностирования и ремонта ТПС дизелей 13
1.3 Структурные и диагностические параметры насос-форсунки 29
1.4 Средства оптимизации рабочего процесса топливоподающей системы дизелей 34
1.5 Цель и задачи исследования 39
2 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И РЕМОНТА НАСОС-ФОРСУНОК АВТОТРАКТОРНЫХ И КОМБАЙНОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ 41
2.1 Обоснование объекта исследования 41
2.2 Совершенствование математической модели рабочего процесса насос-форсунок 49
2.3 Идентификация разработанной математической модели применительно к насос-форсунке с наработкой 57
3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ 71
3.1 Экспериментальное исследование насос-форсунок по определению характеристики впрыскивания 71
3.2 Обработка экспериментальных данных, оценка погрешностей измерений 81
3.3 Метод экспериментального исследования технического состояния прецизионных элементов насос-форсунки 82

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НАСОС-ФОРСУНКИ 85
4.1 Влияние изменений структурных параметров насос-форсунок на их диагностические параметры 85
4.2 Разработка методики поэлементного диагностирования насос-форсунок 93
5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО 97
5.1 Разработка стенда для испытания насос-форсунок с бесступенчатой регулировкой хода плунжера 97
5.2 Диагностический модуль с программным обеспечением 100
5.3 Определение экономического эффекта предложенных мероприятий 105
ВЫВОДЫ 110
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 112
ПРИЛОЖЕНИЯ 123

# ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Качественное и быстрое выполнение сельскохозяйственных работ сегодня нельзя представить без использования современной автотракторной и мобильной сельскохозяйственной техники. Значительное количество таких машин последнее время оснащаются двигателя- ми с электронноуправляемыми насос-форсунками, при этом техническое состояние насос-

в основном определяют показатели дизеля: мощность, экономичность, дымность и выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Надежность насос-форсунок довольно высока (заявленный ресурс работы составляет около 1 млн. км пробега или 25 тыс. мото-часов), однако опыт эксплуатации показывает, что даже в гарантийный период наблюдаются их отказы, что приводит к вынужденным простоям высокопроизводительнойтехники [8].

В связи со сложной технологией ремонта насос-форсунок, жесткими требованиями к оборудованию и квалификации исполнителей, фирмы-изготовители предоставляют регулировочные данные только авторизованным сервисным центрам. Существующие технологии диагностирования и дефектовки насос-форсунок разработаны исключительно иностранными производителями агрегатов, которые жестко ориентируются на требования, установленные для новых изделий даже в процессе ремонта агрегата, не имеют понятия текущего ремонта и навязывают полную замену всех ответственных дета-лей при обслуживании насос-форсунки.

В то же время известно, что в процессе эксплуатации насос-форсунки ее заводские регулировки и допуски существенно изменяются, причем до определенного предела это не оказывает заметного влияния на выходные показатели работы дизеля. К тому же слишком завышенные требования к узлам в процессе сборки и регулировки насос-форсунок приводят к необоснованным заменам еще работоспособных деталей, что существенно

увеличивает стоимость ремонта. Проведение качественного ремонта насос-форсунок сдерживается отсутствием широкодоступных и понятных технологий ремонта, а также недорогогоспец. инструмента.

В этой связи, в условиях повсеместного импортозамещения, для ремонт- ных подразделений в агропромышленном комплексе представляет значительный интерес разработка новых, научно обоснованных методов диагностирования и ремонта насос-форсунок, а также разработка новых технических средств их испытания, не требующих авторизации у производителей агрегатов и учитывающих реальное техническое состояние каждого элемента системы питания.

**Степень разработанности.** Анализ современных теоретических исследований, связанных с изучением процессов, происходящих в процессе эксплуатации топливных систем, показал, что они не в полной мере учитывают влияние естественных износов отдельных элементов на показатели работы системы в целом. Вследствие этого, корректировка математических моделей процесса работы насос-форсунок, находящихся в эксплуатации и имеющих нара- ботку, а также совершенствование устройств, позволяющих производить диагностику насос-форсунок, является востребованной задачей.

**Цель исследований.** Повышение эффективности диагностирования и ремонта насос-форсунок автотракторных и комбайновых дизелей путем разработки метода и средств поэлементного их диагностирования с обоснованием допустимых отклонений структурных параметров насос-форсунок от контрольных значений с учетом их наработки.

**Объект исследования**. Технологии и средства диагностирования насос-форсунок автотракторных и комбайновых дизелей.

**Предмет исследования**. Закономерности влияния отклонений структурных параметров насос-форсунок на их выходные диагностические пара- метры с учетом наработки.

**Научная новизна**.

- на основе анализа конструктивных схем насос-форсунок с электронным управлением выявлены наиболее значимые структурные параметры и установлены взаимосвязи между ними и показателями работы насос-форсунки в целом;

- получены аналитические выражения для определения утечек в прецизионных сопряжениях и изменений усилия электромагнита при нарушении воздушного зазора, позволяющие повысить достоверность гидродинамического расчета процесса топливоподачи насос-форсункой путем учета износовее элементов в процессе эксплуатации;

- установлены функциональные зависимости диагностических параметров насос-форсунок от фактического состояния её конструктивных элементов;

- разработана методика поэлементного без разборного диагностирования насос-форсунок с электронным управлением с возможностью определения конкретной неисправной детали насос-форсунки по данным без разборного диагноза.

Новизна разработанных алгоритмов обработки данных, полученных при диагностировании подтверждена свидетельством на регистрацию программыдля ЭВМ № 2013618532.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

- научно обоснованы допустимые отклонения конструктивных и регулировочных параметров насос-форсунки сельскохозяйственного дизеля DC11.03 впроцессе эксплуатации;

- разработаны программный продукт и автоматизированный диагностический модуль, позволяющие проводить диагностику воздушного зазора электромагнита насос-форсунки без демонтажа ее с двигателя;

- разработана методика без разборного диагностирования технического состояния прецизионных элементов насос-форсунок с электронным управлением;

- разработан стенд для испытания насос-форсунок, позволяющий

проводить бесступенчатую регулировку величины хода плунжера для разных моделей, испытываемых насос-форсунок.

# 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Состояние инженерно-технической службы в АПК

Сокращение объемов производства сельскохозяйственной продукции прямо связано со снижением уровня технической оснащенности сельских товаропроизводителей и усугубляется отсутствием должной системы технического сервиса как техники целиком, так и отдельных ее агрегатов по всему основному перечню сельхозмашин и оборудования. Анализ технического сервиса топливоподающих систем дизелей показал, что на сегодняшний день не обеспечивается должное качество их технического обслуживания в ремонтных предприятиях топливоподающей системы и на сервисных станциях. Это, прежде всего, объясняется тем, что для технического обслуживание современной, чаще импортной техники, требуется наличие высококвалифицированных специалистов, специализированного инструмента, оборудования и оснастки, которые в большинстве случаев выпускаются за рубежом. В связи с конструктивным многообразием применяемых систем, большой проблемой является оснащение необходимой технической документации, технологических карт ТО и ремонта. В крупных агрохолдингах и машинно-технологических станциях, где в основном эксплуатируются зарубежные машины, нету должной производственной базы технического обслуживания и ремонта топливоподающей системы, не хватает высококвалифицированных сервисных инженеров, в связи с этим увеличиваются вынужденные простои гарантийных комбайнов и тракторов по вине сервисной службы дилеров.

В работах [20,22,40,43,56,77] раскрыты особенности ремонта и технического обслуживания топливоподающей системы сельхозтехники. В России эксплуатация зарубежной сельскохозяйственной техники имеет ряд особенностей. Во-первых, в связи с большей технической и технологической надежностью наблюдается высокая наработка сельскохозяйственных машин за сезон, это обусловлено, прежде всего, интенсивным их использованием, в

связи с недостаточным количеством техники в хозяйствах, большим набором убираемых культур и длительной продолжительностью уборочных работ.

Во-вторых, для правильной организации и эффективного проведения ТО и ремонта препятствует многомарочность приобретаемой зарубежной сельскохозяйственной техники. В связи с этим следует отметить, что нередко устанавливаются различные модели силовых агрегатов даже в сельскохозяйственной техники одной модели, и, как следствие, увеличивается номенклатура узлов и агрегатов, например, топливоподающих систем. Устанавливаемая в дизелях топливная аппаратура фирм Bosch, Delphi и Denso отличается между собой технологией регулировки, конструктивной и необходимой оснасткой используемой при техобслуживании и ремонте[43].

В-третьих, технико-экономический анализ состояния ремонтных предприятии и опыт эксплуатации современных топливоподающих систем показывает, что наиболее качественное техобслуживание и ремонт сложных отечественных и зарубежных топливоподающих систем обеспечивается только в специализированных предприятиях по техническому сервису топливоподающих систем.

В-четвертых, качественный технический сервис топливоподающих систем должно осуществляться только высококвалифицированными специалистами с использованием соответствующей информационной поддержкой и современного оборудования.

В-пятых, на сегодняшний день в России система технического сервиса импортных мобильных сельскохозяйственных машин и тракторов находится на высоком уровне. Несмотря на достаточно развитую сеть дилерских предприятий, они имеют невысокую эффективность. Так как недостаточно развита их производственная база ремонта и ТО, наблюдаются частые как простые, так и сложные отказы сельскохозяйственных машин после третьего сезона их службы, вследствие этого объем ремонтных работ существенно возрастает [43].

Инженерно-техническая служба (ИТС) сельскохозяйственных предприятий представляет собой стержень системы управления производством, а уровень еѐ организации во многом определяет эффективность применяемой в производстве современной техники и технологий.

Чтобы оценить эффективность работы инженерных подразделений, необходимо проанализировать уровень использования машинно-тракторного и автомобильного парков предприятия. Машинно-тракторный парк (МТП) является основой механизации в растениеводстве и его надѐжность и эффективность использования определяют себестоимость производимой продукции и еѐ качество. Повышение надѐжности МТП на данный день является приоритетной задачей, но еѐ решение большинство специалистов представляет в виде комплекса мер, которые практически не затрагивают вопрос совершенствования инженерных служб предприятий и системы их инженерно-технического обеспечения. Без данного шага проблема надѐжности МТП решаться не может, так как новая техника будет поступать в среду, условия которой не позволят реализовать потенциальные возможности машин и рационально управлять их эксплуатацией[34].

В настоящий момент технический сервис в АПК не имеет технического оснащения, которое позволяло бы производить технический сервис современных топливоподающих систем[43]. Старая система инженерно-технического обеспечения в АПК уже не может производить диагностику и ремонт современных топливоподающих систем, так как современные конструкции сельскохозяйственных машин отличаются значительно от старой техники наличием различных электронных компонентов, гидро и электроуправляемых и других сложных агрегатов и узлов, требующих дорогостоящего оборудования и технологий. Переход на обслуживание у дилеров затрудняется высокой ценой заменяемых узлов и агрегатов и принятой концепций неполного использования ресурса техники. Оплачивать дилерам весь объѐм сервисных работ в ближайшее время может очень малое число сельхозтоваропроизводителей. В этой связи, как основы управления качеством

технического состояния различных систем, роль диагностирования в системе технического сервиса значительно повышается.

Перспективный вариант инженерной службы технического сервиса со специализированными участками предполагает такую еѐ структуру и материальное обеспечение, при которой будут не только высокие производственные показатели, но и возможность специалистов постоянно анализировать технологические процессы, искать их резервы с применением современных информационных технологий. Здесь остро стоит вопрос разработки моделей информационного обеспечения инженерных служб, автоматизированных рабочих мест для инженеров, формирования внутрихозяйственных баз данных и специализированных компьютерных программ для работы с ними.

На сегодняшний день можно выделить три основных варианта организации специализированного технического сервиса в агробизнесе:

- Собственные сервисные структуры сельхозпредприятий;

- Сервисные организации районного и регионального уровней, оставшиеся на базе бывших предприятий «Сельхозтехники»;

- Коммерческие предприятия, осуществляющие материально-техническое снабжение и сервисное обслуживание на правах дилера завода-изготовителя.

Развитие системы технического сервиса топливоподающих систем приведѐт к значительному увеличению номенклатуры ремонтных работ, выполняемых сельхозпредприятиями. Круг вопросов, решаемых ИТС данных предприятий, несколько изменился, и сместился от задач организации обслуживания и материального снабжения к задачам оперативного управления технологическими процессами, выбора ресурсосберегающих технологий, анализа производства и разработки перспективных вариантов его модернизации[44].

Переход к специализированному техническому сервису топливоподающих систем практически означает разделение технической и производственной эксплуатации технологических систем сельхозпредприятия (машин-

но-тракторный парк, автопарк и др.). В нашей стране этот вопрос является актуальным уже почти 15 лет[57].

Развитие специализированных участков в техническом сервисе приведѐт к сокращению затрат на сервисное обслуживание парка, вследствие чего сократится простои техники. Широкий перечень вопросов использования и обслуживания техники будет в дальнейшем оставаться в круге задач ИТС сельхозпредприятий или их объединений.

Исходя из выше изложенного можно сделать следующие выводы: одним из направлений работы дилерских сетей является реализация запасных частей. Поэтому дилерские сети не заинтересованы в ремонте агрегатов, им проще заменить агрегат на новый, что зачастую является очень дорогостоящим предложением для сельхозтоваропроизводителей.

Ремонт современных топливоподающих систем в АПК требует использования нового оборудования и технологий ремонта. Чтобы получать техническую и организационную поддержку у заводов производителей топливоподающих систем необходимо авторизоваться, то есть необходимо дополнительно вкладывать денежные средства. Это делает ремонт топливной аппаратуры неприемлемой для предприятий сельского хозяйства. Поэтому разработка новых методов и средств для диагностики и ремонта современных топливоподающих систем является актуальной. При разработке новых технологий диагностики и ремонта современных топливоподающих систем необходимо уйти от тест-планов заводов изготовителей, упрощать их и делать доступными для широкого их пользования в определенных пределах[33].

## 1.2 Методы и средства диагностирования и ремонта ТПС дизелей

При определении технического состояния топливной аппаратуры дизелей можно применять различные методы диагностирования, которые распределятся по признакам используемого физического процесса.

Диагностирование ТПС виброакустическим методом. Процесс впрыскивания топлива сопровождается формированием в различных местах системы топливоподачи виброакустических сигналов, вызываемых как перемещениями подвижных деталей ТПС (иглы форсунки, нагнетательного клапана, муфты привода, деталей привода плунжера), так и волнами давления топлива в линиях низкого и высокого давлений.

Вибродиагностика форсунок - апробированный метод оценки их технического состояния . То же самое можно отнести и к топливным насосам высокого давления. Метод развивается как в приложении к ТПС, так и в смежных областях техники.

Достаточно полную информацию о динамике иглы форсунки в процессе впрыскивания топлива имеют максимальные виброускорения форсунки, возникающие при подъеме и посадке иглы распылителя. Так, скорость подъема и посадки иглы распылителя составляет 1,6…2,2м/с . Перемещение иглы с такой скоростью, ударный характер ее подъема и посадки вызывают интенсивное соударение и формирование вибрационных импульсов, регистрируемых вибродатчиком, устанавливаемым на торец форсунки.

Между давлением начала впрыскивания и максимальными виброускорениями форсунки, возникающими при подъеме и посадке иглы распылителя, существует линейная связь. Уменьшение давления начала впрыскивания, происходящее в условиях эксплуатации, увеличивает амплитуду вибросигнала, возникающего при ударе иглы распылителя о корпус форсунки, и уменьшает амплитуду вибросигнала, возникающего при посадке иглы распылителя .

С введением нормативов на выбросы вредных веществ с отработавшими газами дизелей охват этим методом диагностирования существенно

расширяется. Вместе с тем по результатам диагностирования сложно судить о конкретном дефекте в ТПС и количественных характеристиках параметров технического состояния топливной аппаратуры.

К числу наиболее популярных методов изучения и диагностирования работы ТПС относятся гидравлические методы и, в первую очередь, метод измерения давления в нагнетательном трубопроводе (у насоса или у форсунки). Его главное и несомненное достоинство - измерение параметра, непосредственно связанного с интенсивностью и особенностями впрыскивания. С использованием дополнительной информации и расчетных методов этот сигнал позволяет точно рассчитывать важнейшие показатели подачи для данной системы. К достоинствам метода также относят и допустимую для задач диагностики сложность монтажа датчика, которая при использовании накидных пьезопленочных датчиков фирм AVL, Kistler становится минимальной .

В большинстве предложенных методик диагноз базируется на сравнении измеренной диаграммы давления с эталонной, в результате чего делается более или менее обоснованный вывод об имеющейся неисправности ТПА.

Автоматизация постановки диагноза позволяет повысить достоверность, трудоемкость работ и снизить требования к квалификации исполнителя. Однако для создания такой системы диагностики требуется создание формализованных достоверных диагностических моделей. Они должны базироваться не на эталонной кривой, а на полях допусков, неизбежных в условиях реального производства и эксплуатации. Вместе с тем создание такой диагностической модели - весьма трудоемкий и дорогостоящий процесс. Математическое моделирование процесса подачи топлива для конкретной ТПС позволяет сделать эту задачу более реальной.

ратуре автотракторных и комбайновых дизелей возможности реализации метода не оценивались.

Разнообразие диагностических средств представлено в классификационной схеме (табл.1.1), отражающей их различие по назначению, степени автоматизации измерений, спектру решаемых задач, конструктивным особенностям и др.

Таблица 1.1. Классификация средств диагностирования ТА

| Классифицирующие признаки | Средства диагностирования |
|---|---|
| Степень автоматизации | Механизированные; автоматизированные; автоматические |
| Назначение и приспособленность к диагностированию элементов ТА | Устройства и приборы для измерения отдельных параметров или узлов; стенды для испытаний ТПС; сиагностические системы и мотор-тестеры; |
| Исполнение | Переносные; передвижные; стационарные; бортовые; часть общей системы управления работой дизеля |
| Состояние объекта диагностирования | Используемые при: нефункционирующем объекте; функционирующем объекте; тестовых воздействиях на объект; любых состояниях объекта |
| Характеристика информации по диагностируемому объекту | Количественная оценка; качественная оценка; количественная и (или) качественная оценка с прогнозированием состояния |
| Адаптивность | Все операции диагностирования проводятся с участием оператора (мастера-наладчика); настройка параметров и режимов диагностирования производится оператором; самонастраивающиеся |
| Спектр решаемых задач | Информация о состоянии, прогнозирование и рекомендации, формирование базы данных для автоматической настройки и управления работой ДВС |

Вместе с рассмотренными методами продолжают применяться и совершенствоваться старые методы частичного диагностирования ТПС: подключение к форсунке через тройник тарированной испытательной форсунки (максиметра)

Наиболее современной из отечественных разработок в этой области является компьютерная диагностическая система «Автомастер».

Для диагностирования ТПС комплекс оборудован газоанализатором (дымомером), стробоскопом, накидным пьезопленочным датчиком фирмы AVL. Характеристика давления топлива в линии нагнетания, получаемая при диагностировании и выведенная на экран монитора, может сравниваться с эталонными кривыми. Вместе с тем этот комплекс, как и все рассмотренные выше, позволяет производить оценку только одной линии нагнетания за один цикл измерений, не обеспечивает выдачу конкретных данных по ресурсу и вероятному дефекту. В связи с конструктивными особенностями диагностируемых ТПС (особенно зарубежных) иногда не удается подсоединиться к требуемой точке диагностирования.

Измерение параметров ТПС при неустановившихся режимах считается перспективным направлением оценки технического состояния регуляторов ТНВД. Решение указанной задачи может быть существенно облегчено при применении электронных средств и ЭВМ в процессах измерения и обработки информации, при определении точек внешней скоростной и регуляторной ветвей характеристики ТНВД и измерении мгновенных значений параметров топливоподачи и числа оборотов вала насоса .

Авторы отмечают, что сам процесс диагностирования занимает 15...20% от общего времени. Так производственная проверка технологии диагностирования тракторов автоматизированными установками показала, что на присоединение и отсоединение датчиков и переходных устройств из-за низкой приспособленности тракторов затрачивается до 80% общего времени диагностирования машины. На установление режима диагностирования объекта и непосредственное измерение диагностических параметров затрачивается 10... 15%. На фиксацию результатов и прогнозирование оста- точного ресурса — 5...6% отведенного времени .

Для оценки технического состояния ТПС применяются различные методы диагностирования (таблица 1.2)[62], применяемые в соответствии с зада-

чами диагностирования. При проверке работоспособности элементов ТПС используют методы диагностирования, выявляющие (без указания места и причины) определенную совокупность отказов и повреждений (снижение давления впрыскивания, нестабильность параметров топливоподачи и т.д.).

Таблица 1.2 Классификация методов диагностирования АТПС

| Классификационные признаки | Методы диагностирования |
|---|---|
| Задачи диагностирования | Проверка работоспособности; проверка правильности функционирования; поиск дефектов |
| Применение диагностических средств | Органолептические; инструментальные |
| Характер измерения параметров | Прямой; косвенный |
| Периодичность диагностирования | Регламентный; заявочный; непрерывный |
| Условия проведения диагностирования | Полевые; станция ТО; безмоторные; |
| По степени разборки объекта диагностирования | Разборная; безразборная |
| Режим работы объекта | При установившемся режиме; при неустановившемся режиме; при статодинамическом режиме |
| Диагностические параметры | Параметры рабочего процесса; параметры сопутствующих процессов; структурные параметры |
| Используемый физический процесс | Виброакустический; магнитоэлектрический; спектрографический; тепловой; гидравлический; газоаналитический; кинематический; другие |

При проверке правильности функционирования узла диагностирование направлено на определение совокупности дефектов технологических регулировок и настроек, вызывающих недопустимое снижение технико-экономических и экологических показателей. При поиске дефектов методы диагностирования позволяют выявить место, вид и причину дефекта (износ плунжерных пар, цикловой подачи, расхода на управление и т.д.). По степени

разборки объекта диагностирования методы подразделяются на разборные и безразборные.

Разборные методы применяются при оценке подвижности плунжерной пары, иглы распылителя, измерения износа различных деталей ТПС. Методы безразборной диагностики, как правило, основаны на косвенных измерениях структурных параметров при установке датчиков или диагностических устройств снаружи диагностируемого объекта без снятия его с дизеля или на стенде для испытания ТПС.

По диагностическим параметрам все методы делят на три группы в зависимости от того, характеризует ли измеряемый параметр рабочий процесс всей ТПС или ее составной части, сопутствующий процесс работы, или непосредственно структурный параметр детали или сопряжения деталей.

Методы диагностирования по параметрам рабочих процессов позволяют проверять выходные показатели ТПС (давление топлива в линии высокого давления, ход иглы распылителя форсунки и т.п.) и многочисленные технические характеристики ее составных частей (фазовые параметры топливоподачи и давления, скорость перемещения иглы, расход и др.). Обычно точность измерения этих параметров достаточно высока, так как в большинстве случаев осуществляют прямое измерение контролируемой физической величины.

Физический процесс характеризуется изменением физической величины во времени. В основе гидравлического — давление; теплового — температура; виброакустического — амплитуда колебаний на определенных частотах и т. д.

Основной недостаток методов диагностирования топливной аппаратуры с помощью механических средств – неизбежное их вмешательство в нормальное функционирование систем питания. Помимо этого, производимая частичная разборка может отрицательно сказываться на работоспособности элементов ТПС.

Электронные автоматизированные системы создают условия для решения проблемы диагностирования на принципиально новой индустриальной основе, то есть выполнение почти всех операций технического диагностирования блоками электронной установки с выдачей конечного результата о составе объекта в виде «годен», «негоден», «норма», «меньше нормы», «больше нормы», категории качества и т.п. При этом процесс диагностирования ТПС может осуществляться непрерывно по заданной оптимальной программе в определенной закономерной последовательности.

Для проверки прецизионных элементов топливной аппаратуры авторами предлагается устройство для диагностирования прецизионных пар топливного насоса и форсунок дизеля (рисунок 1.1). При диагностировании прецизионных элементов с помощью предложенного устройства ее поочередно подсоединяют к узлам дизельной топливной аппаратуры и нагнетают топливо в полость этого элемента, и по времени падения давления определяют техническое состояние этого элемента без его демонтажа с двигателя.

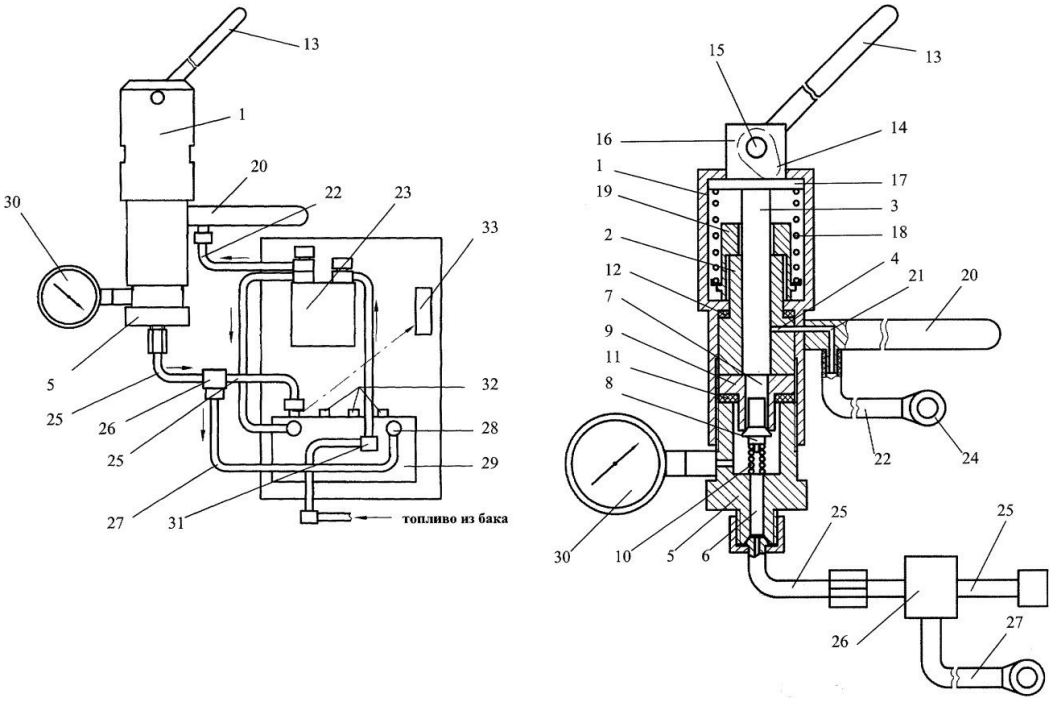



Рисунок 1.1 Устройство для диагностирования прецизионных пар топливного насоса и форсунок дизеля

1- плунжерный насос; 2- корпус-втулку; 3- плунжер; 4- радиальный ка- нал; 5- полый штуцер; 6- канал высокого давления; 7- полость нагнетания (надплунжерное пространство); 8- нагнетательный клапан; 9- седловина; 10- пружина; 11,12- уплотнительные шайбы; 13- привод плунжерного насоса; 14- кулачковый элемент; 15- вал; 16- щечки; 17- упорная шайба; 18- пружину; 19- упорная втулка; 20- рукоятка; 21- внутренний канал; 22-всасывающий трубопровод; 23- топливный фильтр; 24- присоединительный штуцер; 25- нагнетательный трубопровод (рукава); 26- предохранительный клапан; 27- сливной трубопровод; 28- сливная полость; 29- ТНВД; 30- манометр; 31- помпа; 32- штуцеры; 33- форсунка.

Авторами предлагается стенд для испытания насос-форсунок иформсунок дизельных двигателей (рисунок 1.2), который имеет возможность диагностирования, как форсунок, так и насос-форсунок как с механическим, так и с электронным управлением, а также обеспечить приемлемую точность

определения контролируемых параметров при невысокой трудоемкости работ.

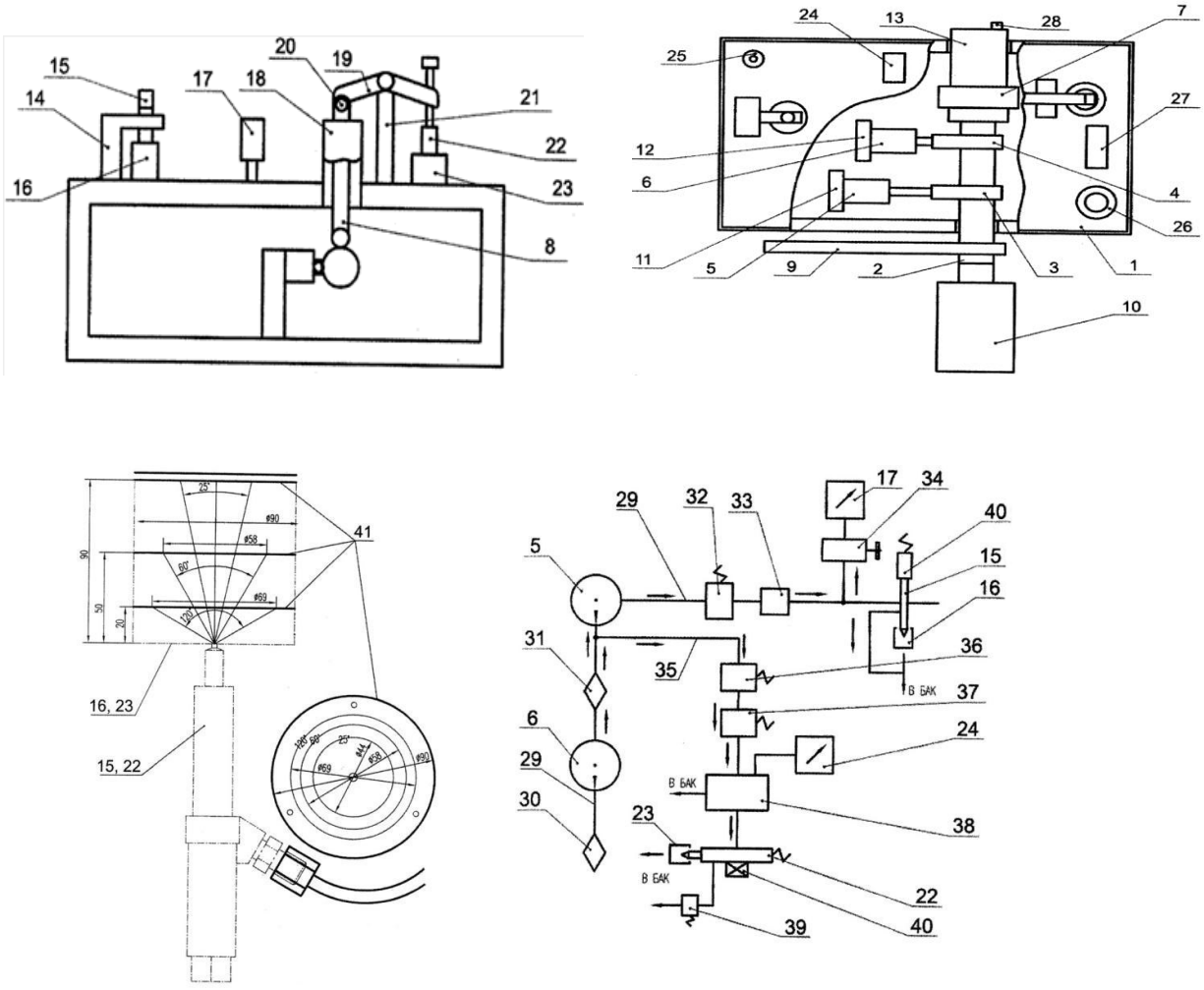



Рисунок 1.2 Стенд для испытания насос-форсунок и форсунок дизельных двигателей

1-корпус; 2- приводной вал; 3,4,7- кулачки; 5- топливный насос плунжерного типа; 6- подкачивающий топливный насос; 8- нижний конец толкателя; 9- ручной рычаг; 10- электродвигатель; 11,12,14- кронштейны; 13- втулке; 15- форсунка; 16- камера впрыска; 17- манометр (датчик давления); 18- направляющая втулка; 19- коромысла; 20- датчик силы; 21- верхний конец стойки; 22- испытываемая насос-форсунка; 23- камера впрыска; 24- манометр (датчик давления); 25- щуп; 26- крышка заливного отверстия для топлива; 27- терминал (индикатор); 28- контакт электросхемы; 29- основная гидролиния; 30- магнитный фильтр; 31- фильтр тонкой очистки; 32- нагнетательный клапан; 33- гидроаккумулятор; 34- кран; 35-

дополнительная гидролиния; 36- сливной клапан; 37- нагнетательный клапан; 38- гидроаккумулятор; 39- сливной клапан; 40- соленоидный клапан; 41- экран.

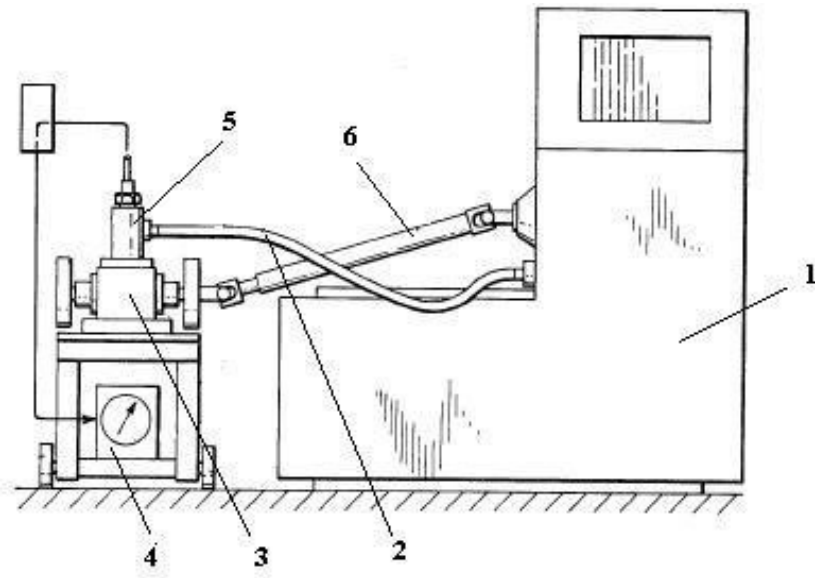



Рисунок 1.3 Cam-Box для испытания насос-форсунок [95]

1-стенд для регулировки топливной аппаратуры; 2-гидролиния низкого давления;3- Cam-Box для испытания насос-форсунок; 4манометр; 5-фиксатор насос-форсунки; 6- приводной вал.

Фирма Berman, Aisenberg & Platt разработала устройство для диагностирования насос-форсунок (рисунок 1.3). Привод кулачкового вала осуществляется непосредственно от стенда для регулировки топливной аппаратуры. Насос-форсунка жестко фиксируется в Cam-Box, который предназначен для привода плунжера насос-форсунки в движение. Данное устройство не позволяет диагностировать насос-форсунки с разным ходом плунжера и насос-форсунки с электронным управлением.

### 1.3 Структурные и диагностические параметры насос-форсунки

В ТПС с насос-форсунками различают структурные и диагностические параметры . Элементы насос-форсунки, относящиеся к структурным параметрам (износ, зазор), непосредственно характеризуют техническое состояние конкретных элементов узла. При определении технического состояния

ТПС с насос-форсунками, ее диагностические параметры, в основном, косвенно характеризуют структурные параметры элементов, т.к. зависят от них. В процессе диагностирования определяемый прямым измерением структурный параметр одновременно выступает как диагностический параметр.

В процессе диагностирования основной задачей является выбор конкретных неисправностей и определение текущих значений структурных параметров, при нарушении которых насос-форсунка теряет работоспособность. Вывод о состоянии насос-форсунки делается исходя из эталонных или нормативных значений.

На рисунке 1.1 приведена схема структурных элементов и конструктивно-регулировочных параметров ТПС с насос-форсунками дизелей, по отношению к которым может производиться диагностирование.

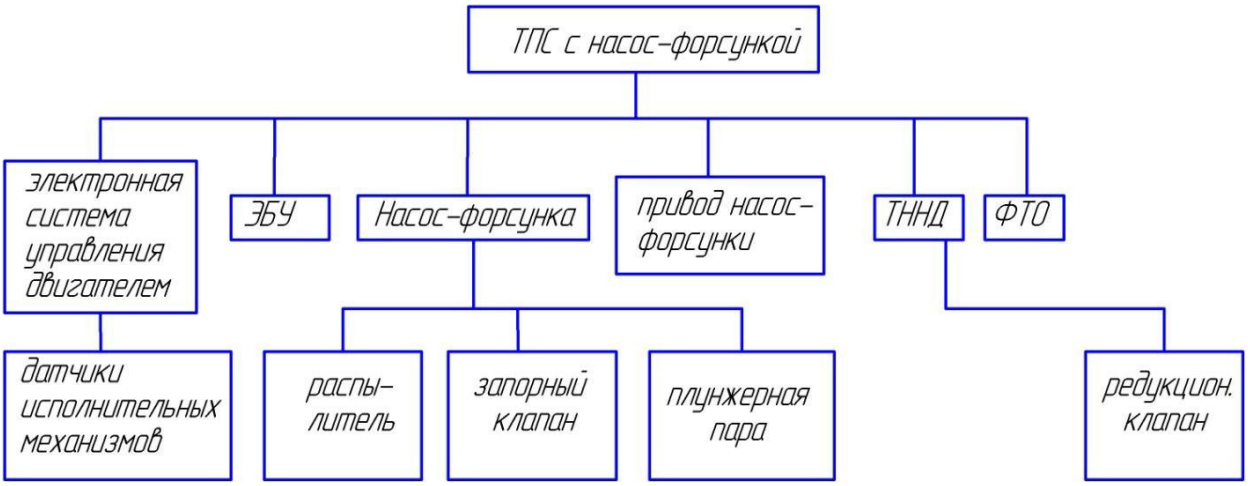



Рисунок 1.4 Структурные элементы ТПС с насос-форсункой

Работоспособность каждого элемента и его составляющих определяется совокупностью регламентированных показателей, их технического состояния или структурными параметрами. На этапе анализа ТПС, как диагностируемого объекта, следует выбрать необходимое и достаточное количество структурных параметров. Их выбор должен в идеале обеспечивать отсутствие ошибок пропуска неисправного состояния и ошибок ложного отбраковывания (при создании диагностических моделей такие ошибки принято называть ошибками 1 и 2 рода).

Оценочными показателями качества работы ТПС выступают значения диагностических параметров. В свою очередь перечень диагностических параметров во многом определяется методами, средствами и условиями диагностирования. В этой связи здесь же приводится анализ «потребительских» качеств диагностических параметров при различных методах диагностирования.

Проведенный анализ показывает, что наиболее полную информацию о состоянии структурного параметра при проведении безразборной диагностики, дает анализ процесса топливоподачи по давлению топлива в линии нагнетания.

Обычно в качестве диагностических параметров принимаются характерные параметры кривых давлений топлива в линиях высокого давления (ЛВД) у штуцера насоса и у штуцера форсунки и низкого давления (ЛНД) в головке насоса, а так же их параметры, среднее давление впрыска; усредненное давление в ЛНД; -продолжительность подачи по плунжеру; максимальное давление в ЛВД; среднее значение dP/dφв ЛВД от начала нагнетания до первого максимума; остаточное давление в ЛВД; параметры дробящего впрыска на пусковом режиме; цикловая подача топлива, полученные путем обработки следующих кривых рис.1.5-1.9 [62]:

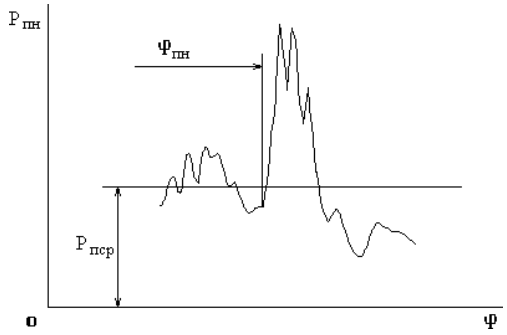



Рисунок 1.5 Давление в ЛВД на выходе.

Диагностические параметры: $Р_{ПСР}$ – среднее давление подкачки.

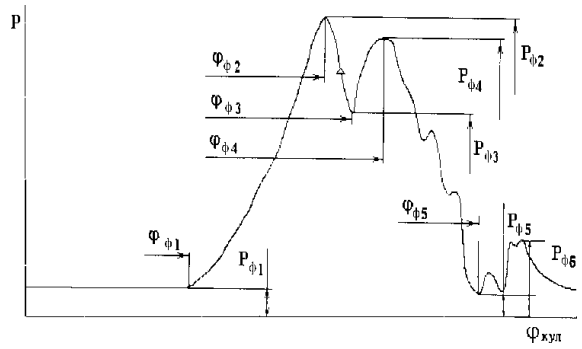



Рисунок 1.6 Давление топлива у форсунки.

Диагностические параметры: $\varphi_{ф1}$ - угол в момент начала повышения давления; $P_{ф1}$ – давление при $\varphi_{ф1}$; $\varphi_{ф2}$ – угол при первом максимуме соответствующий давлению $P_{ф2}$; $\varphi_{ф3}$ – угол при первом минимуме соответствующий давлению $P_{ф3}$; $\varphi_{ф4}$ – угол при втором максимуме соответствующий давлению $P_{ф4}$; $\varphi_{ф5}$ - угол в момент окончания впрыска.

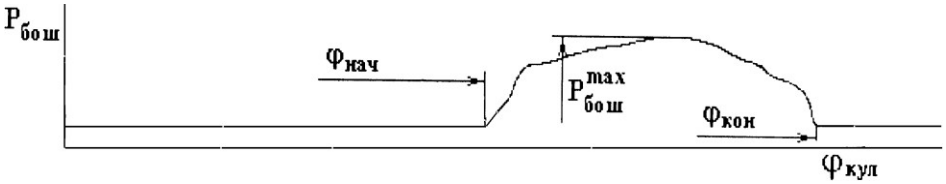
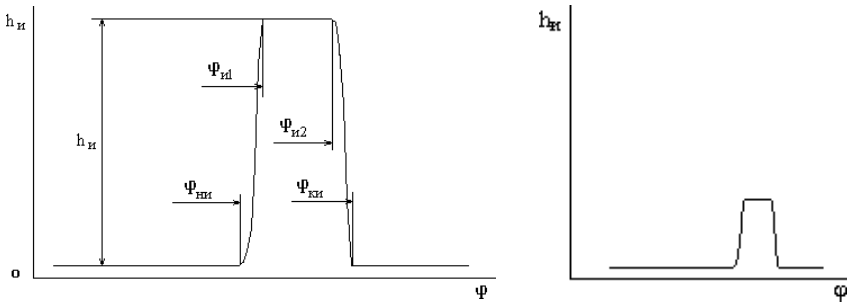



Рисунок 1.7 Давление в датчике-расходомере Бош.

Диагностические параметры: $\varphi_{нач}$ – угол соответствующий началу впрыска топлива; $P_{бош}$ – максимальное значение давления впрыска датчика Бош; $\varphi_{кон}$ – угол в момент окончания впрыска топлива; $\varphi_{нач}$-$\varphi_{кон}$ – продолжительность впрыска.




а) номинальный режим б) режим холостого хода

Рисунок 1.8 Ход иглы форсунки.

Диагностические параметры: $\varphi_{ни}$ – угол в момент начала подъема иглы; $\varphi_{и1}$ – угол, соответствующий полному ходу иглы; $\varphi_{и2}$ – угол, соответствующий началу посадки иглы; $\varphi_{ки}$ – угол в момент посадки иглы на седло; $h_и$ – ход иглы.

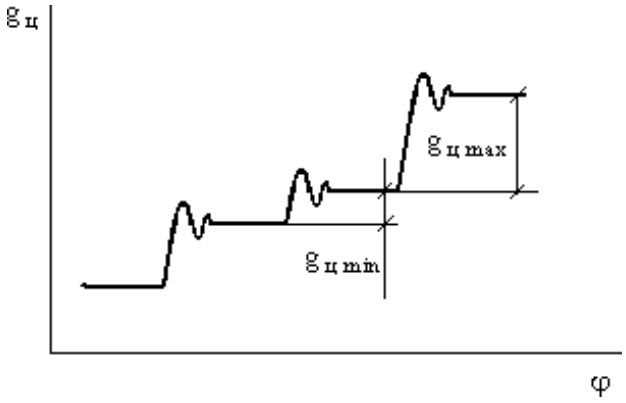



Рисунок 1.9 Цикловая подача топлива.

Диагностические параметры: $g_{цmin}$ – минимальная цикловая подача; $g_{цmax}$ – максимальная цикловая подача.

При диагностировании топливной аппаратуры по указанным характеристикам анализ еѐ работоспособности проводят по осциллограммам процесса впрыскивания путем выделения характерных участков . По осциллограммам давления впрыскивания топлива и по их расположению относительно отметки ВМТ обнаруживают большинство неисправностей топливной аппаратуры. Диагностирование проводят путем сравнения эталонной и исследуемой осциллограмм, снятых на одном и том же режиме работы двигателя. Их анализ позволяет установить, что сдвиг максимума осциллограммы относительно ВМТ и наклон участка линии начала подачи определяют состояние плунжерной пары, распылителя толкателя и привода насос-форсунки. Ордината участка падения давления в результате начала подъема иглы определяет усилие затяжки пружины форсунки и состояние прецизионной пары игла корпус распылителя. Максимальное давление топлива характеризует состояние отверстий распылителя. Этот метод, позволяет определить угол опережения подачи топлива в каждом цилиндре, максимальную и

минимальную частоты вращения коленчатого вала, углы опережения впрыскивания, устанавливаемые автоматической муфтой, а также усилие затяжки пружины [57]. Наряду с этим выявляются износы плунжерных пар, износ, обрыв и закоксованность распыливающих отверстий, заклинивание плунжеров и игл распылителей, поломки пружин запорных клапанов, иглы распылителя и плунжеров.

В то же время необходимо отметить, что указанные выше методики диагностирования достаточно трудоемки и требуют специального оборудования. В связи с этим одним из главных направлений снижения эксплуатационных расходов на обслуживание и ремонт, является совершенствование процессов технического обслуживания с внедрением диагностических средств и методов, которые, позволят снизить трудоемкость и повысить точность диагноза.

## 1.4 Средства оптимизации рабочего процесса топливоподающей системы дизелей

Исследовать процессы, протекающие в топливной аппаратуре дизелей, наиболее эффективно с помощью программ компьютерного моделирования рабочих процессов, что позволяет исключить длительные натурные испытания насос-форсунок.

Существующие в настоящие время программные комплексы предназначены для математического моделирования процессов подачи и компьютерной оптимизации систем впрыска, а также для расчетов, исследований и проектирования топливоподающей аппаратуры непосредственного действия и систем аккумуляторного типа, в том числе с электронным управлением.

Инновационной составляющей описываемых программ являются средства для разработки опережающих технических решений и технологий мирового уровня для проектирования и оптимизации топливных систем с электронно-управляемым впрыскиванием топлива и давлениями до 300…400

МПа, обеспечивающие сокращение сроков и удешевление создания перспективных дизельных двигателей.

В отличие от ряда конструкторских задач оптимизация характеристики впрыска, количества, диаметра и ориентации сопел распылителя на сегодняшний день решается экспериментально. Причиной этому является отсутствие в широкой практике адекватного программного обеспечения. Интенсивное развитие Computational Fluid Dynamic (CFD), реализующей трехмерное моделирование течения газа и впрыскиваемого топлива, пока не дает практически ощутимых результатов ввиду огромной трудоемкости расчетов (сотни часов расчетов на мощных компьютерах и до 5…15 дней подготовки данных) и недостаточной достоверности результатов. Говорить об использовании этих программ для инженерных оптимизационных расчетов тем более преждевременно [30].

Наиболее популярные программы BOOST (AVL), WAVE (Ricardo), GT-Power (Gamma Technologies), использующие термодинамический подход ограничены в возможностях оптимизации параметров топливной аппаратуры и при этом дороги для российских потребителей (стоимость их инсталляции на 1 рабочем месте - 4…6 млн. рублей).

Оптимизация рабочего процесса - единственно научно обоснованный способ формулировки требований к важнейшим показателям впрыска и, соответственно, ТА. К их числу относятся число и диаметр сопел, давление и характеристика впрыска, режимные характеристики и др. После дополнения требований, выбора типа и основных конструктивных решений исходного варианта (нескольких различных вариантов) ТА, в целях исключения длительных натурных испытаний предлагается ее компьютерная дискретная и параметрическая оптимизация. Для решения поставленных в данном исследовании задач мы используем специализированный программный комплекс ВПРЫСК, разработанный в МГТУ им. Баумана.

Используемые в ПК Впрыск математические модели процесса обладают высокой точностью и быстродействием. ПК создавался для проектирова-

ния ТПС дизелей, а также может быть полезным для решения гидродинамических задач в системах впрыска бензина или альтернативных топлив.

Таблица 1.3 Сравнительный анализ программного обеспечения для проектирования топливоподающих систем дизелей

| Наименование | Характеристики | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Разработчики программ, их название | Ricardo FINJECT | AVL HYDSIM | Caterpillar | Bosch | МГТУ ВПРЫСК |
| Возможность исследования систем произвольных схем | да | да | нет | да | да |
| Графическая генерация схемы топливной системы | да | да | нет | да | да |
| Примитивы графического редактора: функциональные (Ф) / простейшие геометрич. (Г) | Г | Г | нет | Ф | Ф |
| Одномерная оптимизация | да | да | да | да | да |
| Двухмерная оптимизация | нет | нет | нет | нет | да |
| Многомерная оптимизация | нет | нет | нет | нет | да |
| Возможность проектирования ТПА по заданным параметрам (характеристике) впрыска | нет | нет | нет | нет | да |
| Метод расчета течения в трубопроводах | МКЭ | Годунова | характ. | характ. | Даламб., Годунова |
| Учет переменности скорости звука | да | да | нет | нет | да |
| Учет нестационарного трения | нет | нет | нет | нет | да |
| Учет неизотермичности | да | нет | нет | да | да |
| Учет газовой фазы в ЛВД | да | да | да | да | да |
| Учет гистерезиса двухфазного состояния топлива | нет | нет | нет | нет | да |
| Расчет объемного (О) или массового (М) баланса в полостях | О | О | О | О | М |
| Учет податливости привода ТНВД | да | да | да | нет | да |
| Привод ТНВД как много-(М) или одно-(О) массовая крут. система | нет | М | О | нет | М |
| Нелинейные жесткостей, характеристик демпфирования | нет | да | да | нет | да |
| Учет люфтов в приводе | нет | нет | да | нет | да |
| Кольцевая крутильная система | нет | нет | нет | нет | да |
| Электрогидропривод плунжера | да | нет | нет | нет | да |
| Переходные режимы в ТПС | нет | нет | нет | нет | да |
| Совместимость с программами расчета цикла дизеля | да | да | нет | да | да |

При анализе сложных систем пользователь испытывает трудности интерпретации их схем и идентификации получаемых результатов по элементам ТПС. Поэтому для иллюстрации исследуемой ТПС используется графический образ, в котором пользователь из имеющихся примитивов может удалить или добавить элемент в рамках принятого типа ТПС. Предусмотрены типовые редакционные манипуляции с элементами и файлами. Программы обработки распознают образы, формируют матрицу связей, расчетную схему, проверяют корректность и доступность для расчета созданной схемы.

В программах фирм Риккардо (Ricardo) и АВЛ (AVL) предполагается генерировать ТПА из мелких элементов (сужение, вход, участок ламинарного течения, заслонка и т.п.). Столь мелкое разбиение трудоемко для создателей и слишком утомительно для пользователей. В ПК Впрыск ТПС состоит из ограниченного числа типовых элементов с набором характерных удаляемых или подключаемых подэлементов. Поэтому для генерации ТПС удобнее иметь укрупненные элементы или даже узлы, а конкретизируется в таблицах или подменю ПК. Его концепция ближе к другой известной разработке - фирмы Бош (R.Bosch).

Только в данных ПК Впрыск и ПК Бош пользователь без ограничения возможностей анализа оперирует с укрупненными элементами (плунжерная пара, гидропривод, клапан и т.д.), а не с элементарными (зазор, щель, конус, окно и т.п.). Это облегчает и ускоряет работу пользователя.

ПК Впрыск позволяет:

- осуществлять расчет характеристик топливоподачи ТПС на произвольном режиме ее работы, получать скоростные и нагрузочные характеристики;

- возможно исследование ТПС различных типов (в рамках данного класса);

- исследовать влияние на процесс подачи различных конструктивных и режимных параметров ТПС;

- решать многофакторные задачи оптимизации процесса подачи, используя для этого метод одномерного, двумерного и многомерного сканирования;

- проектировать привод ТНВД и исследовать его влияние на подачу.

Особенностью ПК Впрыск является его универсальность относительно особенностей ТПС дизелей и даже двигателей непосредственного впрыска бензина. Он позволяет работать с аккумуляторными системами, рядными, распределительными, роторными ТНВД, с кулачковым, гидравлическим или иным приводом. Форсунки могут быть любого типа: с гидроимпульсным запиранием, двумя пружинами. ТПА может включать дополнительные клапаны, золотники, жиклеры, аккумуляторы, трубопроводы, фильтры и т.д.

При анализе сложных систем пользователь испытывает трудности интерпретации их схем и идентификации получаемых результатов по элементам ТПС. Поэтому для иллюстрации исследуемой ТПС используется графический образ, в котором пользователь из имеющихся примитивов может удалить или добавить элемент в рамках принятого типа ТПС. Предусмотрены типовые редакционные манипуляции с элементами и файлами. Аналогичные возможности имеют ПК фирм Риккардо (Ricardo, Finject), АВЛ (AVL, Hydsim), Гамма Технолоджи (Gamma Technology, FuelInject), Р.Бош (R.Bosch).

Математическая модель, положенная в основу ПК, базируется как на апробированных подходах, так и на результатах оригинальных фундаментальных исследований, посвященных процессам в современной ТПА. ПК отличается от известных максимальным учетом существенных для топливоподачи явлений и процессов. Течение в трубопроводе рассчитывается в зависимости от целей работы с использованием решения Д’Аламбера или линеаризованного метода С.К.Годунова (с учетом переменности скорости звука). Только в ПК Впрыск достоверно рассчитывается нестационарное сопротивление трубопроводов, что ныне стало актуально и для ТПС быстроходных и среднеоборотных двигателей. Корректно учитывается неизотермичность

процесса с соответствующим изменением свойств топлива. Использованы уточненные соотношения для описания свойств однофазного и двухфазного состояния топлива, включая и нигде математически не описанный гистерезис двухфазного состояния. В уравнениях граничных условий использованы уравнения массового баланса, впервые - с формулами истечения сжимаемой жидкости. Расчет топливоподачи ведется как сопряженный с расчетом привода ТНВД, как многомассовой крутильной системы с учетом нелинейных жесткостей и характеристик демпфирования, люфтов, наличия ведомой ветви ремней (цепей) и т.д. В ПК Впрыск заложены возможности анализа ТА с электроприводом клапанов (золотников), электро-гидроприводом плунжера, современными кулачками и расчетом нагрузок. Устойчиво рассчитываются все эксплуатационные режимы двигателя, включая пуск и холостой ход, переходные режимы, а также многофазный, дробящий впрыск, подвпрыск.

ПК Впрыск разрабатывался как инструмент конструктора, имеет дружественный пользовательский интерфейс, удобную форму редактирования данных с их быстрым и детальным анализом их достоверности, представление результатов в табличном виде, плоской, квазитрехмерной и трехмерной графике, совмещение семейств кривых. Опираясь на проведенный анализ считаем наиболее эффективным использовать ПК Впрыск для решение поставленных задач.

### 1.5 Цель и задачи исследования

Краткий обзор и анализ состояния проблемы показал, что к настоящему времени созданы определенные научная и техническая основы обеспечения надежности и оценки качества работы топливной аппаратуры в процессе эксплуатации. Вместе с тем, существующие технологии и методы диагностирования, контроля и оценки технического состояния электроуправляемых элементов современных ТПС не учитывают в полной мере особенностей их функционирования.

Применение электронного управления и необходимость роботы с высокими давлениями впрыскивания усложняет обслуживание и ремонт насос-форсунок. Однако на сегодняшний день в России технические требования регламентируются: для ТНВД по ГОСТ 10578-95 и дизельных форсунок по ГОСТ 10579-88. В данные ГОСТы и входящие в их составы технические условия не включены насос-форсунки с электронным управлением. На данный момент в нашей стране отсутствуют какие-либо стандарты, регламентирующие методы проверки насос-форсунок с электронным управлением. Поэтому разработка технологии диагностирования и ремонта топливоподающих систем с насос-форсунками является актуальной задачей.

С учетом изучения состояния вопроса сформулирована цель исследований: повышение эффективности диагностирования и ремонта насос-форсунок автотракторных и комбайновых дизелей путем разработки метода и средств поэлементного их диагностирования с обоснованием допустимых отклонений структурных параметров от номинальных значений в процессе наработки.

Задачи исследования:

- провести комплексный анализ показателей качества работы насос-форсунок с электронным управлением, существующих методов и средств их диагностирования;
- уточнить математическую модель гидродинамического расчета рабочего процесса насос-форсунки с учетом естественных износов ее структурных элементов в процессе эксплуатации;
- обосновать допустимые отклонения структурных параметров насос-форсунки от значений, рекомендованных производителями с учетом ее наработки;
- разработать методику поэлементного диагностирования технического состояния насос-форсунок и диагностические средства для оценки параметров их работы;
- подготовить рекомендации производству, провести экономическую оценку предложенных мероприятий и внедрить их в производственный процесс в сельском хозяйстве.

# 2 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И РЕМОНТА НАСОС-ФОРСУНОК АВТОТРАКТОРНЫХ И КОМБАЙНОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

## 2.1 Обоснование объекта исследования

Топливоподающие системы с насос-форсунками выпускают различные фирмы: Bosch, Delphi, Detroit Diesel Allison, Lucas, Cummins и др., и подавляющее число из них содержат электронно-управляемые устройства для регулирования момента начала и количества впрыскиваемого топлива. Анализ основных конструкций насос-форсунок показал, что принцип работы большинства из них практически одинаков, в связи с чем для исследований была выбрана насос-форсунка производства фирмы Bosch 0414701019, наиболее распространенная в автотракторных дизельных двигателях объемом от 10,6 до 16 л. и широко применяемая в сельскохозяйственном производстве России, в частности, на дизелях новых современных высокопроизводительных посевных комплексов, свеклоуборочной, кормозаготовительной и сенозаготовительной техники, тракторов, а также автомобилей для перевозки сельскохозяйственной продукции.

Оценка параметров работы данной насос-форсунки, выполняемая путем диагностирования ТПС, должна содержать количественные характеристики, позволяющие оценить параметры ее функционала в пределах допусковых значений, установленных заводом изготовителем. В качестве оценочных характеристик насос-форсунки будем рассматривать ее диагностические показатели, то есть те, которые возможно определить и зафиксировать без разборки насос-форсунок, например, качество распыла (оценивается при проверке на стенде), цикловая подача (оценивается расходомером стенда) и др.

В качестве структурных параметров необходимо принять те параметры, которые в процессе эксплуатации насос-форсунки самопроизвольно изменяются или корректируются при ее техническом обслуживании или ремонте путем регулировки или замены деталей. Например, в процессе эксплуатации, из-за нарушения теплового зазора между коромыслом и толкателем происхо-

дит износ толкателя и меняется усилие преднатяга пружины плунжера; из - за загрязненного топлива меняется эффективное проходное сечение сетчатого фильтра, происходит износ прецизионных элементов, таких как плунжерная пара, клапанный узел и распылитель, имеет место заклинивание плунжерной пары, потеря герметичности запорного конуса клапана, направляющей части клапана, запорного конуса иглы распылителя; нарушается гидроплотность направляющей части иглы распылителя; изменяется эффективное проходное сечение отверстий распылителя. Также в процессе эксплуатации происходит изменение зазора между якорем и электромагнитом и меняется усилие преднатяга пружины клапана, изменяется ход клапана, нарушается плотность посадки заглушек технологических отверстий и другие.

Поэлементный анализ конструкции насос-форсунки 0414701019 фирмы Bosch позволил описать для нее 5 диагностических и 24 структурных параметров. Для более полного представления о структурных и диагностических параметрах, наиболее существенно влияющих на рабочие процессы насос-форсунки, сведем их в общую схему (рисунок 2.1)[7].

В целях выявления всех эксплуатационных и конструктивных факторов, влияющих на процесс работы насос-форсунки, была произведена ее полная разборка и проанализирован функционал каждой ее детали – назначение, принцип работы и роль в рабочем процессе. Например, управляющий электромагнитный клапан управляет непосредственно процессом закрытия и открытия иглы распылителя. В процессе работы насос-форсунки, когда запорный клапан закрыт, давление топлива в подыгольной полости распылителя возрастает, вследствие чего происходит подъем иглы распылителя и, соответственно, впрыскивание топлива.

Установлено [11], что можно выделить 4 основных рабочих элемента насос-форсунки: нагнетающий (плунжерная пара), управляющий (электромагнитный клапан), распыливающий (распылитель) и несущий (корпус).

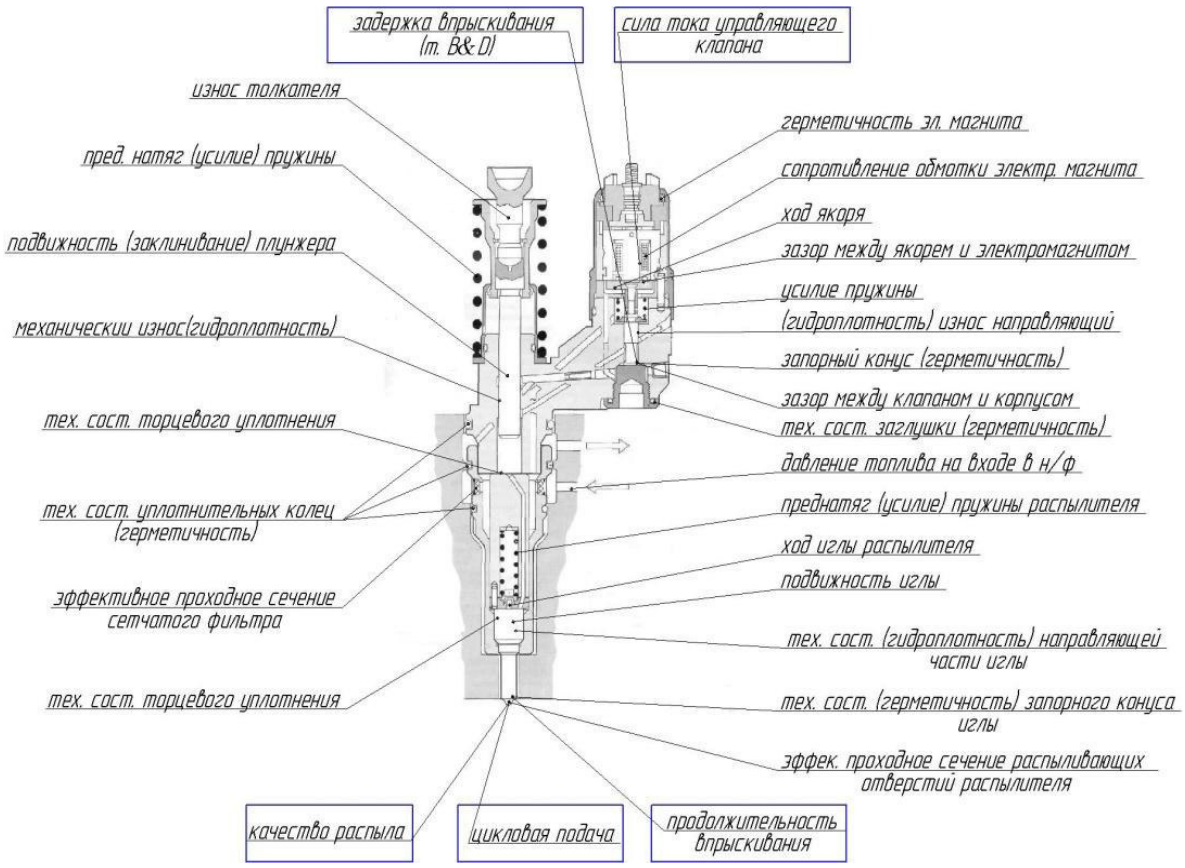



Рисунок 2.1 Наиболее значимые структурные и диагностические (в рамке) параметры насос-форсунки 0414701019 фирмы Bosch

Влияние на рабочий процесс нагнетающей части оказывают такие параметры, как: износ толкателя, усилие пружины плунжера, подвижность плунжера, гидроплотность плунжерной пары; управляющей части - герметичность электромагнитного клапана, сопротивление обмотки электромагнита, зазор между якорем и электромагнитом, усилие пружины электромагнита, гидроплотность направляющей части клапана, герметичность запорного конуса клапана, ход клапана; распыливающей части - усилие пружины распылителя, ход иглы распылителя, подвижность иглы, гидроплотность направляющей части иглы, герметичность запорного конуса иглы, эффективное проходное сечение распыливающих отверстий распылителя; несущей части - техническое состояние торцевого уплотнения между корпусом и проставкой и между проставкой и распылителем, герметичность уплотнительных колец и заглушек технологических отверстий, эффективное проходное сечение сет-

чатого фильтра. В качестве основных диагностических параметров определены: цикловая подача, качество распыла, продолжительность впрыскивания, сила тока управляющего клапана, задержка впрыскивания.

Рабочий процесс насос-форсунки можно представить в виде информационной модели [7], где она функционирует как многопараметрическая система (рисунок 2.2). Рабочий процесс S насос-форсунки определяется совокупностью ее структурных параметров X. Составляющие вектора X являются корректирующим и в процессе работы изменяются. Сюда входит: гидроплотность прецизионных деталей, ход иглы распылителя, усилие пружины и ход якоря, герметичность запорного конуса клапана, эффективное проходное сечение распыливающих отверстий распылителя и т.п. В данной системе неуправляемым является вход Y, составляющими которого являются: качество топлива, природно-климатические условия, суточные и сезонные колебания температур и др.

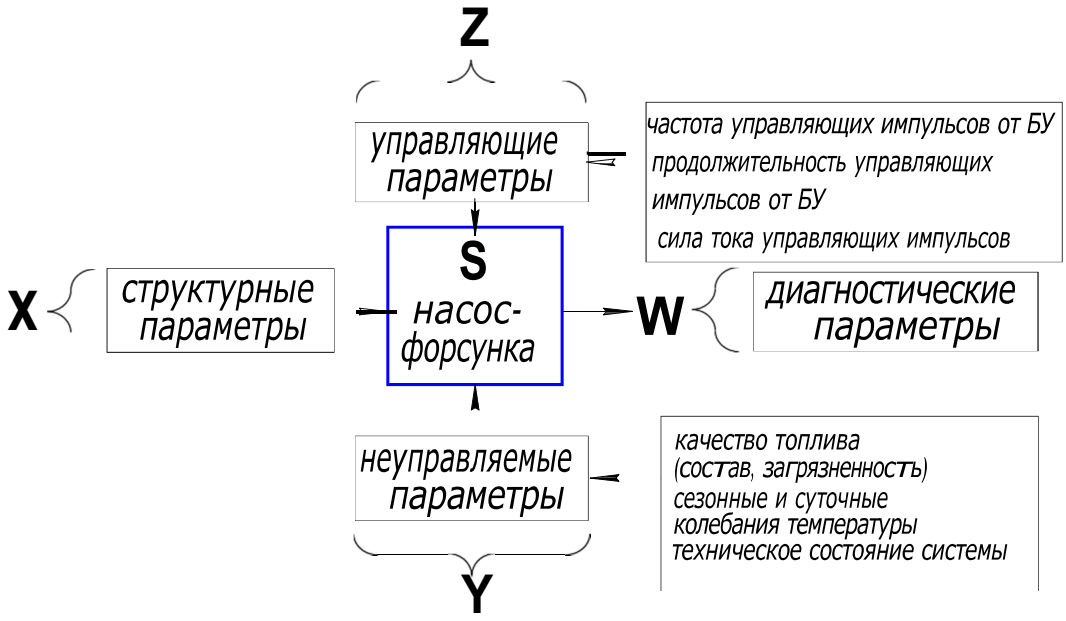



Рисунок 2.2 Информационная модель функционирования насос-форсунки

Составляющие вектора Z выступают управляющими факторами в этой модели. К ним можно отнести частоту и продолжительность управляющих электромагнитом импульсов, силу тока управляющего импульса, давление подкачки в ЛНД, форма кулачка и др. Значение выходного диагностического

параметра вектора W непосредственно зависит от состояния входных параметров:

$$W = S\{X, Y, Z\}, \quad (2.1)$$

где S – оператор преобразования входных параметров, определяющий критерий оптимальности системы в целом или обобщенный показатель ее качества, заданный в аналитической форме.

Для оценки работы насос-форсунок путем диагностирования ее параметров, должны содержать количественные характеристики, это позволяет оценить их в пределах допустимых значений. Критерии функционирования системы определяются как:

$$w^{\phi}_i \le [\, w_{i\,доп}], \;\; W^{ф} \le [\, W_{доп}], \quad (2.2)$$

где $W^{ф}$ и $w^{\phi}_i$ – соответственно, фактическое состояние насос-форсунки и совокупность оценочных показателей насос-форсунки.

Если фактическое значение $W^{ф}$ и $w^{\phi}_i$ меньше или равны ее значениям допустимым $W_{доп}$ и $w_{i\,доп}$ , то насос-форсунка в исправном состоянии. При выходе любого диагностического параметра из допустимого предела, необходимо воздействовать на систему путем изменения какого-либо управляемого параметра насос-форсунки для приведения показателей работы ее в штатное состояние. Если этого не происходит, то требуется изменить конкретный структурный параметр путем его регулировки, восстановления или замены детали.

Далее были установлены виды воздействия на каждый из структурных параметров – они могут быть произведены непосредственно на двигателе (D), на безмоторных стендах (C) или требуют полной разборки узла (R). Соответственно указывается, необходимо ли при этом выполнение демонтажно-монтажных работ (M) или можно обойтись без демонтажно-монтажных операций (O). Повлиять на показатели структурных параметров можно: (З) – путем замены деталей, например, при нарушении подвижности плунжера или иглы распылителя, герметичности уплотнительных колец, заглушек, электромагнита, сопротивления обмотки электромагнита, гидроплотности распы-

лителя, эффективного проходного сечения распылителя, при износе направляющей части клапана или толкателя; (В) – путем восстановления, например, подвижности плунжера, герметичности запорного конуса клапана, запорного конуса иглы распылителя, шлифовки торцевых уплотнений, прочистки щелевых фильтров; (Р) – путем регулировки, например, изменения преднатяга пружины плунжера клапана, пружины иглы распылителя, хода якоря, воздушного зазора, хода клапана и регулировки давления топлива на входе в насос-форсунку. Для оценки значимости структурных параметров по их влиянию на диагностические параметры конкретной насос-форсунки были проанализированы все выявленные связи структурных параметров (рисунок 2.3).

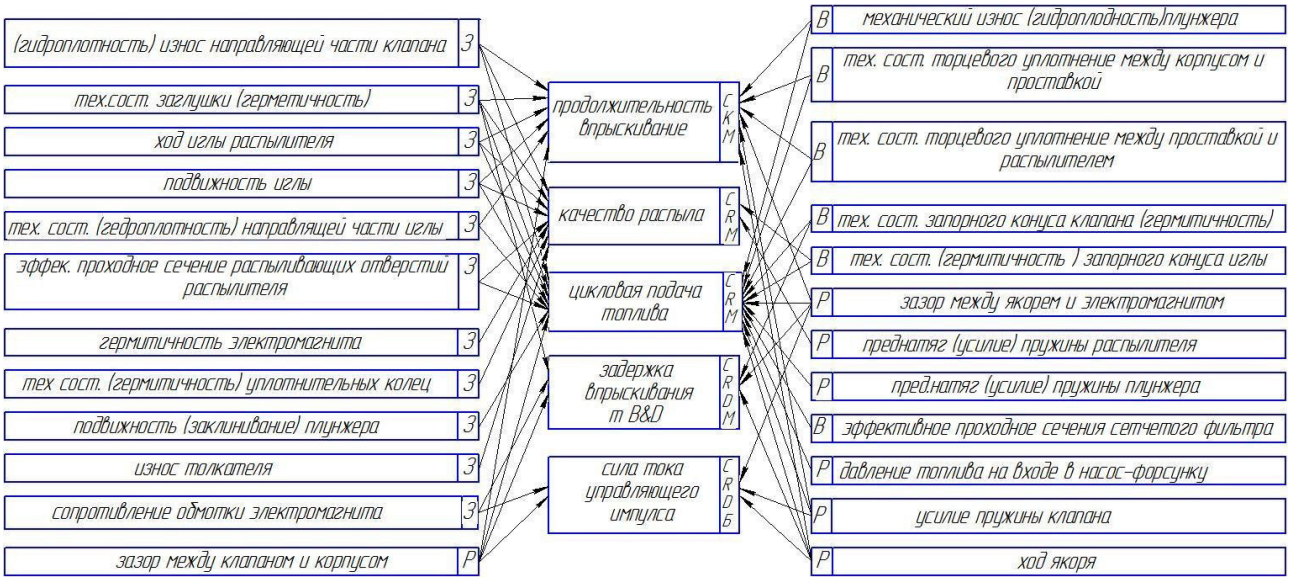



Рисунок 2.3 Влияние структурных (показаны с краю) параметров насос-форсунки на ее диагностические (показаны в центре) параметры

Анализ полученной схемы показал, что воздействовать на диагностические параметры насос-форсунки легче всего через изменение структурных параметров электромагнитного запорного клапана, так как, параметры работы электромагнитного запорного клапана в значительной мере определяют цикловую подачу, продолжительность впрыскивания, задержку впрыскивания (BIP- сигнал) и силу тока управляющего сигала, которые проверяются при дефектовке насос-форсунки по заводской технологии. Важно отметить,

что рекомендуемый процесс регулировки запорного клапана наиболее трудоемок, требует сложного оборудования и высококвалифицированных специалистов.

С целью подтверждения теоретических выводов влияния изменения структурных параметров на диагностические параметры, нами был проведен статистический анализ отказов и неисправностей ТПС с насос-форсунками в специализированном предприятии по сервису топливоподающей системы. Анализу подвергались узлы и детали насос-форсунок с электронным управлением производства Bosch. Следует отметить, что рассматривались насос-форсунки с нарушением работоспособности, которые при этом обеспечивали хотя бы какую-либо подачу топлива. Полностью отказавшие насос-форсунки из исследования исключались.

Анализ неисправностей насос-форсунок позволил сформировать следующие статистические данные по наиболее распространенным причинам выхода из строя насос-форсунок фирмы Bosch (табл. 2.1). То, что суммарное процентное соотношение по всем отказам превышает 100%, объясняется тем, что на некоторых насос-форсунках встречаются отказы сразу нескольких элементов. Как и следовало ожидать, работоспособность насос-форсунки в значительной мере (до 95% возможных отказов) определяется состоянием ее прецизионных узлов. Также, если посмотреть на совокупность отказов, то наибольший процент отказов приходится на распылитель - до 95%, при этом сам процесс замены распыли- теля не требует трудоемких операций и сложных технологий. На второй позиции, до 75 % отказов, находится запорный клапан. Среди отдельных позиций ремонта наиболее частым отказом является нарушение герметичности запорного конуса клапана – этот отказ встречается в 40% слу чаев. На остальные виды поломок приходится малая доля отказов.

Таблица 2.1 Статистика отказов насос-форсунок фирмы Bosch

| № п/п | Наименование | Характеристика | Процентное соотношение |
|---|---|---|---|
| 1 | Клапан | Нарушение герметичности запорного конуса | 40% |
| 2 | | Увеличение зазора между клапаном и электромагнитом | 15% |
| 3 | | Износ направляющей части (потеря гидроплотности) | 20% |
| 4 | Плунжер | Механический износ (потеря гидроплотности) | 5% |
| 5 | | Заклинивание | 1% |
| 6 | Электромагнит | Нарушение герметичности уплотнительных колец | 0,5% |
| 7 | | Дефект обмотки (замыкание, разрыв) | 1,5% |
| 8 | Распылитель | Механическая поломка пружины иглы | 9% |
| 9 | | Нарушение герметичности запорного конуса | 30% |
| 10 | | Механические повреждения торцевых уплотнений | 2% |
| 11 | | Износ направляющей части иглы (потеря гидроплотности) | 30% |
| 12 | | Закоксовка отверстий распылителя | 4% |
| 13 | | Снижение давления впрыска | 20% |
| 14 | Толкатель | Механический износ | 1% |
| 15 | Сетчатый фильтр | Загрязнение | 1,6% |
| 16 | Корпус | Механический износ | 7% |
| 17 | | Ржавчина | 3% |

В целом, основные дефекты по насос-форсункам сводятся к износу золотниковой части клапана и корпуса, заклиниванию и задирам прецизионных поверхностей, кавитационным и эрозионным разрушениям распределительных кромок клапана и корпуса, коррозионным разрушениям направляющих поверхностей и дефектам плунжерных пар. Износ прецизионных элементов и усиленная утечка топлива через неплотности снижают полезную производительность насос-форсуки. Для оценки последней можно использовать наработку насос-форсунки (часовую подачу или среднюю цикловую подачу топлива).

Так как процесс замены клапанного узла или его ремонта требует трудоемких операций и сложных технологий, то представляет интерес более подробное изучение процессов происходящих с запорным клапаном. В частности,

необходимо исследовать и обосновать величину допустимых отклонений технического состояния запорного клапана от номинального значения, при которых не происходит заметного нарушения диагностических показателей.

## 2.2 Совершенствование математической модели рабочего процесса насос-форсунки

Приведенный в первой главе анализ программного обеспечения, предназначенного для моделирования процессов в топливоподающей системе дизельного двигателя, показал, что в настоящее время расчетные методы имеют высокую точность и достоверность итоговых расчетов, что позволяет применять их, в том числе, и для моделирования процессов происходящих в гидромеханических системах топливной аппаратуры дизелей. Проверка адекватности математической модели может осуществляться сравнением характеристик впрыскивания полученных расчетным путем и в ходе экспериментального исследования.

В то же время необходимо отметить, что все рассмотренные математические модели разработаны для расчета и оптимизации ТПС и не учитывают изменения технического состояния насос-форсунки неизбежно возникающего в процессе их эксплуатации. Так как целью данной работы является совершенствование диагностирования ТПС, то для расчетно-численного исследования необходимо внести некоторые дополнения в существующие методики, учитывающие утечки в прецизионных соединениях и изменениях хода подвижных элементов.

Для расчета процессов в топливоподающих системах в данной работе использованы модели предложенные Л.Н.Голубковым, И.В.Астаховым, и развитого далее Л.В.Греховым с использованием уравнений движения и неразрывности потока сжимаемой жидкости в трубопроводе

.

При математическом моделировании происходящих процессов в линии высокого давления ТПС мы рассматривали как совокупность характерных

элементов: акустически длинных гидравлических связей, полостей, клапанов, регулирующих элементов типа жиклера, золотников, и т.д. Это позволяет в значительной мере упрощать расчеты: улучшить устойчивость счета, снизить время счета, упростить подготовку и алгоритм исходных данных.

В математической модели насос-форсунки были некоторые допущения, являющиеся общепринятыми. Так при рассмотрении процессов в трубопроводах пренебрегали трехмерностью течения, снижением скорости звука под действием гидродинамического трения при использовании решения Д'Аламбера – непостоянством скорости звука при изменении давления.

При моделировании процессов происходящих в насос-форсунке пренебрегали динамическим напором, и несколько полостей объединяли. Золотники, клапаны, и т.п. рассматривали как местные сопротивления. Трение в направляющих клапанах не учитывали, а эмпирической зависимостью описывали свойства топлив.

Конструктивно ТПС с насос-форсункой содержит акустические элементы, например, канал подвода топлива к распыливающему аппарату, поэтому пренебрежение возмущений волн и конечностью скорости распространения интерференцией в них и привело бы к искажению быстропротекающего процесса топливоподачи.

Исследование изменения этих параметров в известных методиках не предусмотрено, вследствие этого они были введены как константы. Разработку математической моделей насос-форсунки предпочтительнее начинать с запорного электромагнитного клапана в силу того, что характеристика впрыскивания топлива в значительной мере определяется именно характером его работы, что было доказано в разделе 2.1 данной работы.

Для теоретического исследования рабочего процесса клапана необходимо рассмотреть конструкцию гидравлически разгруженного запорного клапана насос-форсунки фирмы Bosch с оценкой ряда его параметров, таких как: диаметры каналов, угол запорного конуса седла и клапана, усилие пружины якоря, ход якоря и др.

Составим рабочую схему функционирования клапана (рисунок 2.5) для двух рабочих положений клапана: открытый и закрытый. Одним из важных и необходимых условий работы электромагнитного клапана является максимально быстрое его закрытие с обеспечением полной герметичности, а также отсутствие противодавления от топлива, проходящего через него на слив при его перемещении. Ввиду того, что во многих программах расчета топливоподающей аппаратуры широко используют уравнения балансов и расходов в граничных условиях, запишем уравнения объемного баланса для каждой полости насос-форсунки.

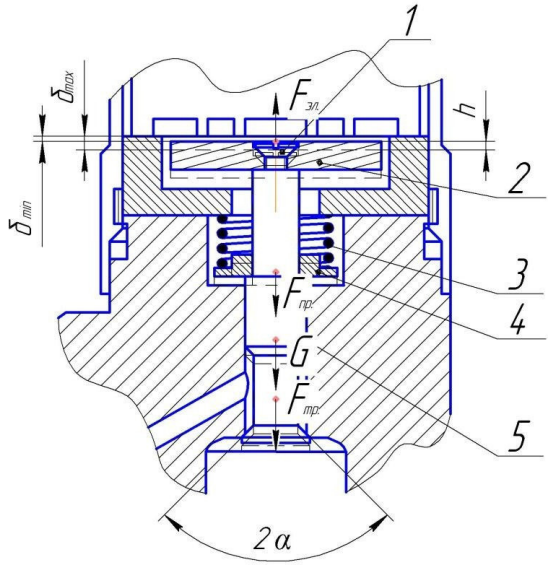



Рисунок 2.5. Схема работы запорного клапана насос-форсунки
(открытое положение показано пунктиром)

1 – винт, 2 – якорь, 3 – пружина электромагнитного клапана, 4 – подпружиненный толкатель, 5 – игла клапана, $\delta$ и $\delta_1$– воздушный зазор между якорем и электромагнитом в открытом и закрытом положениях, $h$ – ход якоря, $\alpha$– полуугол конуса седла клапана, $F_{пружс.}$ – усилие пружины якоря, $F_{трения.}$ – сила трения, $G$ – вес клапана, $F_{эл}$– усилие электромагнита.

Для надплунжерной полости насос-форсунки с электронным управлением впрыска топлива уравнение объемного баланса с учетом движения плунжера $\frac{dh_{пл}}{dt}$, движения клапана $\frac{dh_{кл}}{dt}$, расходов утечек через плунжер $Q_{пл}^{ут}$, через клапан

$Q_{вых}$ , через направляющую клапана $Q^{ут}_{нап.кл}$ имеет следующий вид[28]:

$$\frac{dP_{пл}}{dt} = \frac{1}{V_{пл} \cdot \beta^{эф}_{пл}} \left[ S_{пл} \frac{dh_{пл}}{dt} - S_{кл} \frac{dh_{кл}}{dt} - Q_{вых} - Q^{ут}_{пл} - Q^{ут}_{нап.кл} - Q^{ут}_{рас} \right] \quad (2.3)$$

Из уравнения Бернулли, непрерывности потока жидкости через разные сечения следует, что в открытом положении клапана расход топлива $Q_{пл}$, исходящий из надплунжерной полости в подклапанную равен расходу топлива $Q_{вых}$, исходящему из подклапанной полости на слив[69]:

$$Q_{вых} = \mu S_{кл} \sqrt{\frac{2 \cdot \left( P_{пл} - P_{под} \right)}{\rho}} \quad (2.4)$$

где: $S$ – площадь сечения клапанной щели запорного клапана, м$^2$;

$P_{пл}$, $P_{под}$ –давление топлива в надплунжерной полости и подкачки, МПа;

$\rho$ – плотность топлива, кг/м$^3$.

Площадь сечения клапанной щели запорного клапана:

$$S_{кл} = \pi \cdot h_{кл} \cdot \sin\left( \frac{\alpha_{кл}}{2} \right) \left[ 2r_2 - h_{кл} \cdot \sin\left( \frac{\alpha_{кл}}{2} \right) \cdot \cos\left( \frac{\alpha_{кл}}{2} \right) \right] \quad (2.5)$$

где: $r_2$ - радиус конуса, м.

$\alpha_{кл}$ - полуугол конуса седла клапана.

Таким образом, подставив выражение 2.3 в 2.2 получаем:

$$Q_{вых} = \mu \cdot \pi \cdot h_{кл} \cdot \sin\left( \frac{\alpha_{кл}}{2} \right) \cdot \left[ 2r_2 - h_{кл} \cdot \sin\left( \frac{\alpha_{кл}}{2} \right) \cdot \cos\left( \frac{\alpha_{кл}}{2} \right) \right] \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \left( P_{пл} - P_{под} \right)}{\rho}} \quad (2.6)$$

Данное выражение позволяет описать расходы топлива в разных сечениях топливных полостей. При этом в данном выражении не учитывается ряд показателей, таких как утечки топлива через радиальные зазоры в направляющих частях плунжера, клапана и распылителя.

Как было указанно ранее для случаев, когда производится гидродинамический расчет новых насос-форсунок, данными утечками можно пренебречь вследствие их незначительного количества. Однако, когда мы рассчитываем рабочие процессы в насос-форсунках уже бывших в эксплуатации, имеющих определенные износы деталей и пониженную гидроплотность прецизионных соединений, или насос-форсунки после текущего ремонта без замены прецизионных деталей, то пренебрегать существующими утечками нельзя. В этой связи представленная математическая модель гидродинамического расчета была дополнена соответствующими выражениями.

Прежде всего, исследуем влияние утечек через радиальный зазор в прецизионных соединениях. В насос-форсунке имеется три прецизионных элемента: плунжерная пара, распылитель, запорный клапан. Учитывая изменения вязкости топлива от давления с помощью формулой Д.Н. Вырубова. Расход утечек через радиальный зазор в плунжерной паре найдем по формуле[28]:

$$Q_{пл}^{ут} = \frac{\pi \cdot \delta_{пл}{}^{3} \cdot P_{о} \cdot d_{пл}}{12 \cdot \eta_{о} \cdot L_{пл} \cdot \ln c} \cdot \left(1 - \frac{1}{c^{P_{пл}/P_{о}}}\right) \quad (2.7)$$

где: $\delta_{пл}$ – радиальный зазор в плунжерной паре, м.

$P_{о}$ – атмосферное давление, МПа.

$d_{пл}$ – диаметр направляющей плунжера, м.

$L_{пл}$ – длина направляющей части плунжера, м.

$\eta_0$ - вязкость при действительной температуре в зазоре, Па·с.

Расход утечек через направляющую иглы распылителя найдем по формуле[28]:

$$Q_{рас}^{ут} = \frac{\pi \cdot \delta_{и}{}^{3} \cdot P_{о} \cdot d_{и}}{12 \cdot L_{и} \cdot \eta_{о} \cdot \ln c} \cdot \left(\frac{1}{c^{P_{под}/P_{о}}} - \frac{1}{c^{P_{пл}/P_{о}}}\right) + 0,5\pi \cdot U_{и} \cdot \delta_{и} \cdot d_{и}$$

где: $\delta_{и}$ – радиальный зазор в направляющей части иглы, м.

$d_{и}$ – диаметр направляющей иглы, м.

$L_{и}$ – длина направляющей части иглы, м.

$U_{и}$ – скорость цилиндрического тела иглы, м/с.

Расход утечек через радиальный зазор в направляющей части клапана найдем по формуле:

$$Q_{чап.кл}^{ут} = \frac{\pi \cdot \delta_{кл}{}^{3} \cdot P_{сл} \cdot d_{кл}}{12 \cdot L_{кл} \cdot \eta_{о} \cdot \ln c} \cdot \left(\frac{1}{c^{P_{пл}/P_{под}}}\right); \quad (2.9)$$

где: $\delta_{кл}$ – радиальный зазор в направляющей части клапана, мкм.

$d_{кл}$ – диаметр направляющей клапана, мм.

$L_{кл}$ – длина направляющей части клапана, мм.

Несмотря на то, что эти уравнения достаточно известны, их влияние на показатели насос-форсунки весьма значительно при увеличении радиальных зазоров с наработкой насос-форсунки.

На давление в надплунжерной полости насос-форсунки в значительной мере влияет ход клапана, продолжительность управляющего импульса, вследствие этого необходимо определить перемещение клапана, для этого воспользуемся выражением :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = \sum F \tag{2.10}$$

где: m – масса подвижного элемента, кг

ΣF – сумма сил, действующих на подвижный элемент, Н.

Подставив все силы, действующие на запорный клапан, получим выражение для определения перемещение клапана:

$$\frac{d^2h_i}{dt^2} = -\frac{1}{m_{клап}}\left[\sigma_{упр}\cdot F_{элек.маг} - P_{пл} - P_{под}\cdot F_{кл} + F_{пр.якор} + c_{пр.якор}\cdot h_{кл} - F_{тре} - G_{кл}\right] \tag{2.11}$$

где: $m_{клап}$ - суммарная масса клапана, якоря, винта, шайбы и пружины, кг;

$F_{кл}$– площадь клапанной щели, м$^2$;

$\sigma_{упр}$ – ступенчатая функция ($\sigma_{упр}$ = 1 при $h = h$, $\sigma_{упр}$ = 0 при $h = 0$, $h = h_{max}$);

$F_{элек.маг.}$ – усилие электромагнита, Н;

$F_{пр.якор}$ – предварительная затяжка пружины якоря, Н;

$G_{кл}$ – вес клапана, кгм/с$^2$;

$c_{пр.якор}$ – жесткость пружины якоря, Н/м.

Изменяющейся силой в данном выражении является сила электромагнита $F_{элек.маг}$ ,. которая изменяется в процессе перемещения якоря. Для ее определения запишем дифференциальное выражение [51]:

$$F_{элек.маг} = \frac{1}{2}\cdot i^2\cdot\frac{dL}{d\delta} \tag{2.12}$$

где $i$-ток, протекающий в контуре $i=const$, А;

$L$-индуктивность контура, Гн;

$\delta$ - зазор между электромагнитом и клапаном, м;

Индуктивность катушки электромагнита находится по формуле:

$$L = w^2 \cdot \frac{\mu \cdot S}{\delta} \tag{2.13}$$

где: $w$-число витков в обмотке электромагнита; $\mu$-магнитная проницаемость топлива в зазоре между якорем и электромагнитом; $S$ – площадь якоря электромагнита, м;

$$F_{элек.маг} = \frac{i^2 \cdot w^2 \cdot \mu \cdot S}{2\delta} \tag{2.14}$$

где: $\delta = \delta_{max} - h_{кл}$ это разность максимального воздушного зазора к перемещению клапана - максимальный воздушный зазор зависит от наработки насос-форсунки.

Мы получили систему уравнений, описывающих процессы, происходящие в насос-форсунке с учетом утечек в радиальных зазорах в направляющей части клапана, через направляющую иглы распылителя, через радиальные зазоры в направляющих частях плунжера.

Подставим в данную систему значения расходов и площади сечения клапанной щели, после чего она примет следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dP_{пл}}{dt} = \dfrac{1}{V_{пл} \cdot \beta_{пл}^{эф}} \left\{ \begin{array}{l} S_{пл} \dfrac{dh_{пл}}{dt} - \pi \cdot h_{кл} \cdot \sin\left(\dfrac{\alpha_{кл}}{2}\right) \cdot \dfrac{dh_{кл}}{dt} \left[ 2r_2 - h_{кл} \cdot \sin\left(\dfrac{\alpha_{кл}}{2}\right) \cdot \cos\left(\dfrac{\alpha_{кл}}{2}\right) \right] - \\ -\mu \cdot \pi \cdot h_{кл} \cdot \sin\left(\dfrac{\alpha_{кл}}{2}\right) \cdot \left[ 2r_2 - h_{кл} \cdot \sin\left(\dfrac{\alpha_{кл}}{2}\right) \cdot \cos\left(\dfrac{\alpha_{кл}}{2}\right) \right] \cdot \\ \cdot \sqrt{\dfrac{2 \cdot \left| P_{пл} - P_{под} \right|}{\rho}} - \dfrac{\pi \cdot \delta_{пл}^{\ 3} \cdot P_o \cdot d_{пл}}{12 \cdot \eta_o \cdot L_{пл} \cdot \ln c} \cdot \left( 1 - \dfrac{1}{c^{P_{пл}/P_o}} \right) - \dfrac{\pi \cdot \delta_{кл}^{\ 3} \cdot P_{сл} \cdot d_{кл}}{12 \cdot L_{кл} \cdot \eta_o \cdot \ln c} \cdot \\ \cdot \left( \dfrac{1}{c^{P_{пл}/P_{под}}} \right) - \dfrac{\pi \cdot \delta_u^{\ 3} \cdot P_o \cdot d_u}{12 \cdot L_u \cdot \eta_o \cdot \ln c} \cdot \left( \dfrac{1}{c^{P_{под}/P_o}} - \dfrac{1}{c^{P_{пл}/P_o}} \right) - 0{,}5\pi \cdot U_u \cdot \delta_u \cdot d_u \end{array} \right\} \\ \dfrac{d^2 h_{кл}}{dt^2} = \dfrac{1}{m_{клап}} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{упр} \cdot \dfrac{i^2 \cdot w^2 \cdot \mu \cdot S}{2\delta_{\max} - 2h_{кл}} - F_{пр.якор} - c_{пр.якор} \cdot h_{кл} - \left( P_{пл} - P_{под} \right) \cdot \pi \cdot h_{кл} \cdot \sin\left(\dfrac{\alpha_{кл}}{2}\right) \cdot \\ \cdot \left[ 2r_2 - h_{кл} \cdot \sin\left(\dfrac{\alpha_{кл}}{2}\right) \cdot \cos\left(\dfrac{\alpha_{кл}}{2}\right) \right] - F_{тре} - G_{кл} \end{array} \right\} \end{cases} \tag{2.16}$$

Таким образом, полученные уравнения позволяют утверждать, что на изменение характеристик насос-форсунки в процессе эксплуатации будет влиять изменение радиальных зазоров в прецизионных соединениях и воздушного зазора между якорем и электромагнитом. Зависимости изменения радиальных зазоров в прецизионных соединениях в процессе наработки насос-форсунки известны и имеют линейный характер без учета периодов обкатки и предельных износов. Для насос-форсунок с электронным управлением основными дефектами, лимитирующими их ресурс, являются износы прецизионных поверхностей золотниковой части запорного клапана. Изнашивание связано с динамическим действием абразивных частиц, движущихся с относительно высокой скоростью вместе с просочившимся по зазору топливом, и механическим действием абразивных частиц, защемляемых в зазоре при упругоциклической деформации прецизионных поверхностей. Ресурс клапанного узла лимитируется, в большинстве случаев, заклиниванием и задирами клапана, потерями гидроплотности из-за износов направляющих поверхностей. В среднем около 80% клапанных узлов бракуются по причине износа указанных поверхностей и потери гидравлической плотности ниже допустимых пределов.

Для решения полученной системы уравнений также необходимо установить зависимость воздушного зазора между электромагнитом и якорем от наработки, так как обычно в процессе эксплуатации насос-форсунки зазор $\delta$ между электромагнитом и якорем изменяется, что связано с механическим износом запирающего конуса клапана. Это, в свою очередь, приводит также и к изменению жесткости пружины клапана.

С целью определения зависимости изменения воздушного зазора между электромагнитом и якорем, нами был проведен статистический анализ зазоров между электромагнитом и якорем более чем 240 насос-форсунок имеющих различную наработку. Следует отметить, что рассматривались насос-форсунки как без, так и с нарушением работоспособности, и полностью отказавшие насос-форсунки. Результаты данных исследований представлены в виде графика рисунок 2.6.

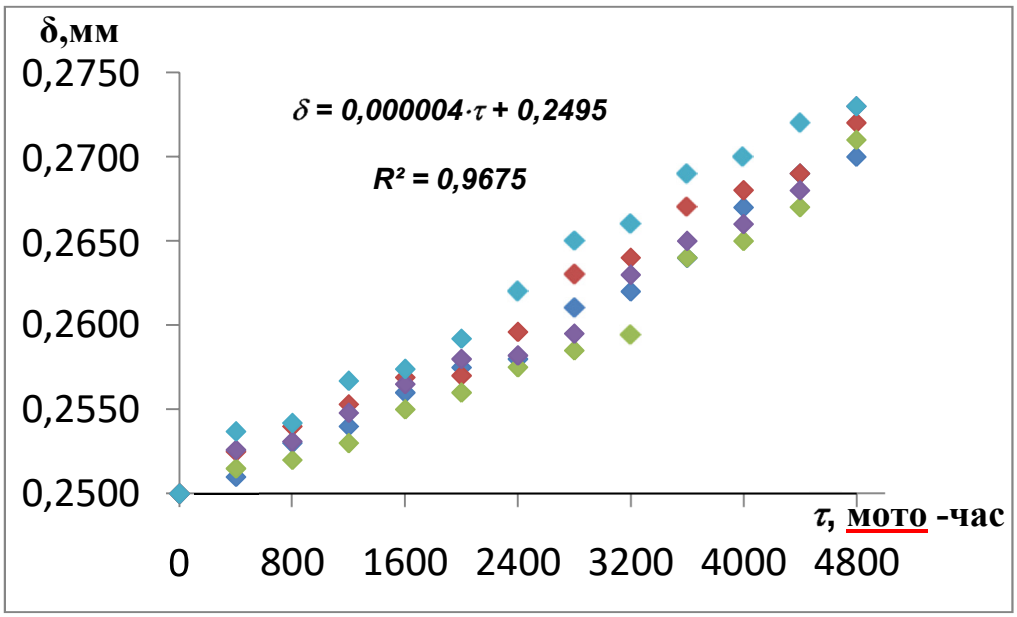



Рисунок 2.6 График зависимости воздушного зазора δ от наработки τ насос-форсунки

В итоге, зная фактическую наработку насос-форсунки, мы с большой вероятностью можем говорить о величине зазора между электромагнитом и якорем. Установленная связь между наработкой насос-форсунки и ее радиальными зазорами в прецизионных элементах в зависимости от воздушного зазора между электромагнитом и якорем позволяет реализовать полученные связи в ПК«Впрыск» и в дальнейшем усовершенствовать вычислительный процесс, так как вместо фиксированных раннее радиальных и воздушных зазоров в систему расчетных уравнений вставляется значение наработки насос-форсунки. В нашем случае полученными нами выражениями была дополнена математическая модель, реализованная в программном комплексе «Впрыск», и на этой основе проведены расчетно-численные исследования насос-форсунки по теме диссертации.

## 2.3 Идентификация разработанной математической модели применительно к насос-форсунке с наработкой

Расчет рабочего процесса насос-форсунки 0414701019 фирмы Bosch проводился с использованием специального программного комплекса

«Впрыск», разработанного на кафедре «Поршневые двигатели» МГТУ им.Н.Э.Баумана [50], дополненного предложенными нами зависимостями по учету изменений утечек в прецизионных соединениях и воздушного зазора. Любая математическая модель рабочего процесса в топливоподающей системы содержит в своем составе эмпирические коэффициенты, от выбора которых зависит точность полученных результатов. Поэтому этап проведения расчетных исследований должен предшествовать этап проверки адекватности математической модели путем сравнения расчетных данных с результатами экспериментов.

Для начала расчетов гидродинамических процессов в программной среде ПК «Впрыск» была построена расчетная схема насос-форсунки, которая показана на рисунке 2.7

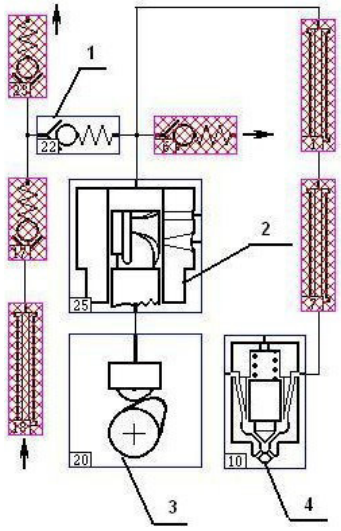



Рисунок 2.7 Расчетная схема насос-форсунки

1 – электромагнитный клапан; 2 – плунжерная пара; 3 – кулачковый вал;3 – форсунка.

В табл.2.2 приведены исходные базовые данные для расчетов насос-форсунки дизеля DC11.03 с насос-форсункой фирмы Bosch 0414701019, принятые для проведения факторных численных экспериментов. Данные полученные из технической характеристики представлены заводом изготовителем.

Таблица 2.2. Исходные данные для расчета параметров процесса топливоподачи насос-форсунки Bosch 0414701019 дизеля DC11.03

| Параметры топливной системы, размерность | Значение |
|---|---|
| 1 | 2 |
| РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ И РЕЖИМЫ СЧЕТА | |
| Частота вращения кулачкового вала, мин$^{-1}$ | 950 |
| Среднее противодавление при впрыскивании, МПа | 0.5 |
| Начальное давление в ЛВД, МПа | 0.75 |
| Активный ход плунжера | 7.00 |
| ПАРАМЕТРЫ ФОРСУНКИ | |
| Тип: нормальная закрытая форсунка | |
| Суммарная масса иглы, г | 5.6 |
| Жесткость пружины форсунки, Н/мм | 20.0 |
| Диаметр иглы, мм | 4.000 |
| Полуугол посадочного конуса иглы, град | 30.10 |
| Коэффициент расхода клапанной щели (0, - эмпир.форм) | 1.0 |
| Максимальный ход иглы, мм | 0.35 |
| Давление начала впрыскивания, МПа | 28 |
| Максимальный диаметр конуса седла, мм | 28,0 |
| Полуугол запорного конуса распылителя, град | 29.5 |
| Радиальный зазор в распылителе, мкм | 1.00 |
| Диаметр линии контакта в запорном конусе, мм | 3.19 |
| Диаметр предсоплового канала, мм | 0.900 |
| Длина уплотняющей части иглы, мм | 10.10 |
| Коэффициент расхода сопел при впрыске в атмосферу | 0.670 |
| Число сопловых отверстий $i_c$ | 8 |
| Диаметр (равных) сопловых отверстий $d_c$, мм | 0.19 |
| Сопла начинаются из соплового канала | |
| Начальное давления в надыгольной полости, МПа | 0.75 |
| ПАРАМЕТРЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ПЛУНЖЕРА | |
| Используется внешний кулачковый профиль | |
| Суммарная масса движущихся с плунжером деталей, г | 504.0 |
| Жесткость возвратной пружины плунжера, Н/мм | 25.00 |
| Предварительная затяжка этой пружины, мм | 24.00 |
| Радиус начальной окружности кулачка, мм | 34.50 |
| Радиус ролика, мм | 22.50 |
| Ширина ролика, мм | 24.00 |
| Коэффициент трения толкателя о корпус | 0.070 |
| ПАРАМЕТРЫ КОРОМЫСЛО | |
| Радиус рычага со стороны ролика, мм | 60.00 |
| Превышение оси рычага над осью кулачка, мм | 55.00 |

Продолжение таблицы 2.2

| 1 | 2 |
|---|---|
| Исходный угол рычага у толкателя, град | 20.00 |
| Передаточное отношение рычага | 1.04 |
| Направления вращения кулачка:<br>вершина кулачка двигается к ролику | |
| ПАРАМЕТРЫ КУЛАЧКА | |
| Максимальный радиус на высоте кулачка, мм | 42.63 |
| Радиус выпуклого профиля при вершине, мм | 4.00 |
| Интервал вывода радиуса кривизны кулачка, мм | 500.0 |
| Применен простейший тангенциальный кулачок | |
| ПАРАМЕТРЫ ПЛУНЖЕРНОЙ ПАРЫ | |
| Диаметр плунжера, мм | 10.20 |
| Радиальный зазор в плунжерной паре, мкм | 1.00 |
| Длина уплотняющей части плунжера, мм | 32.00 |
| Давление подкачки топлива, МПа | 0.75 |
| Коэффициент деформации плунжерной пары, 1/Тпа | 50 |
| Мертвый объем надплунжерной полоти, мм*$^3$ | 1009.0 |
| ПАРАМЕТРЫ ПОЛОСТЕЙ И ТРУБОПРОВОДОВ | |
| Объем входной полости форсунки (штуцера), мм*$^3$ | 48 |
| Коэффициент деформации этой полости, 1/Тпа | 41 |
| Объем кармана распылителя, мм*$^3$ | 167 |
| Коэффициент деформации этой полости, 1/Тпа | 41 |
| ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМОГО КЛАПАНА | |
| Тип клапана: грибковый , клапан гидравлический разгруженный | |
| Диаметр клапана, мм | 7.60 |
| Масса движущихся деталей клапана, г | 17.70 |
| Жесткость пружины клапана, Н/мм | 6.31 |
| Полуугол посадочного конуса клапана, град | 44.25 |
| Коэффициент расхода клапанной щели | 0.7 |
| Максимальный ход клапана, мм | 0.14 |
| Коэффициент расхода клапанной щели | 0.70 |
| Максимальный диаметр фаски корпуса клапана, мм | 7.80 |
| Минимальный диаметр конуса, мм | 5.40 |
| Диаметр разгружающего плунжера, мм | 7.00 |
| Радиальный зазор в этом плунжере, мкм | 1.00 |
| Длина уплотнения по плунжеру, мм | 17.00 |
| Предварительная затяжка возвратной пружины, Н | 125 |
| ЛИНИЯ СЛИВА ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМОГО КЛАПАНА | |
| Объем полости электромагнитного клапана, мм$^3$ | 1000 |
| Эффективное сечение балансировочного канала, мм$^2$ | 2.00 |
| ЭЛЕКТРОПРИВОД УПРАВЛЯЮЩЕГО КЛАПАНА | |

Продолжение таблицы 2.2

| 1 | 2 |
|---|---|
| Способ расчета привода: Задается сила электропривода, как функция времени | |
| Угол первого включения электропривода, град | 3 |
| Продолжительность действия электропривода в 1-ой фазе, мс | 0.94 |
| Максимальное значения силы электропривода, Н | 250 |
| Время переходного процесса по переднему фронту, мс | 0.1 |
| Время переходного процесса по заднему фронту, мс | 0.1 |
| Диаметр тарелки якоря торцевого электромагнита, мм | 17,2 |
| Гарантированный минимальный зазор между якорем и электромагнитом ,мм | 0,2 |

Результаты расчета процесса топливоподачи с насос-форсункой Bosch 0414701019 приведены на рисунке.2.8.

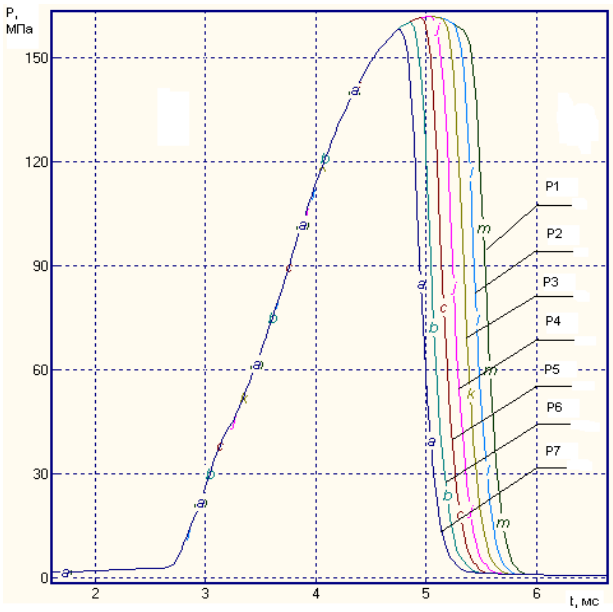



Рисунок.2.8 Характеристика давления топлива в надплунжерной полости при изменении продолжительности впрыскивания при номинальной частоте вращения кулачкового вала.

Из полученных расчетным путем характеристик давления топлива (рисунок 2.8) видно, что дополненный нашими выражениями, учитывающими износы и наработку насос-форсунки, ПК «Впрыск» работоспособен и в дальнейшем можно работать с этой моделью. Анализ изменения характеристик давления в надплунжерной полости показывает, что максимальное давление

в надплунжерной полости адекватно отображает зависимость от продолжительности управляющего импульса.

После расчета диагностических параметров, в частности, характеристики впрыскивания были проведены экспериментальные исследования для идентификации математической модели применительно к исследуемой ТПС. Для идентификации полученные экспериментальные кривые усреднялись по нескольким последовательным впрыскам. Математическая модель является детерминированной, поэтому не учитывает реальные отклонения параметров топливной системы, от принятых а также особенности используемого топлива. Вместе с тем математическая модель была уточнена с учетом эксплуатационных факторов, таких как возрастание утечек топлива в зазорах прецизионных элементов, в процессе эксплуатации изменение скорости перемещения управляющего клапана, изменения задержки начало впрыска после подачи сигнала.

Проверка адекватности математической модели проводилась по критерию Фишера. Дисперсионное соотношение в этом случае имеет вид:

$$F_р = S^2_{ад} / S^2_{восп.}, \quad (2.17)$$

Дисперсия адекватности определяется из соотношения:

$$S^2_{ад} = [\Sigma(Y_р - Y_э)^2] / (N - n), \quad (2.18)$$

Дисперсия воспроизводимости определяется из соотношения:

$$S^2_{воспр} = [\Sigma(Y_t - Y_{ср})^2] / (m - 1), \quad (2.19)$$

Расчетное значение критерия Фишера сравнивают с табличным значением при выбранном уровне значимости и числе степеней свободы:

$$f_1 = N\text{-}n,\ f_2 = m - 1. \quad (2.20)$$

В случае соотношения $F_р \leq F_{табл}$ уравнение адекватно и может быть использовано для моделирования изучаемого процесса.

В нашем случае в качестве $Y_t$ – текущего, $Y_{ср}$ – среднего и $Y_э$ –экспериментального значений функции отклика являются значения текущей, средней и экспериментальной цикловой подачи ($g_ц$).

N=5 т.к. число опытов при каждом воздушном зазоре равно пяти;

n=1 т.к. значимой величиной в модели является воздушный зазор δ;

m=25 т.к. общее число опытов равно 25.

Таблица 2.3 Данные расчета дисперсия адекватности $S^2_{ад}$

| δ, воздушный зазор, мм | $(Y_р - Y_э)^2$ | $\Sigma(Y_t - Y_{ср})^2$ |
|---|---|---|
| 0,29 | 125,44 | 285,84 |
| 0,27 | 33,64 | |
| 0,25 | 12,96 | |
| 0,23 | 29,16 | |
| 0,21 | 84,64 | |

$S^2_{ад}$ = 285,84/(5-1)=71,46

Таблица 2.4 Данные расчета дисперсии воспроизводимости.

| δ,мм | $(Y_t-Y_{ср})^2$ | δ,мм | $(Y_t-Y_{ср})^2$ | δ,мм | $(Y_t-Y_{ср})^2$ | δ,мм | $(Y_t-Y_{ср})^2$ | δ,мм | $(Y_t-Y_{ср})^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,29 | 14,44 | 0,27 | 27,04 | 0,25 | 31,36 | 0,23 | 5,76 | 0,21 | 27,04 |
| 0,29 | 77,44 | 0,27 | 38,44 | 0,25 | 5,76 | 0,23 | 92,16 | 0,21 | 23,04 |
| 0,29 | 3,24 | 0,27 | 51,84 | 0,25 | 73,96 | 0,23 | 31,36 | 0,21 | 3,24 |
| 0,29 | 38,44 | 0,27 | 46,24 | 0,25 | 40,96 | 0,23 | 54,76 | 0,21 | 14,44 |
| 0,29 | 67,24 | 0,27 | 139,24 | 0,25 | 29,16 | 0,23 | 29,16 | 0,21 | 27,04 |

$S^2_{воспр}$ = 992,8 /(25-1)= 41,36

$F_р$ =71,46/41,36=1,72

Для $f_1$= N-n=4 и $f_2$= m – 1=24 $F_{табл}$=2,78

Т.к. $F_р < F_{табл}$ , то модель адекватна с уровнем значимости 0,95. При аналогичном сравнении адекватность экспериментальных данных с базовым расчетом, без учета наработки, уровень значимости был менее 0,95

Экспериментально полученную характеристику насос-форсунки с наработкой 4000 мото-часов сравнивали с расчетными данными, полученными расчетами в ПК «Впрыск» в базовом варианте и с учетом полученных выражений.

Проверка адекватности модели по Критерию Фишера показала, что теоретические и экспериментальные данные дают положительную сходи-

мость при уровне значимости 95%. Таким образом, выявленные теоретические зависимости для расчета характеристики впрыскивания с учетом утечек топлива через прецизионное соединение насос-форсунки и изменение воздушного зазора позволяют рассчитать вероятные показатели ее работы доверительной вероятностью 95% .

На рисунке 2.9 видны результаты сравнения расчетных характеристик впрыскивания с экспериментальными, полученные в номинальном режиме и в режиме холостого хода.

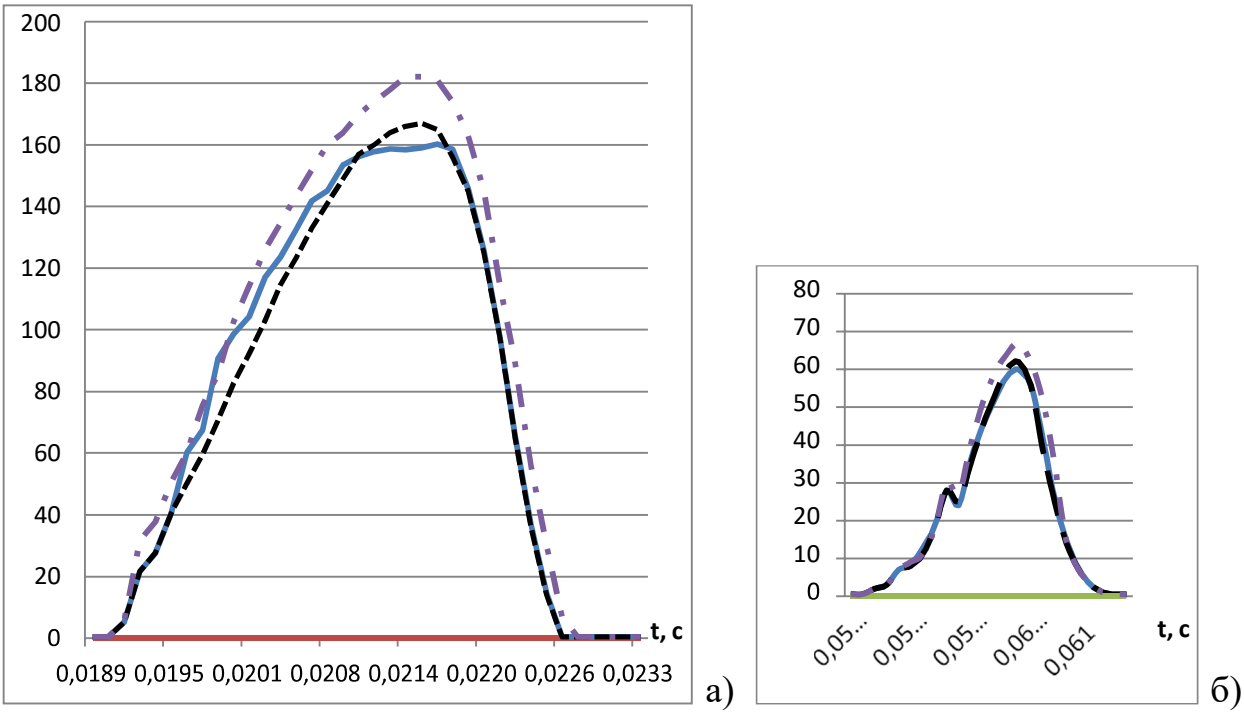



Рисунок 2.9. Характеристики давления топлива в надплунжерной полости в номинальном режиме работы (а) и в режиме холостого хода (б) –экспериментальные данные; – ·– ·– ·– базовый расчет (без учета наработки); – – – скорректированный расчет (с учетом наработки).

# 3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Целью проведения экспериментальных исследований является проверка результатов теоретических исследований, практическое изучение закономерностей процессов, происходящих в насос-форсунках, установление факторов, наиболее существенно влияющих на его работу.

## 3.1 Экспериментальное исследование насос-форсунок по определению характеристики впрыскивания

Для безмоторных испытаний экспериментальной топливоподающей системы с насос-форсункой была принята установка (рис.3.1), собранная на базе одноканального стенда для регулировки дизельной топливной аппаратуры КИ-354 ГОСНИТИ.

Рисунок 3.1 Общий вид экспериментальной установки

1 – компьютер, 2 – стенд для испытания топливной аппаратуры КИ-354, 3 – приемный блок, 4 – насос-форсунка, 5 – блок питания с гальванической развязкой, 6 – аналогово-цифровой преобразователь, 7– устройство для опре- деления характеристики впрыскивания, 8 – Cam-Box, 9 – блок управления насос-форсункой.

Стенд оснащен программным обеспечением «TNVD», который позволяет проводить электронные измерения, показывающие числовые значения частоты вращения вала привода насос-форсунки и числа циклов подачи топлива испытуемой насос-форсунки.

Для поддержания рабочей температуры топлива в заданных пределах 20...40$^0$С в стенде предусмотрена система термостабилизации. Температура топлива, поступающая к насос-форсунке, фиксировалась стендовым термометром ТПЖ-4 ГОСТ 8.305-78.

В процессе тарировки использовался аналого-цифровой преобразователь на основе ZET Lab [97], подключенный в интерфейс персонального компьютера типа IBM 386 PC с тактовой частотой 62 МГц и оперативной памятью 1 Мбайт.

Схема экспериментальной системы с измерительным комплексом представлена на рисунке 3.2. Измерительный комплекс работает следующим образом. Испытываемая насос-форсунка 7 установлена в Cam-box 8, на распылитель герметично закреплен приемный штуцер 6. Электрический топливоподкачивающий насос из бака стенда 10 подает тестовую жидкость через фильтр в насос-форсунку 7. При испытании насос-форсунок с электронным управлением используется универсальный имитатор сигналов. Впрыскиваемое насос-форсункой 7 в трубопровод 1 топливо вызывает появление волн давления, которые преобразуются датчиками давления и подаются на вход аналого-цифрового преобразователя 3, где сигнал оцифровывается и отправляется в память электронного блока управления для последующей обработки. Для затухания появившихся при впрыскивании волн давления на конце трубопровода 1 установлен электромагнитный клапан с эффективным проходным сечением, изменяющимся согласно фактическому режиму работы. Для создания противодавления впрыскиванию в регулирующий блок 2 вмонтирован редукционный клапан, давление открытия которого приблизительно равно давлению в конце сжатия в цилиндре двигателя.

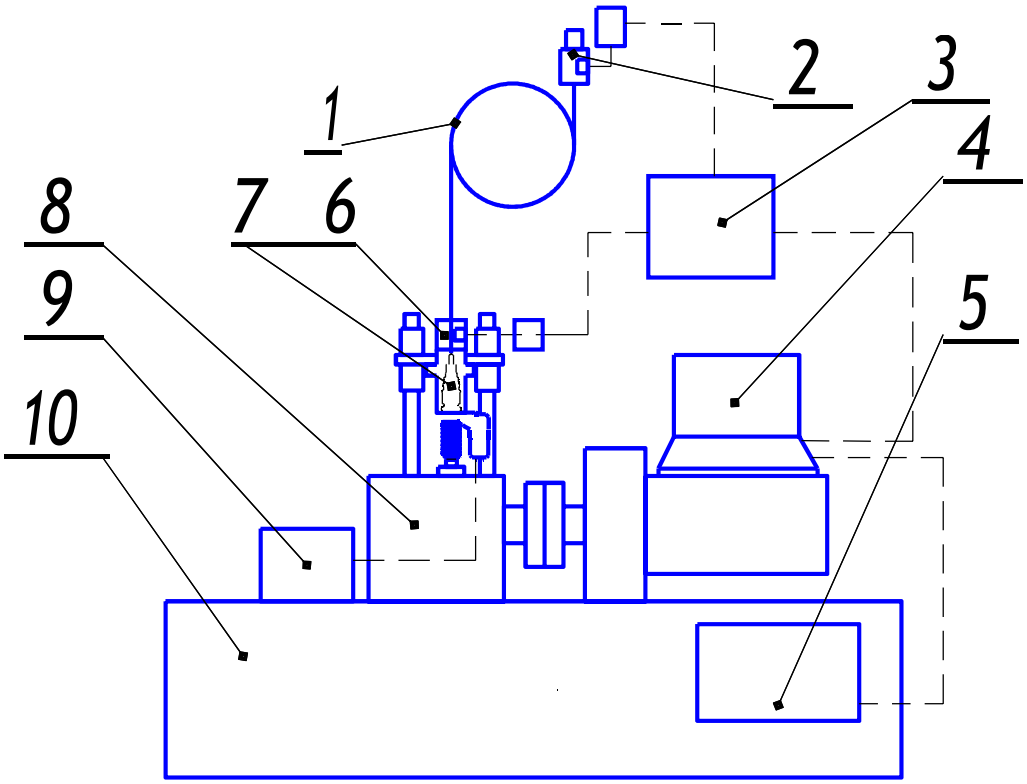



Рисунок 3.2 Схема экспериментальной установки

1 –трубопровод; 2– блок регулирования; 3– АЦП ZET Lab; 4 – персональный компьютер; 5 – панель управления стендом; 6 – приемный штуцер; 7– насос- форсунка; 8 – Cam-box; 9 – универсальный имитатор сигналов; 10– стенд КИ-354.

Далее программа производит обработку полученных данных и выводит результаты процесса измерения на монитор. Применение данной методики позволяет существенно сократить время на оценку диагностических параметров при испытании насос-форсунки.

Управление электромагнитом насос-форсунки осуществляется универсальным имитатором сигналов, сила тока управляющих импульсов замеряется индуктивным датчиком, установленным на питающем проводе. Измерение давления в линии высокого давления насос-форсунки производится при помощи датчика давления, установленного в канале корпуса насос-форсунки между плунжером и запорным клапаном, а результат измерения передается через АЦП на ПК.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась насос-форсунка (обозначение 0 414 701 019) производства фирмы BOSCH.

Сигнал управления на насос-форсунку подавался от многофункционального имитатора сигналов разработки кафедры «Тракторы и автомобили» Башкирский ГАУ. Этот имитатор полностью повторяет форму управляющих электромагнитом сигналов ведущих производителей насос-форсунок, а также форсунок топливоподающих систем типа Common Rail и может генерировать ШИМ сигнал для управления регулятором давления. Основные технические характеристики имитатора представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Основные технические характеристики имитатора сигналов.

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Форма сигнала для насос-форсунок | Bosch,Denso,Delphi |
| Длительность импульса, мс | 0,15…2,5 |
| Шаг задания длительности импульса, мс | 0,01 |
| Частота следования импульсов, мин$^{-1}$ | 100…1000 |
| Частота ШИМ, Гц | 1000 |
| Шаг задания скважности ШИМ, % | 0,1 |

Испытания проводились на калибровочной жидкости Shell Calibration Fluid S.9365 DIN ISO 4113 (таблица 3.2), предназначенной для калибровки дизельной топливной аппаратуры. Калиброванная жидкость представляет собой смесь маловязких минеральных масел и специальных присадок, обеспечивающих улучшение окислительной стабильности, защиты от коррозии и проводимости, что способствует снижению износа испытываемых агрегатов.

Таблица 3.2 Основные параметры жидкости Shell Calibration Fluid S.9365 DIN ISO 4113.

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Кинематическая вязкость, при 40°C, мм$^2$/с | 2,6 |
| Плотность, при 15°C, кг/м$^3$ | 820 |
| Температура вспышки в открытом тигле, °C | 80 |
| Температура застывания, °C | -27 |
| Спецификации/допуски: гидравлические жидкости: | ISO 4113,<br>SAE,<br>Robert Bosch - VS 15665-OL,<br>Lucas - CAV |

Регистрация мгновенных значений давления топлива в ЛВД производилась тензометрическими преобразователями МД-200 V ТУ 4212-163-00227459-98 (рисунок 3.3). Полость датчиков, воспринимающая давление топлива, изготовлена из сплава с содержанием титана 87%.

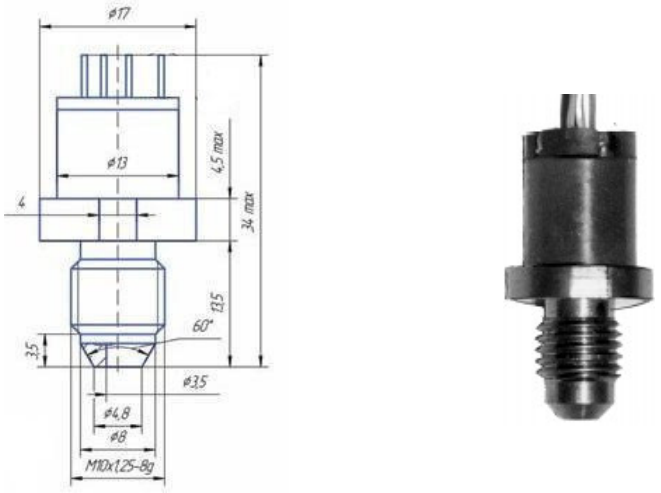



Рисунок 3.3 Общий вид тензометрического датчика серии МД

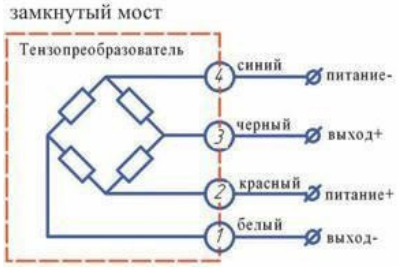



Рисунок 3.4 Схема подключения тензопреобразователя МД-200 V

Тензопреобразователь работает следующим образом. Под действием давления измеряемой среды сапфирово-титановая мембрана прогибается, тензорезисторы меняют свое сопротивление, что приводит к разбалансу моста Уитстона, который пропорционален измеряемому давлению.

Тарировочные значения используемых тензопреобразователей приведены ниже:

– начальное значение выходного сигнала, соответствующее нулевому значению измеряемого параметра при температуре 20±5°С – 10,25 мВ;

– конечное значение выходного сигнала, соответствующее номинальному значению измеряемого параметра при температуре 20±5°С – 137 мВ.

Таблица 3.3 Технические характеристики тензопреобразователя МД-200 V

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Нелинейность Uд, % | ± 0,2 |
| Вариация Uд, % | ±0,05 |
| Диапазон выходного сигнала Uд при +20°С, мВ | 100…200 |
| Начальное значение выходного сигнала при +20°С, мВ | ± 10 |
| Изменение начального значения выходного сигнала от температуры, % на 1°С | ± 0,05 |
| Изменение диапазона выходного сигнала от температуры, % на 1°С | ± 0,05 |
| Диапазон рабочих температур, °С | –50…+125 |
| Диапазон измеряемых давлений, МПа | 10...200 |
| Номинальное значение давления, МПа | 200 |
| Предельное значение давления, МПа | 235 |
| Сопротивление моста при температуре +20° С, кОм | 4,0±0,6 |
| Напряжение питания, В | 5 |

Данные тензопреобразователи соответствуют ТУ 25-7301.061-89.

Параметры топливоподачи при исследовании оценивались с использованием компьютера, аналого-цифровых преобразователей и программных средств регистрации.

Для усиления сигнала с тензодатчика использовался инструментальный усилитель AD623 фирмы Analog Devices. Devices. Схема подключения усилителя изображена на рисунке 3.5.

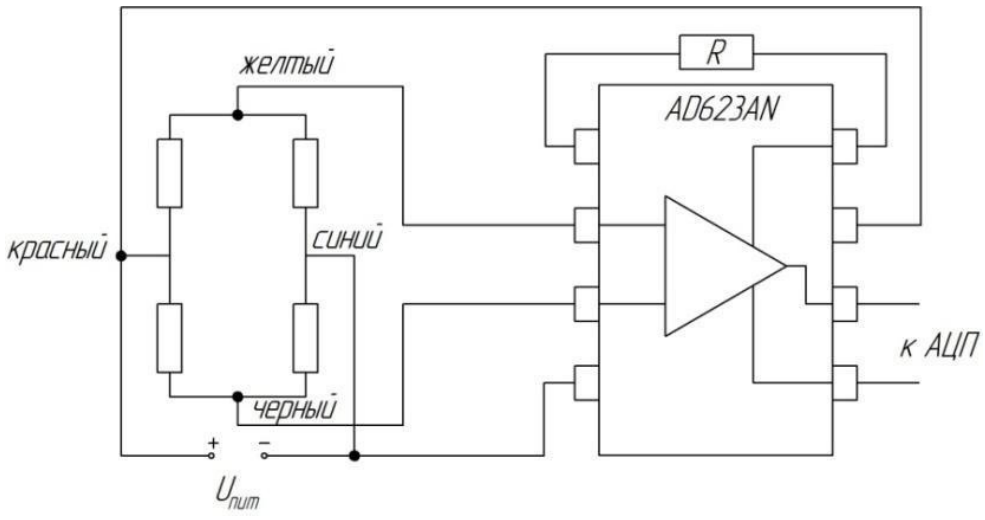



Рисунок 3.5 Схема подключения усилителя AD623AN к тензодатчику

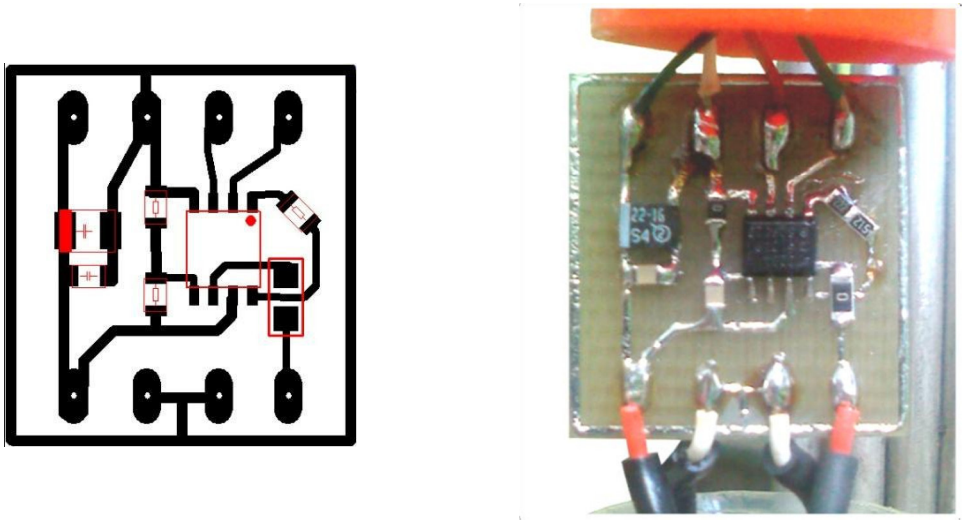


Рисунок 3.6 Трассировка платы и общий вид усилителя

Коэффициент усиления усилителя задается резистором $R_G$ номинал, которого рассчитывается по формуле:

$$R_G = \frac{100}{G - 1}, \tag{3.1}$$

где $R_G$ – сопротивления резистора, кОм; G – необходимый коэффициент усиления.

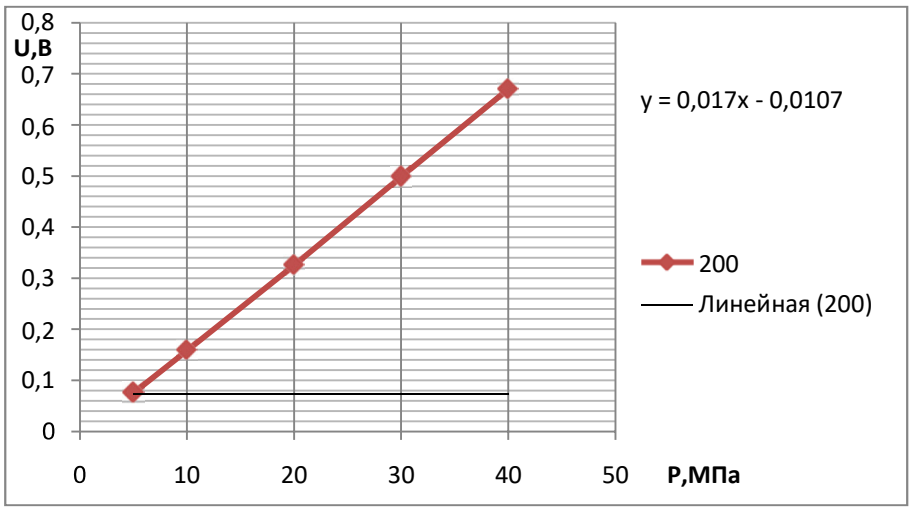
Основные технические характеристики усилителя представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 Основные технические характеристики усилителя AD623ARZ

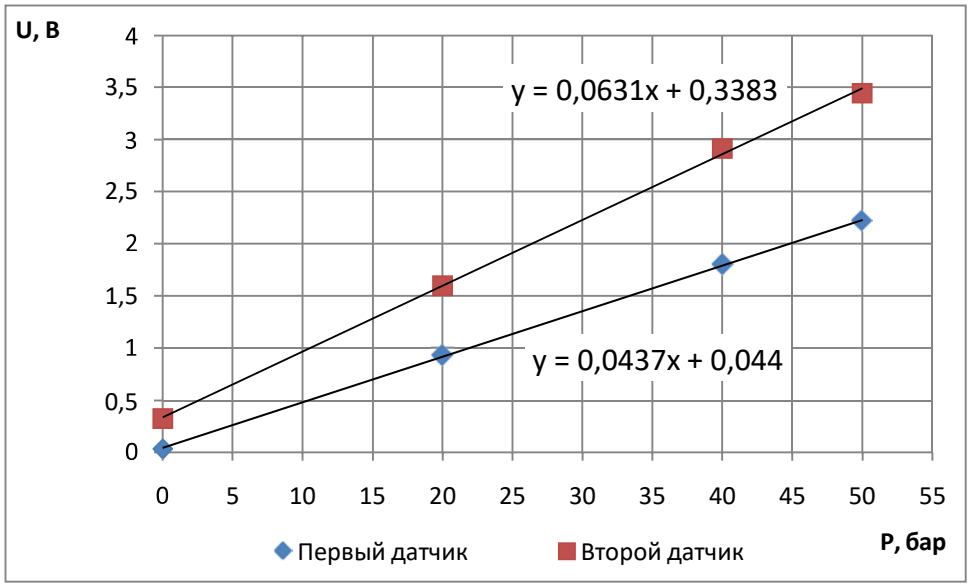
| Параметр | Значение |
|---|---|
| Напряжение питания, В | 5 |
| Максимальный потребляемый ток, мА | 575 |
| Диапазон выбора G | 1…1000 |
| Полоса пропускания при G > 10, кГц | 100 |
| Точность при G > 1, % | 0,35 |

Для уменьшения влияния фонового шума на снимаемые кривые давления усилитель сигнала установлен в непосредственной близости от датчиков давления. Сигнальные провода датчиков и кабель управления работой форсунки экранированы, экран заземлен.

На рисунке 3.7 приведены графики калибровки тензодатчиков с усилителями.




а)




б)

Рисунок 3.7 Калибровочные данные

а) датчика давления, установленного на насос-форсунке, б) датчика давления установленного на устройстве определения характеристики впрыскивания.

Измерение силы тока производились датчиком тока (обозначение 1 687 224 969) производства фирмы BOSCH, который позволяет измерять силу тока до 30 ампер.

Для исследований систем топливоподачи был собран информационно-измерительный комплекс. Комплекс состоит из ПК Hewlett-Packard, аналого-во-цифрового преобразователя ZET 210 и ряда преобразователей.

Модуль АЦП ZET 210 [97] предназначен для измерений параметров сигналов в широком частотном диапазоне (с частотой дискретизации до 500 кГц), поступающих с различных первичных преобразователей. Подключение к ПЭВМ и питание модуля осуществляется по шине USB 2.0. Управление и сбор информации производится непосредственно по командам с компьютера. Основные технические характеристики АЦП ZET 210 представлены в таблице 3.5.

Функциональная блок-схема модуля представлена на рисунке 3.8 и работает следующим образом. Шестнадцатиканальный мультиплексор коммутирует последовательно все выбранные каналы к одному операционному усилителю через равные промежутки времени.

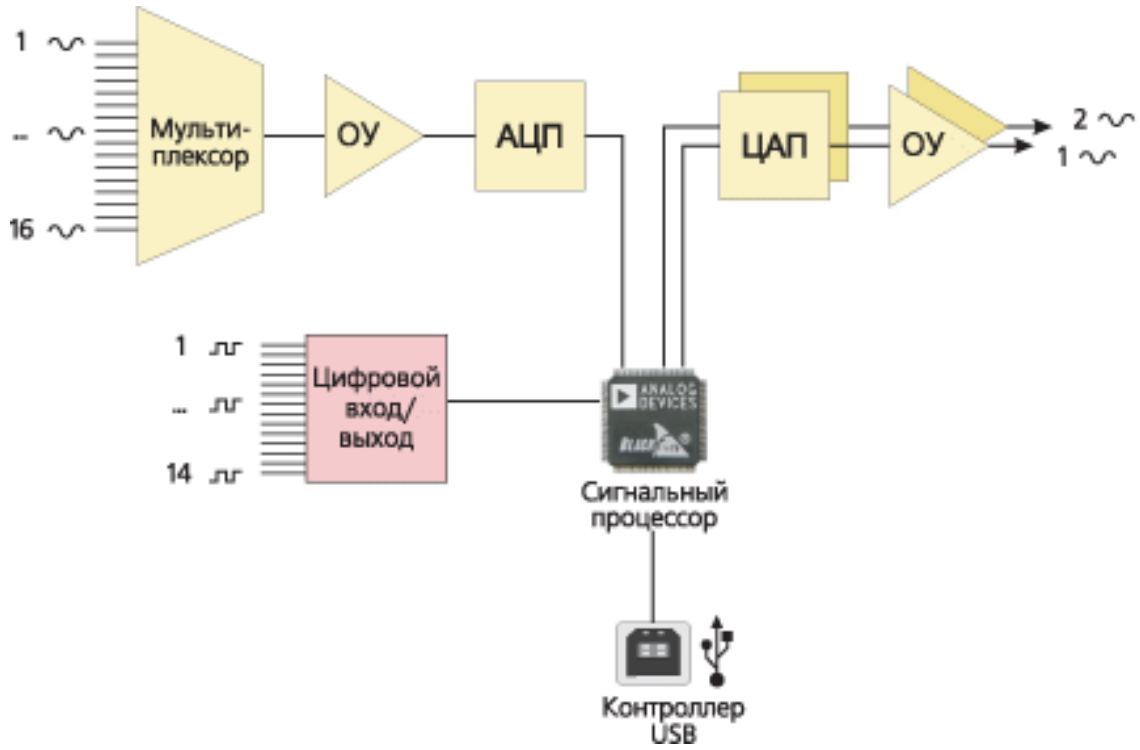



Рисунок 3.8 Функциональная блок-схема модуля ZET 210

В момент переключения каналов от сигнального процессора поступает команда на начало преобразования для АЦП, по окончании преобразования

АЦП поднимает флаг готовности данных преобразования и происходит прерывание в сигнальном процессоре. Сигнальный процессор сохраняет данные во внутренней памяти для дальнейшей передачи контроллеру USB.

Таблица 3.5 Основные технические характеристики АЦП ZET 210

| Параметр | Значение |
|---|---|
| **Аналоговый вход (АЦП)** | |
| Количество входов | 16 синфазных / 8 дифференциальных |
| Суммарная частота преобразования по всем включенным каналам, кГц | до 500 |
| Количество разрядов АЦП | 16 |
| Максимальное входное напряжение, В | ± 7 |
| Входное сопротивление, кОм | 2 |
| Динамический диапазон, дБ | 84 |
| Максимальная неравномерность АЧХ в частотном диапазоне 10 Гц...200 кГц, дБ | 1 |
| Защита входов при включенном питании, В | ± 30 |
| Защита входов при выключенном питании, В | ± 30 |
| Межканальное проникновение, дБ | - 72 |
| Входная емкость, пФ | 20 |
| **Цифровой вход** | |
| Количество каналов | 14 |
| FIFO-буфер | 16 кслов |
| Тип логики | TTL |
| Логический "0" | от 0 до 0,8 В ($I_{вх}$= 400 мкА) |
| Логическая "1" | от 2,4 до 5 В ($I_{вх}$ = 20 мкА) |
| Защита от короткого замыкания | |
| **Цифровой выход** | |
| Количество каналов | 14 |
| FIFO-буфер | 16 кслов |
| Тип логики | TTL |
| Логический "0" | от 0 до 0,4 В ($I_{вых}$ = 25 мА) |
| Логическая "1" | от 2,4 до 3,3 В ($I_{вых}$= 25 мА) |
| Защита от короткого замыкания | |
| **Дополнительные характеристики** | |
| Габаритные размеры | 90 x 110 x 35 мм |
| Вес | 0,2 кг |
| Тип разъема аналогового входа/выхода | DSUB DB-25 |
| Тип разъема цифрового входа/выхода | DSUB DB-15 |

Вся информация из модуля ZET 210 поступает в компьютер. Специальная программа обработки сигналов «Zetlab» научно-производственного предприятия «ЗЭТ» позволяет записывать и производить статическую обработку полученных данных.

### 3.2 Обработка экспериментальных данных, оценка погрешностей измерений

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась на персональном компьютере при помощи стандартных программ специализированного программного пакета обработки сигналов ResultViewer научно-производственного предприятия «ZetLab».

Относительная погрешность измерения цикловой подачи топлива рассчитывалась по формуле:

$$\Delta = \Delta g_i / g_i = \sqrt{(\Delta T/T)^2 + (\Delta R/R)^2 + (\Delta M/M)^2} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

где ΔT/T - относительная погрешность, связанная с тарировкой измерительной аппаратуры;

ΔR/R - относительная погрешность, вызванная самой аппаратурой;

ΔM/M - относительная погрешность, связанная с обработкой полученных результатов.

Погрешности обработки результатов вызываются особенностями этого процесса:

$$\Delta M/M = (0{,}01/2 \cdot 0{,}05) \cdot 100\% = 1\% \quad (3.3)$$

Общая предельная ошибка составит:

$$\Delta = \sqrt{2{,}55^2 + 0{,}7^2 + 1^2} \cdot 100\% = 2{,}8\% \quad (3.4)$$

Среднеквадратичная ошибка принимается равной 1/3 предельной:

$$\sigma = 2{,}8/3 = 0{,}93\% \quad (3.5)$$

Таблица 3.6 Вероятная, абсолютная и относительная ошибки измерений.

| Наименование определяемой величины | Размерность | Абсолютная ошибка (max) | Относительная ошибка, % |
|---|---|---|---|
| Цикловая подача топлива | грамм | 3,48 | ±2,8 |
| Продолжительность впрыскивания | миллисекунд | 0,29 | ±1,1 |
| Давление: | | | |
| - топлива (до 200 МПа) | МПа | 0,01 | ±0,5 |
| - топлива (до 5 МПа) | МПа | 0,001 | ±1,5 |
| Ток управления | А | 0,05 | ±0,5 |

### 3.3 Метод экспериментального исследования технического состояния прецизионных элементов насос-форсунки

В связи с тем, что основной причиной выхода из строя насос-форсунок является износ прецизионных элементов насос-форсунок, нами предложен и апробирован способ поэлементной проверки насос- форсунок с электронным управлением, который не требует специально- го оборудования и отличается простотой, малой трудоемкостью и точ- ностью диагноза[8].

Перед проверкой насос-форсунки ее плунжер жестко фиксируется, опорная пробка клапана насос-форсунки демонтируется. Вместо распылителя вставляется переходник, соединяемый со стендом для проверки форсунок. Испытуемый клапан насос-форсунки подключается к модулятору, который путем изменения скважности сигнала позволяет управлять положением запорного элемента.

Способ проверки заключается в следующем: от широтно-импульсного модулятора 10 (рисунок 3.9) на электромагнит клапана 1 подается сигнал, при этом клапан 1 закрывается, разобщая полость вы-

сокого давления *Д* и сливной канал *В*. Топливо от стенда под высоким давлением (до 35 МПа) через переходник 9 поступает к испытуемому электромагнитному клапану 1.

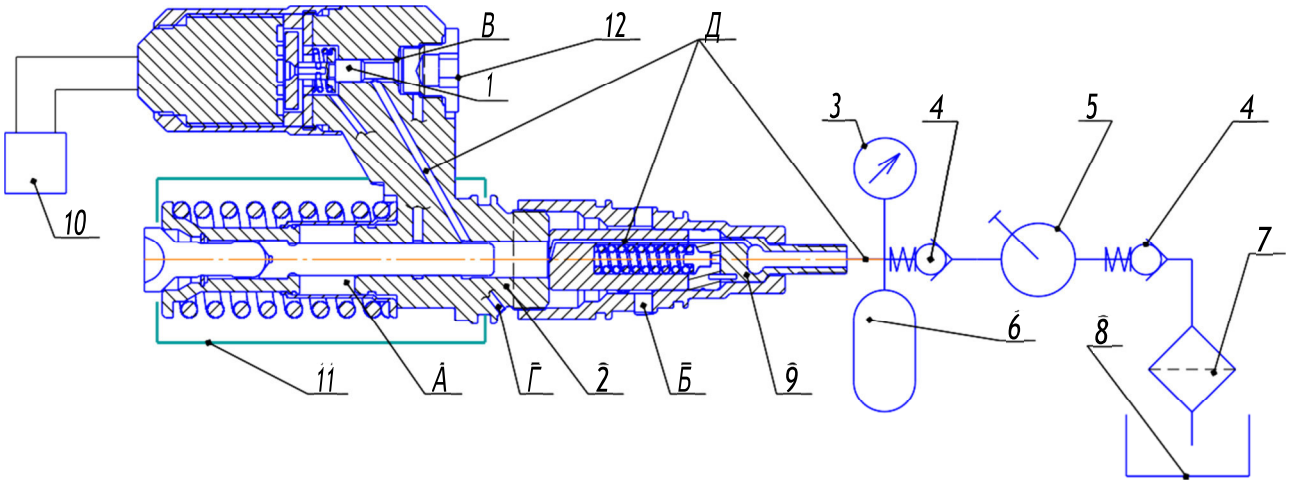



Рисунок 3.9 Схема подключения насос-форсунки к стенду

1 - запорный клапан; 2 - насос-форсунка; 3 - манометр; 4 - клапан; 5 - ручной нагнетающий насос; 6 - компенсационный объем; 7 - топливный фильтр; 8- топливный бак; 9 - переходник; 10 - блок управления; 11 - фиксатор плунжера; 12 - опорная пробка. А – контроль плунжерной пары; Б – контроль распылителя и торцевых уплотнений проставки; В – контроль герметичности запорного конуса клапана; Г – контроль направляющей запорного клапана; Д – линия высокого давления.

Если техническое состояние клапана, плунжера и торцевых поверхностей в норме, то давление остается постоянным, в противном случае давление снижается. Если топливо просачивается через полость А плунжера, значит изношен плунжер, если утечка топлива идет через входные отверстия Б, то негерметичны торцевые поверхности распылителя и корпуса. Если через полость запорного конуса клапана В - то нарушена герметичность запорного конуса клапана. Гидроплотность направляющей части клапана определяется по быстроте падения

давления в манометре при просачивании топлива через канал обратного слива Г. Таким образом, на основании скорости падения давления и места просачивания топлива можно сделать вывод о техническом со- стоянии прецизионных сопряжений элементов испытуемой насос-форсунки и принять решение об их замене либо восстановлении. Данная методика использовалось для определения влияния наработки насос-форсунки на техническое состояние прецизионных элементов насос-форсунки.

При кажущейся простоте данный метод позволяет снизить трудо-емкость проверки, не требует специального оборудования, но весьма эффективен. Как результат интеллектуальной собственности метод проверки прецизионных сопряжений насос-форсунок оформлен в виде ноу-хау и передан в специализированное предприятие по ремонту топливной аппаратуры ООО «Башдизель».

# 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НАСОС-ФОРСУНКИ

## 4.1 Влияние изменений структурных параметров насос-форсунки на их диагностические параметры

Экспериментальные исследования рабочего процесса насос-форсунки дизеля DC11.03 были проведены с целью уточнения и проверки результатов расчетно-численных исследований и оценки адекватности полученных математических выражений, описывающих процесс работы электромагнитного запорного клапана насос-форсунки. Для исключения влияния помех и случайных отклонений экспериментальные кривые усреднялись по пяти последовательным впрыскам.

Стендовые испытания насос-форсунки проводились с целью проверки и уточнения границ допустимых отклонений, полученных рас- четно-численным моделированием. В ходе экспериментов исследова- лись процессы, происходящие во всех диагностических параметрах на- сос-форсунки при последовательном изменении каждого структурного параметра и проводилось их сравнение с данными, полученными рас- четным путем. Для раскрытия взаимосвязей между диагностическими и структурными параметрами, в качестве примера ниже представлены некоторые из многочисленных файлограмм, полученных экспе- риментально в различных режимах работы.

Рассмотрим экспериментальные осциллограммы, полученные в номинальном режиме. На рисунке 4.1. представлены кривые давления в надплунжерной полости при изменении воздушного зазора между электромагнитом и якорем.

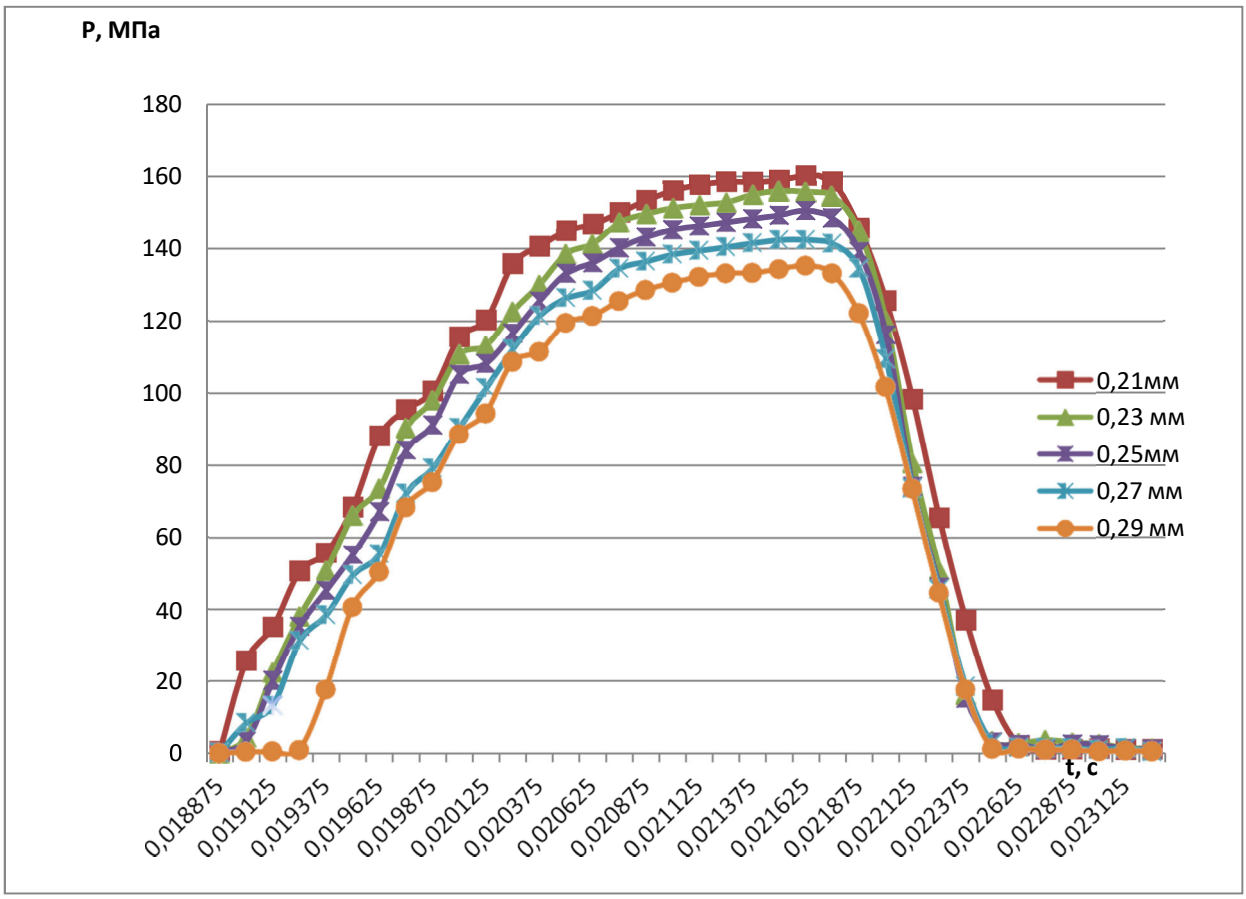



Рисунок 4.1. Изменение давления в надплунжерной полости в процессе впрыска топлива при изменении воздушного зазора между электромагнитом и якорем в номинальном режиме работы.

Из рисунка 4.1 видно, что увеличение воздушного зазора между якорем и электромагнитом влияет с 0,21 до 0,29 мм, приводит к запаздыванию закрытия клапана, вследствие чего давление надплунжерной полости тоже снижается, так как через открытый клапан отводится дополнительное количество топлива.

Аналогичным способом были проанализированы графики давления в надплунжерной полости для других режимов работы насос-форсунки (рисунки представлены ниже).

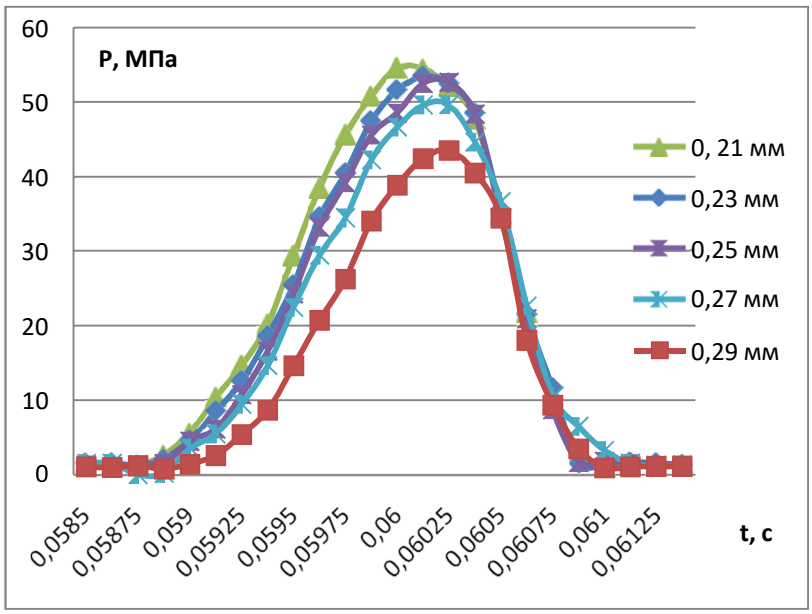



Рисунок 4.2. Изменение давления в надплунжерной полости в процессе впрыска топлива при изменении воздушного зазора между электромагнитом и якорем в режиме холостого хода.

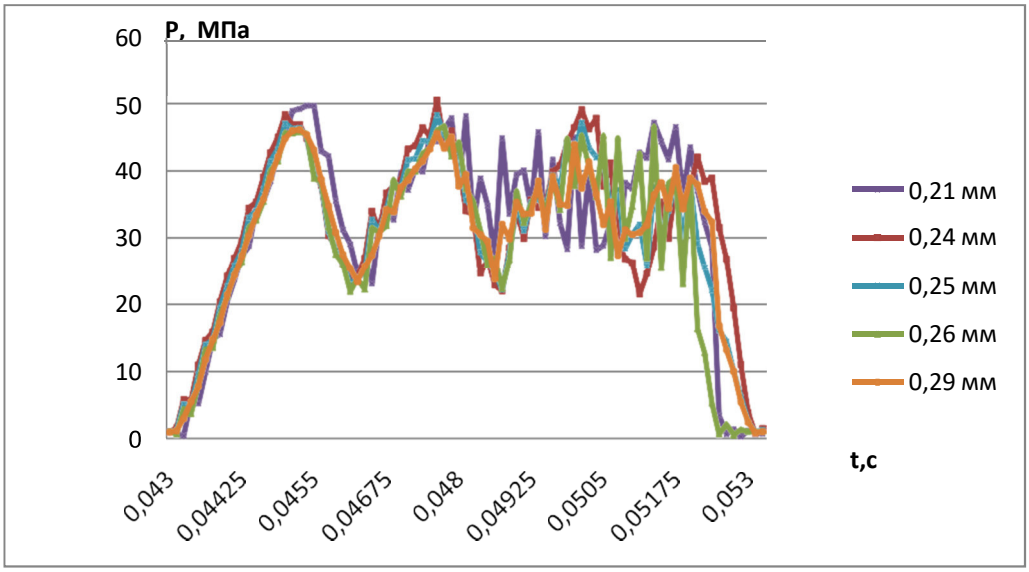



Рисунок 4.3. Изменение давления в надплунжерной полости в процессе впрыска топлива при изменении воздушного зазора между электромагнитом и якорем в режиме пуска.

Для определения влияния воздушного зазора между электромагнитом и якорем насос-форсунки на цикловую подачу были проведены эксперименты в двух режимах управляющего сигнала электромагнита при разной частоте вращения привода насос-форсунки. Полученные результаты представлены в

в таблице 4.1, а построенные на их основе зависимости между величиной воздушного зазора и цикловой подачей приведены на рисунке 4.4.

Таблица 4.1. Данные полученные при испытании насос-форсунки с изменением воздушного зазора.

| № п/п | Воздушный зазор δ, мм | n, мин$^{-1}$ | Продолжительность управляющего сигнала t, мкс | Цикловая подача $g_ц$, мм$^3$/ц (по тест-плану) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,29 | 300 | 3,2 | 20,3 |
| 2 | | 500 | 2,6 | 105,8 |
| 3 | | 1000 | 2,6 | 176,8 |
| 4 | 0,27 | 300 | 3,2 | 24,1 |
| 5 | | 500 | 2,6 | 112,5 |
| 6 | | 1000 | 2,6 | 209,8 |
| 7 | 0,25 | 300 | 3,2 | 30,0 (23,9 - 49,6) |
| 8 | | 500 | 2,6 | 130,6 (111,3-141,6) |
| 9 | | 1000 | 2,6 | 220,3 (208,4-235) |
| 10 | 0,23 | 300 | 3,2 | 49,1 |
| 11 | | 500 | 2,6 | 136,7 |
| 12 | | 1000 | 2,6 | 234,2 |
| 13 | 0,21 | 300 | 3,2 | 40,7 |
| 14 | | 500 | 2,6 | 142,1 |
| 15 | | 1000 | 2,6 | 244,8 |

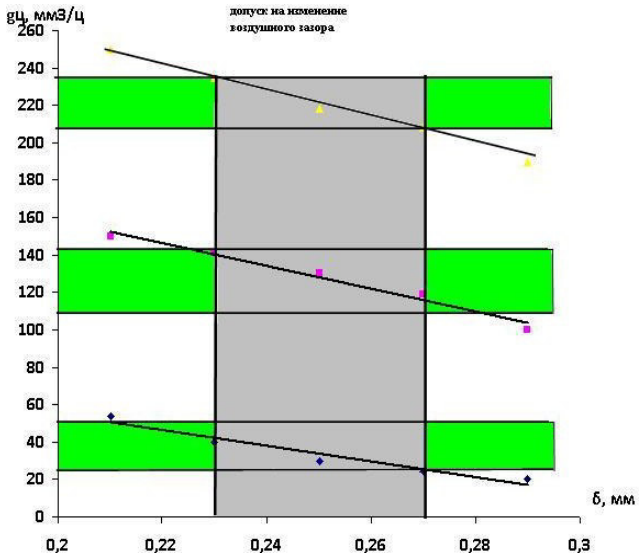



Рисунок 4.4 График зависимостей между воздушным зазором и цикловой подачей в различных режимах работы.

Характер установленной взаимосвязи величины цикловой подачи с величиной хода якоря запорного клапана показаны на рисунке 4.5.

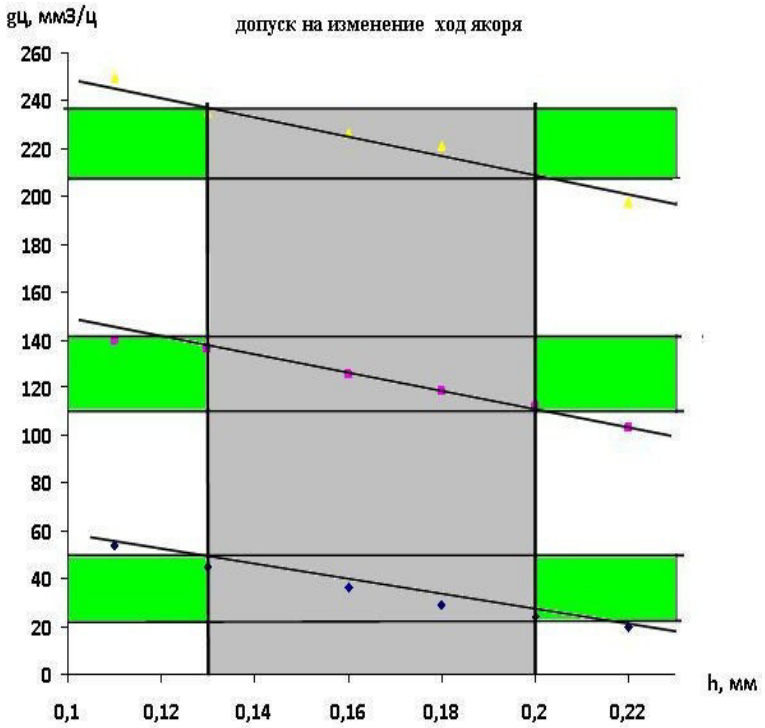


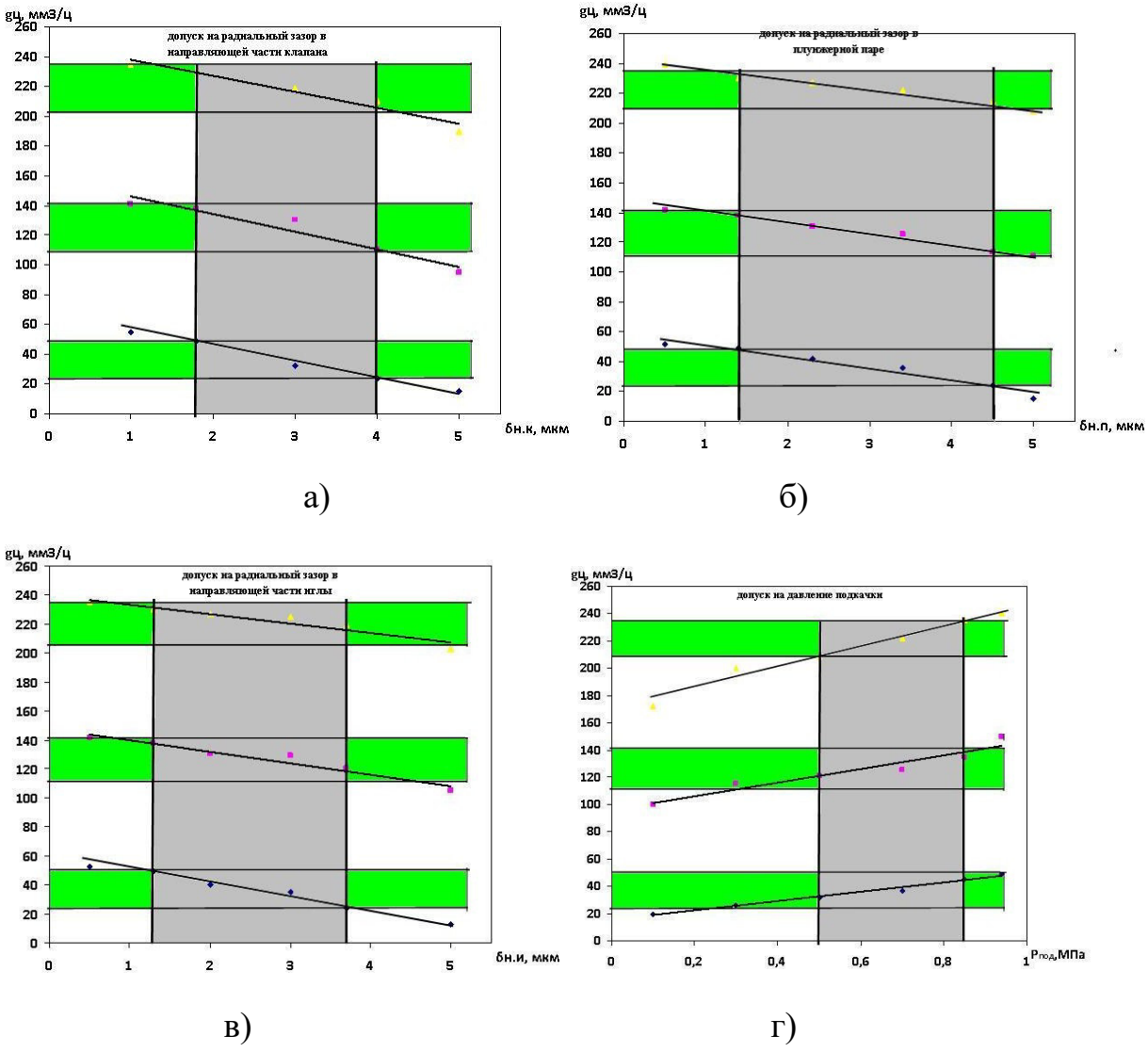

Рисунок 4.5 График зависимости цикловой подачи топлива $g_ц$ от хода якоря $h$ в разных режимах работы

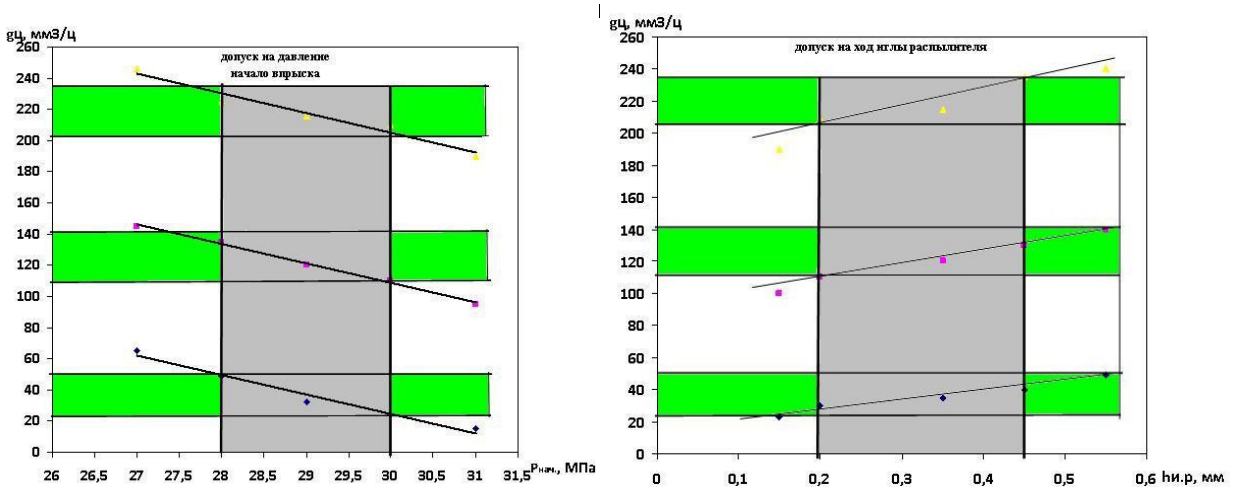
По графику видно, что уменьшение хода якоря вызывает увеличение цикловой подачи топлива, что обусловлено увеличением продолжительности впрыскивания при высоких давлениях топлива в топливоподающей системе. Допустимое отклонение цикловой подачи, например, в номинальном режиме работы, нормируемое заводом изготовителем, составляет от 208,4 до 235 мм$^3$ на рисунке показано зеленым цветом. Данному пределу на графике соответствует изменение хода якоря в пределах 0,14 (+ 0,006- 0,004 мм) на рисунке показан серым цветом. Видно, что наиболее информативными режимами работы для цикловой подачи топлива по структурному параметру «ход якоря» являются номинальный. Анализ данного графика экспериментально подтверждает полученные расчетным путем значения допустимых отклонений хода якоря (рисунок 2.12).

Так как в технологическом описании процесса ремонта насос-форсунок не приводится обоснованных данных по допустимым отклонениям воздуш-

ного зазора при сборке насос-форсунки, то данные зависимости позволяют с достаточной точностью определить и аргументировано утверждать, что при указанных в тест-плане допустимых цикловых подачах (табл. 4.1) возможные отклонения величины воздушного зазора лежат в пределах 0,25 ± 0,02 мм.

Аналогичным способом были проанализированы файлограммы характеристик впрыскивания (рисунок 4.6) и составлены графики для других 12-ти наиболее значимых структурных параметров насос-форсунки. Наличие таких данных делает возможным отказаться от тест-планов производителей и выработать независимые рекомендации по ремонту насос-форсунок.






д) е)

Рисунок 4.6 График зависимости цикловой подачи топлива $g_ц$ в разных режимах работы от: а) радиального зазора в направляющей части клапана; б) радиального зазора в плунжерной паре; в) радиального зазора в направляющей части иглы распылителя; г) давления подкачки; д) начала впрыска; е) хода иглы распылителя.

Таким образом, в ходе проведенных экспериментальных исследований подтверждена достоверность полученной расчетным путем таблицы обоснованных допусков структурных параметров, обеспечивающих заданные показатели работы насос-форсунки и определены режимы для их диагностирования (таблица 4.2). Доказано, что требования к контролю данных показателей при сборке и регулировке насос-форсунки могут быть существенно расширены по сравнению с заводскими требованиями, например, ход якоря может достигать 0,17 мм, вместо установленного значения 0,14, т.е увеличиваться на 21,5% без заметного влияния на показатели работы насос-форсунки в целом.

Таблица 4.2 Допустимые отклонения структурных параметров насос-форсунки

| Шифр | Структурный параметр | Режимы | Заводские значения | Рекомендуемый допуск |
|---|---|---|---|---|
| | Плунжерная пара | | | |
| S1 | Гидроплотность плунжерной пары (радиальный зазор) | ХХ | 3 мкм | 1,4…4,5 мкм |
| S4 | Износ толкателя | - | отсутствует | 0,2…9 мкм |
| | Электромагнитный клапан | | | |
| S5 | Воздушный зазор | - | 0,25 мм | 0,2…0,27 мм |
| S6 | Герметичность запорного конуса клапана | Н | полная | до 0,2 $мм^3/с$ |
| S7 | Ход якоря | - | 0,14 мм | 0,13…0.17 мм |
| S8 | Гидроплотность направляющей части клапана (радиальный зазор) | ХХ | 2,5 мкм | 1,8…4,0 мкм |
| | Распылитель | | | |
| S14 | Давление начала впрыскивания | ХХ | 28,0 МПа | 28…30 МПа |
| S16 | Закоксовывание или износ сопел распылителя ($\mu f$ всех групп) | ХХ | 0,222$мм^2$ | 0,215…0,262$мм^2$ |
| S17 | Гидроплотность направляющей части (радиальный зазор) | Н | 2,5 мкм | 1,3…3,7 мкм |
| S18 | Ход иглы распылителя | Н | 0,3 мм | 0,2…0,45 мм |
| | Корпус | | | |
| S21 | Эффективное проходное сечение сетчатого фильтра | Н | отсутствует | 0,35…0,45 $мм^2$ |
| S24 | Давление подкачки | Н | 0,75 МПа | 0,5…0,85 МПа |

Аналитическая работа, проделанная в ходе исследования, позволила выявить закономерности изменения диагностических параметров при нарушении работы какого-либо структурного параметра насос-форсунки. На этой основе была разработана методика ее поэлементного диагностирования с возможностью определения конкретной неисправной детали насос-форсунки по данным безразборного диагноза.

Имея полученные расчетным путем данные можно легко составить таблицы, показывающие влияние неисправности каждого из структурных пара-

метров на диагностические, и при помощи экспресс-диагностики определить какой конкретно элемент подлежит ремонту или замене.

## 4.2 Разработка методики поэлементного диагностирования насос-форсунок

Следующим этапом работы является разработка методики поэлементного диагностирования, путем анализа состояния каждого диагностического параметра при выходе из допуска структурного параметра на разных режимах работы дизеля (номинальный и холостой ход). Если при изменении конкретного структурного параметра, отклонение какого-либо из диагностических параметров не выходит за пределы допускаемых значений, то данный диагностический параметр по отношению к данному структурному параметру на данном режиме не информативен «-». Если отклонение выходит за допустимые пределы, причем так, что увеличение значения структурного параметра приводит к увеличению значения диагностического параметра, то в таблице записывается ↑ ‖, если зависимость обратная, то ↓ ‖.

В результате впервые была составлена таблица неисправностей с откорректированными в ходе проведенных экспериментальных исследований структурными параметрами. Результаты отражены в таблицах 4.3, 4.4.

Диагностирование насос-форсунки проводится в двух основных режимах работы, при которых определяются значения всех диагностических показателей насос-форсунки. Определение значения всех диагностических показателей может быть реализовано в безмоторных и моторных условиях. В ходе проведенных экспериментальных исследований видно, что использование полного объема экспериментов для диагностики некоторых дефектов является избыточным, поэтому в ходе обработки экспериментальных значений после получения гарантированного заключения о состоянии насос-форсунки, диагностирование может быть досрочно прекращено.

Например (таблица 4.3), при испытании насос-форсунки установлено, что цикловая подача выше нормативной, сила электромагнита и продолжи-

тельность впрыскивания увеличились, при этом задержка начала впрыскивания уменьшилась, другие показатели в норме. По тому, где большинство признаков совпадают, видно, что с достаточной долей вероятности причиной является нарушение хода клапана. Использование данной методики позволяет существенно снизить трудоемкость дефектовки деталей насос-форсунки, избежать необоснованной замены работоспособных деталей и существенно уменьшить стоимость ее ремонта.

Таблица 4.3 Влияние выхода из допуска структурных параметров насос-форсунки на еѐ диагностические показатели (номинальный режим работы)

| Диагностический параметр | Структурный параметр | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Гидроплотность направляющей штуцера | Износ толкателя штуцера | Воздушный зазор | Герметич. запорного конуса | Ход якоря | Гидроплотность направляющей клапана | Давление начала впрыскивания | Эффективное проходное сечение распылителя | Гидроплотность иглы распылителя | Ход иглы распылителя | Эффективное проходное сечение щелевого фильтра | Давление подкачки |
| $g_ц$ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ |
| $I_{эм}$ | - | - | ↑ | - | ↓ | - | - | - | - | - | - | - |
| $\Delta t$ | ↑ | - | ↑ | ↑ | ↓ | ↑ | ↓ | - | ↑ | - | - | - |
| $\tau_{впр}$ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ | - | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ |

Аналогичным способом было проанализировано влияние выхода из допуска структурных параметров насос-форсунки на еѐ диагностические показатели в режиме холостого хода. Результаты представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4 Влияние выхода из допуска структурных параметров насос-форсунки на еѐ диагностические показатели (режим холостого хода)

| Диагностический параметр | Структурный параметр | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Усилие пружины клапана | Гидроплотность клапана | Эфф. проход. сечение распыл | Герметич. запорного конуса | Ход якоря | Воздушный зазор | Эфф. прох. сечен. щелевого фильтра | Гидроплотность по торц. поверх. распылителя | Ход иглы распылителя | Давление слива | Состояние электрон. элементов | Усилие пружины якоря | Утечки по уплотнительной шайбе | Объем надлунжер. пространства |
| $g_ц$ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ |
| $I_{эм}$ | - | - | - | - | - | ↑ | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $\Delta t$ | ↑ | ↓ | ↓ | - | - | ↑ | - | ↓ | - | - | - | ↑ | ↑ | - |
| $t_{впр}$ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | - | ↑ | ↓ | ↑ | ↓ | - | ↓ | ↓ | ↓ |

По результатам таблиц можно проследить конкретную неисправность насос-форсунки, т.е. при выходе из допуска диагностического параметра в ту или иную сторону можно выявить, какой структурный параметр вышел из допустимого предела отклонения от заданного значения и требует корректировки путем регулировки или замены.

# 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО

В данной работе предлагается стенд для диагностирования разных типов насос-форсунок. Также диагностический модуль для диагностики электромагнитных клапанов насос-форсунок. Экономический эффект от использования разработанных устройств достигается за счет снижения трудоемкости диагностических и ремонтных работ при испытании насос-форсунок.

## 5.1 Разработка стенда для испытания насос-форсунок с бесступенчатой регулировкой хода плунжера

В настоящее время для повышения технико-экономических показателей дизелей применяют различные типы насос-форсунок. Для испытания насос-форсунок используют специальное оборудование, включающее в себя устройство называемое CAM-BOX. Данное устройство представляет собой отдельный блок, устанавливаемый на стенд при испытании насос-форсунок, основной функцией которого является крепление насос-форсунок, привод в движение плунжера и подача топлива к насос-форсунке.

Привод кулачкового вала CAM-BOX осуществляется от силового привода стенда. Для измерения цикловой подачи используется система сбора топлива самого стенда. Подача и слив топлива также осуществляется от базового стенда.

Существуют различные конструкции CAM-BOX, отличающиеся в основном способом привода плунжера насос-форсунки в движение и конструкцией установочных адаптеров. Основная сложность заключается в том, чтобы обеспечить заданный (для каждой насосфорсунки индивидуальный) ход плунжера. Далеко не все оборудования могут обеспечить путем регулировки заданный заводом-изготовителем
ход плунжера.

Предлагаемый стенд для испытания насос-форсунок обеспечивает новый технический эффект – возможность безразборного регулирования величины хода подвижного толкателя плунжера насос-форсунки в зависимости от модели испытываемой насос-форсунки, который достигается тем, что подвижный толкатель, воздействующий на плунжер испытываемой насос-форсунки посредством упорного поршня и поддерживаемый пружиной и давлением масла, обеспечивает возможность регулирования величины хода плунжера, путем перемещения подвижной втулки, содержащей два отверстия, расположенных на разных уровнях.

За счет реализации бесступенчатого изменения величины хода подвижного толкателя плунжера в стенде для испытания насос-форсунок появляется возможность испытания различных моделей на- сос-форсунок, конструктивно имеющих различный рабочий ход на од- ном стенде, что позволяет сократить трудоемкость испытания насос- форсунок, повысить производительность и уменьшить себестоимость выполняемых работ.

Стенд для испытаний насос-форсунок с гидромеханическим приводом является патентной разработкой кафедры «Тракторы и автомобили» Башкирского государственного аграрного университета. В данном стенде отсутствует жесткая механическая связь насос-форсунки с кулачком, а регулирование хода плунжера осуществляется при помощи перемещения сливного жиклера толкателя.

Стенд включает в себя подвижный в корпусе толкатель 3 (рисунок 5.1), с жиклером 11, обратным клапаном 9 и упорным поршнем 2, установленный соосно с ним подвижный сектор 4, а также масляный насос 6, приводимый в движение электромотором 5, предохранительный клапан 7, фильтр 13, масляный бак 12, приводной вал 14.

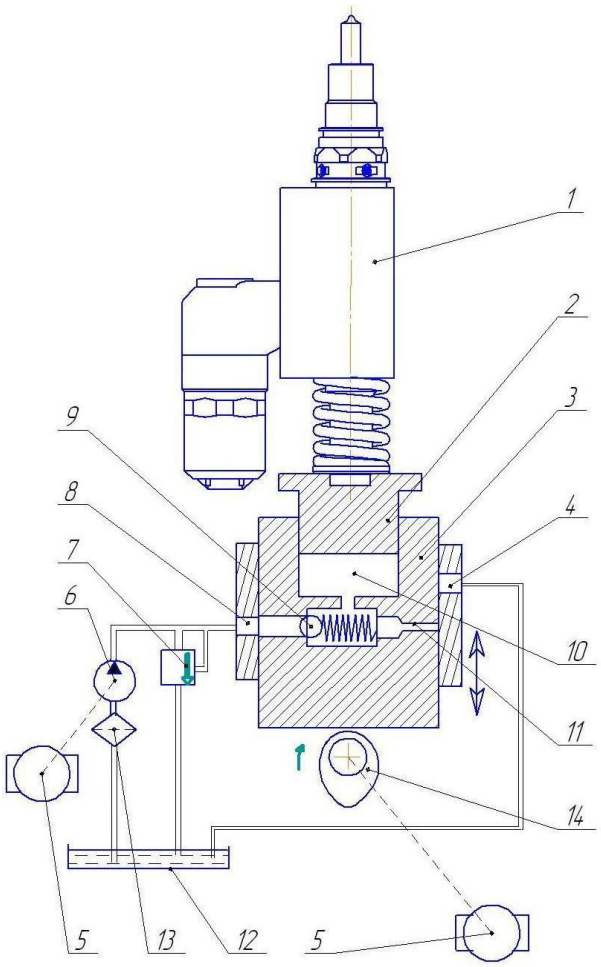



Рисунок 5.1 Стенд для испытания насос-форсунок с бесступенчатым регулированием хода плунжера

1-насос-форсунка, 2- упорный поршень, 3- толкатель, 4- подвижный сектор, 5-электромотор, 6- масляный насос, 7- предохранительный клапан, 8- полость дозарядки, 9-обратный клапан, 10- полость высокого давления, 11- жиклер, 12- масляный бак, 13-фильтр, 14- приводной вал.

Стенд работает следующим образом. Приводной вал 15 посредством кулачка перемещает толкатель 3 в осевом направлении. В нижнем положении канал обратного клапана 9 совмещается с полостью 8 до зарядки и масло под давлением, создаваемым насосом, 6 поступает в полость 10 высокого давления. Упорный поршень 2 перемещается до упора в плунжер насос-форсунки 1 выбирая свободный зазор. При набегании кулачка приводного вала 14 на толкатель, последний перемещается вверх. Полость 10 высокого

давления запирается обратным клапаном 9 и за счет несжимаемости масла, находящегося в полости 10 высокого давления, усилие передается на плунжер насос-форсунки 1. Перемещение плунжера продолжается до момента совмещения канала жиклера 11 со сливным каналом подвижного сектора 4. В этот момент масло сливается из полости 10 высокого давления, таким образом, упорный поршень 2 прекращает свое движение, несмотря на то, что толкатель 3 еще движется вверх. При опускании толкателя 3 цикл повторяется.

Таким образом, путем перемещения подвижного сектра 4 регулировочным винтом обеспечивается возможность бесступенчатой регулировки хода подвижного толкателя плунжера испытываемой насос-форсунки в зависимости от ее модели, что позволяет испытывать на одном стенде насос-форсунки с различной величиной хода плунжера.

### 5.2 Диагностический модуль с программным обеспечением

В процессе эксплуатации седло запорного клапана изнашивается, в результате чего ход клапана увеличивается и, соответственно, изменяется воздушный зазор, что приводит к изменению начала подачи и количества впрыскиваемого топлива. Вследствие увеличения зазора цикловая подача снижается и начало впрыскивания топлива становится более поздним [59].

Согласно тест-плану завода изготовителя насос-форсунки, изменение периода времени с момента подачи управляющего импульса до закрытия клапана (BIP сигнал) не должно быть более 500 мкс. При проведении экспериментальных исследований по оценке взаимосвязи между значениями BIP сигнала и скважностью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) было установлено, что для насос-форсунки допусковые граничные условия BIP сигнала соответствуют 2% отклонения по скважности ШИМа.

Для определения зависимости воздушного зазора от величины скважности электромагнита были проведены эксперименты, в ходе которых изменялся воздушный зазор и оценивалась скважность открытия и закрытия клапана.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 5.2.

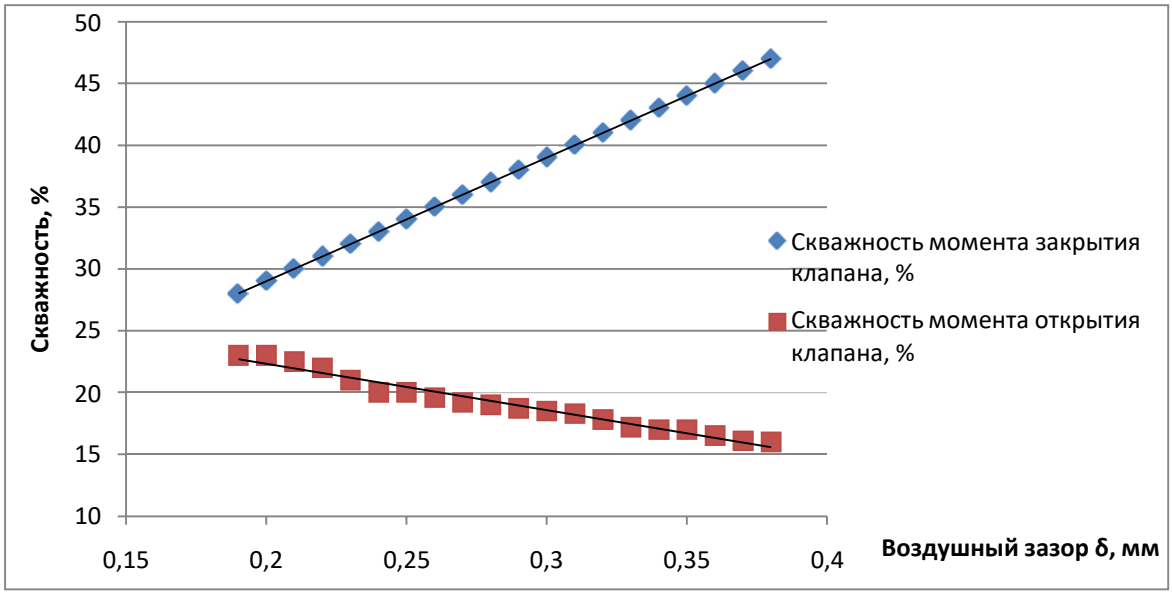



Рисунок 5.2 График зависимости скважности управляющего сигнала от воздушного зазора

В ходе проведения экспериментальных исследований по проверке воздушного зазора электромагнитного клапана насос-форсунки мы получили график зависимости скважности управляющего сигнала от воздушного зазора (рисунок 5.2). Из полученных графиков видно, как воздушный зазор влияет на скважность электромагнита. Для определения влияния воздушного зазора на цикловую подачу были проведены стендовые испытания насос-форсунки. При замере скважности эталонной насос-форсунки мы получили скважность момента закрытия клапана равной 34% и скважность момента открытия клапана 20%. Из первого эксперимента, мы знаем, что допустимые пределы отклонения сигнала по скважности составляют 2%, таким образом 34% ± 2% и 20%±2%. Для выявления зависимостей эксперимент проводили в двух режимах управляющего сигнала электромагнита при разных режимах частоты вращения привода насос-форсунки. Полученные значения заносились в журнал стендовых испытаний (таблица 5.1).

Таблица 5.1 Журнал стендовых испытаний

| № п/п | Изменяемые параметры | | | Измеряемые параметры | | | | $g_ц$, $мм^3$/ц эталонной насос-форсунки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | n, $мин^{-1}$ | δ, мм | t, мкс | t, ˚С | Скважность момента закрытия клапана, % | Скважность момента открытия клапана, % | $g_ц$, $мм^3$/ц | |
| 1 | 300 | 0,27 | 3400 | 40 | 36 | 19,2 | 24,3 | - |
| 2 | 500 | | 2800 | 40 | | | 118,8 | - |
| 3 | 800 | | 2800 | 40 | | | 169,1 | - |
| 4 | 1000 | | 2800 | 40 | | | 193,2 | - |
| 5 | 1200 | | 2800 | 40 | | | 208,7 | - |
| 6 | 300 | 0,25 | 3400 | 40 | 34 | 20 | 32,3 | 23,9÷49,6 |
| 7 | 500 | | 2800 | 40 | | | 135,6 | 116÷147,6 |
| 8 | 800 | | 2800 | 40 | | | 177,0 | 167,6÷189 |
| 9 | 1000 | | 2800 | 40 | | | 205,3 | 192,4÷216,9 |
| 10 | 1200 | | 2800 | 40 | | | 215,9 | 208,4÷235 |
| 11 | 300 | 0,23 | 3400 | 40 | 32 | 21,0 | 45,7 | - |
| 12 | 500 | | 2800 | 40 | | | 145,7 | - |
| 13 | 800 | | 2800 | 40 | | | 189 | - |
| 14 | 1000 | | 2800 | 40 | | | 216,2 | - |
| 15 | 1200 | | 2800 | 40 | | | 234,8 | - |

Согласно тест-плана завода изготовителя отклонение цикловой подачи в эксплуатации не должно выходить за допустимый диапазон, в нашем случае оно находится в пределах допустимых значений. Это подтверждает, что принятый допусковый диапазон в 2% соответствует требованию предельного отклонения по величине цикловой подачи.

Анализ полученных данных позволил разработать диагностический модуль с программным обеспечением, который позволяет диагностировать насос-форсунки на двигателе без их демонтажа. Модуль включает в себя: персональный компьютер, блок управления, разъемы для подключения к блоку управления разных автомобилей. Для работы диагностического модуля разработана программа, которая позволяет измерить скважность сигнала. Окно программы представлено на рисунке 5.3.

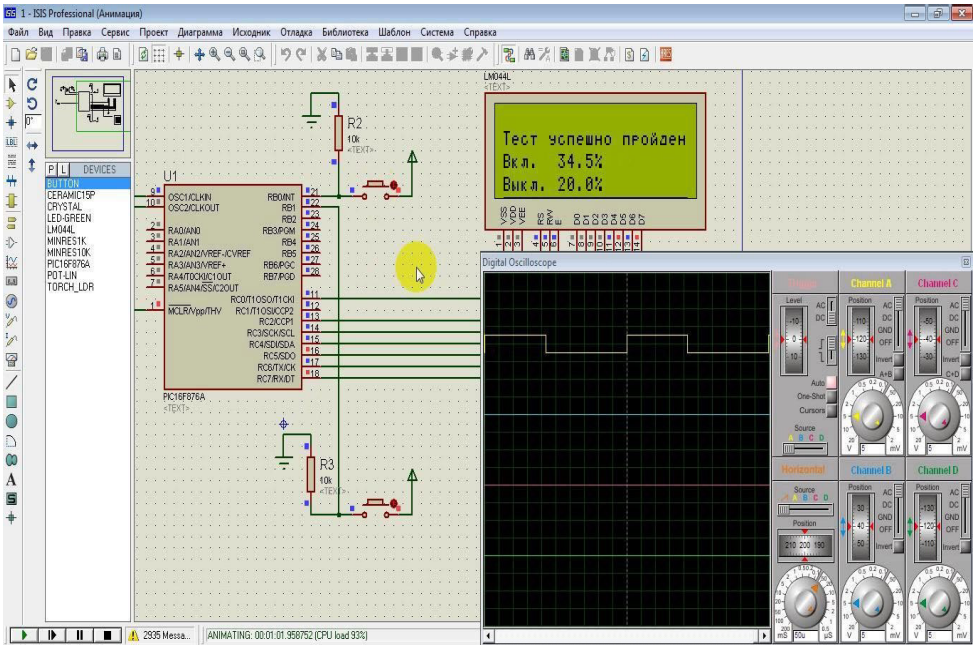



Рисунок 5.3 Вид рабочего стола программы при диагностировании насос-форсунок

Процесс диагностирования заключается в следующем: с помощью разъема диагностический модуль подключаем к блоку управления автомобиля и запускаем программу, затем подается сигнал на насос-форсунку. При срабатывании электромагнита замеряется скважность закрытия электромагнитного клапана и это информация сохраняется в блоке, при отключении электромагнитного клапана информация также передается в блок, где обрабатывается и сравнивается с эталонными значениями. Далее информация выводится на экран, где отражена работоспособность насос-форсунки или не работоспособность по скважности открытия или по скважности закрытия.

На рисунке 5.4 приведен общий вид разработанного нами диагностического модуля, а в приложении 2 программа его работы [59]. При разработке диагностического модуля в качестве управляющего был принят BIP сигнал здесь это Begin of Injection Period - начало периода впрыска. Это позволило более точно определить момент нахождения клапана в крайнем верхнем положении. Настройка системы заключалась в установке пороговых значений

считывания сигналов в момент закрытия клапана и в момент открытия клапана и внесение данных в память ЭБУ.

Рисунок 5.4 Общий вид диагностического модуля

На основе проведенных исследований была разработана методика практического использования разработанного диагностического модуля насос-форсунок автотракторных дизелей. Данная методика была апробирована в Bosch Diesel Service и доказала свою эффективность. Диагностический комплекс позволяет безразборным методом оценить техническое состояние электромагнитного клапана насос-форсунки.

Применение данной методики позволяет существенно сократить время на поиск неисправной насос-форсунки и снизить стоимость ремонта путем демонтажа с двигателя автомобиля только неисправной насос-форсунки. Для практического использования разработанного диагностического модуля для оценки работоспособности насос-форсунок автотракторных дизелей на основе анализа экспериментальных исследований, была разработана соответствующая методика.

Предложенный метод диагностирования насос-форсунок реализуется непосредственно на двигателе, это позволяет выявлять неисправные насос-форсунки быстро и точно, кроме того, с использованием данной методики можно говорить об остаточном ресурсе работы клапанного узла.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Поэлементный анализ основных конструкций насос-форсунок с электронным управлением позволил описать для них 24 структурных параметра, наиболее существенно влияющих на показатели работы насос-форсунки и установить виды воздействия на каждый из них для возврата насос-форсунки в исправное состояние. Установлено, что корректировать показатели работы насос-форсунки наиболее эффективно путем воздействия на запорный клапан.

Установлено, что при расчете рабочих процессов насос-форсунок с наработкой необходимо учитывать естественные износы деталей и утечки в прецизионных соединениях. Получены аналитические выражения для определения утечек в прецизионных сопряжениях и изменения воздушного зазора электромагнита, которыми дополнена классическая модель гидродинамического расчета топливоподающей аппаратуры. Доказано, что при расчете процесса топливоподачи насос-форсунками с учетом полученных зависимостей достоверность расчетов повышается пропорционально увеличению наработки насос-форсунки.

Расчетно-численными исследованиями обоснованы допустимые отклонения структурных параметров насос-форсунок с наработкой от значений, рекомендованных производителями, и режимы, на которых они наиболее сильно проявляются. Экспериментально подтверждены результаты численных исследований и установлены допустимые отклонения 12-ти наиболее значимых структурных параметров насос-форсунок при условии, что все диагностические показатели соответствуют показателям исправной насос-форсунки.

Доказано, что требования к контролю данных показателей при сборке и регулировки насос-форсунки могут быть существенно расширены по сравнению с заводскими требованиями, например, ход якоря может достигать 0,17 мм, вместо установленного значения 0,14мм., т.е. увеличиваться на 21,5% без заметного влияния на показатели работы насос-форсунки в целом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Аксельрод, Д.И. Поэлементное диагностирование топливной аппаратуры высокого давления дизельных двигателей [Текст]/Д.И. Аксельрод//Тр. МАДИ. 1980. -С. 25.
2. Алиев, А.М. Оценка характеристик топливоподачи высокого давления [Текст]/А.М. Алиев//Вестник МГАУ. -2009. -№4 -С. 36.
3. Алиев А.М. Анализ средств и технологий диагностирования топливных систем дизеля[Текст] /А.М. Алиев//Вестник МГАУ. -2009. -№ 4 -С. 98.
4. Алиев, А.М. Совершенствование метода и разработка средств диагностирования плунжерных пар при техническом сервисе топливной аппаратуры дизелей[Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.20.03/А.М. Алиев - М., 2011. -167 с.
5. Андреев, Ю.В. Быстроходные дизели производства зарубежных стран: учеб. пособие[Текст]/Ю.В. Андреев, А.Е. Свистула. -Барнаул Алтайский гос. техн. ун-т им. Ползунова, 2002. -169 с.
6. Асташенко, С.Б. Топливная аппаратура легковых автомобилей. Дизель: Устройство и обслуживание[Текст]/С.Б. Асташенко. -Минск: Автостиль, 2004. -112 с.
7. Ахметов А.Ф. Оценка значимости структурных параметров насос-форсунок[Текст]/Материалы всероссийской научно-практ.конф. «Агрокомплекс -2011». Часть 2.-Уфа, Изд-во Башкирский ГАУ, 2011,- с 3-6.
8. Ахметов А.Ф. Методика диагностирования насос-форсунок с электромагнитным управлением [Текст]/ Материалы Второй международной молодежной научной конференции молодых ученых России и Германии в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы Часть 1.-Уфа, Изд-во Башкирский ГАУ, 2012,- с 13-15.
9. Ахметов А.Ф. Способы оценки характеристики впрыскивания топлива форсунками дизелей [Текст]/ Роль науки в инновационном развитии

АПК: материалы Всероссийской научно- практ.конф., посвященной 80-летию проф. А.П.Иофинова -Уфа, Издательство ФГОУ ВПО «Башкирский ГАУ», 2012,- с 93-95.

10. Ахметов А.Ф. Совершенствование средств диагностики насос-форсунок автотракторных и комбайновых дизелей [Текст]/ Материалы LIII международной научно-практич конф. «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. д.т.н П.Г.Свечникова. – Челябинск : ЧГАА, 2014. – Ч. III. – 22-27с.
11. Ахметов А.Ф. Теоретические исследования влияния изменений структурных параметров на показатели работы насос-форсунок автотракторных дизелей [Текстт]/ Аграрная наука в инновационном развитии АПК: Материалы международной научно-практ.конф. Агрокомплекс–2015». Часть II. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. – 229-235 с.
12. Ахметов А.Ф., Факиев А.Ф., Нигматуллин Ш.Ф.. Методика формирования диагностических параметров насос-форсунки автотракторных дизелей [Текст]/ Материалы международной научно–практ.конф.«Агрокомплекс -2012». Часть 1.-Уфа, Изд-во Башкирский ГАУ, 2012,- с 323-325.
13. А.Ф Ахметов., Факиев А.Ф.. Влияние эксплуатационных износов насос-форсунки Bosch на показатели ее работы [Текст] / Инновационно - промышленный салон. Материалы 3 Всероссийской научно-практ.конф. «Ремонт.Восстановление.Реновация», г.Уфа 2012, стр.204-206.
14. Бацежев, Х.Х. Улучшение показателей работы тракторных дизелей путем оптимизации параметров топливоподачи при выполнении ремонтно-обслуживающих работ [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.20.03/Х.Х. Бацежев. -Краснодар, 2001. -167 с.
15. Баширов, Р.М. Топливные системы автотракторных и комбайновых дизелей, конструкционные особенности и показатели работы[Текст]/Р.М. Баширов. -Уфа: БГАУ, 2000. -156 с.

16. Биргер, И.А. Техническая диагностика [Текст] /И.А. Биргер. -М.: Машиностроение. -1978. -240 с.
17. Власов, П.А. Особенности эксплуатации дизельной топливной аппаратуры[Текст]/ П.А Власов. -М.: Агропромиздат, 1987. -367 с.
18. Вохмин, Д.М. Влияние режимов работы автомобилей на надежность топливной аппаратуры дизельных двигателей[Текст]: дис. кандидата технических наук: 05.22.10/Д.М. Вохмин. -Тюмень, 2005. -212 с.
19. Высоцкий, В.И. Использование уточненных методов расчета и сравнительных оценок топливных систем для улучшения показателей автотракторных дизелей[Текст]: дис.... канд.техн. наук: 05.20.03/В.И. Высоцкий. -Нальчик, 1998. -202 с.
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[Текст]: дис. … на соиск. учен. степ. д.т.н.: 05.20.03/И.И. Габитов;. -СПб.: 2001. -319 с.
21. Габитов, И.И. Информационно-измерительный комплекс для исследований топливоподающих систем автотракторных дизелей. Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей[Текст]: сб. науч. тр./И.И. Габитов, А.В. Неговора, М.Д. Гафуров. -СПб.: СПбГАУ, 2000. -118 с.
22. Головин, С.И. Мониторинг изнашивания деталей дизеля как средство оптимизации системы технического обслуживания[Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.20.03/С.И. Головин. -М., 2007. -201 с.
23. Горбаневский, В.Е. Оборудование для испытания топливной аппаратуры дизелей [Текст]/ В.Е. Горбаневский, Р.Н. Горбач. -М.: Машиностроение, 1987. -209 с.
24. ГОСТ 10579-88. Форсунки дизелей. Общие технические условия[Текст].-М.: Издательство стандартов, 1988. -15 с.

25. ГОСТ 17510-79. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений[Текст]. -М.: Изд-во стандартов, 1979. -23 с.
26. ГОСТ 20760-75. Техническая диагностика. Общие положения о порядке разработки систем диагностирования[Текст]. -М.: Изд-во стандартов, 1975. -4 с.
27. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения[Текст]. -М.: Изд-во стандартов, 1990. -13 с.
28. Грехов Л.В., Конструкция, расчет, и технический сервис топливоподающих систем дизелей [Текст] / Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В.. Учебное пособие. М: Легион-автодата, 3013.-192с.
29. Грехов, Л.В., Топливная аппаратура и системы управления дизелей [Текст] /Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. -М.: 2005. -348 с.
30. Грехов, Л.В. Автоматизированный комплекс для исследований и диагностирования топливных систем дизельных двигателей. Рабочие процессы дизелей: учеб. пособие [Текст] /Л.В. Грехов, В.А. Светлов, А.В. Сячинов. -Барнаул: АлтГУ, 1995 -160 с.
31. Данилов, С.В. Метод и цифровой прибор для автоматизированного определения цикловой подачи топлива при регулировании топливной аппаратуры дизелей[Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.20.03/С.В. Данилов. -М., 2010. -125 с.
32. Джексон, Р.Г. Новейшие датчики[Текст]/Р.Г. Джексон. -М.: Техносфера, 2007. -384 с.
33. Диагностики топливной аппаратуры дизельных двигателей [Текст] /Труды Седьмой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием. КИИ-2000 (24-27 октября, г. Переславль-Залесский). -М.: Изд-во: Физико-математической литературы, 2000 -Т. 2.

34. Оперативный контроль технического состояния топливной аппаратуры дизельных двигателей [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.20.03/А.А. Долгушин. -Новосибирск, 2004. -121 с.
35. Дролов, Л.В. Исследование способа оценки технического состояния дизельных двигателей по характеристикам переходного процесса в эксплуатационных условиях[Текст]: дис.... кандидата технических наук 05.20.03/А.А. Долгушин. -Новосибирск, 1982. -147 с.
36. Технические измерения и приборы[Текст] : учеб. пособие/И.Г. Друзьякин, А.Н. Лыков. -Пермь: Изд-во Пермского гос. техн.ун-та, 2008. -412 с.
37. Дыдыкин, А.М. Повышение технико-экономических показателей быстроходного дизеля путем совершенствования процесса впуска[Текст]: дис канд. техн. наук: 05.04.02/А.М. Дыдыкин. -Н. Новгород, 2010. -146 с.
38. Повышение надежности дизельных двигателей путем оптимизации регулировочных параметров топливной аппаратуры : дис. канд. техн. наук: 05.20.03/А.Н. Еремеев.-Ульяновск, 2007. -152 с.
39. Желтухин, Ю.П. Разработка автоматизированных средств для исследований и испытаний топливной аппаратуры как основы для создания САИ и АСЧТП [Текст] /Ю.П. Желтухин, А.В. Пресняков//Труды ЦНИТА. -1985. -Вып. 86. -154 с.
40. Ильин, В.А. Повышение эффективности технического сервиса топливной аппаратуры автотракторных и комбайновых дизелей[ Текст] : дис.... канд. техн. наук: 05.20.03/В.А. Ильин. -Уфа, 2006. -148 с.
41. Инсафуддинов, С.З. Совершенствование методики оценки неравномерности подачи топливных систем тракторных дизелей[Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.20.03/С.З. Инсафуддинов. -Уфа, 2004. -152 с.
42. Климпуш, О.Д. Исследование и выбор диагностических параметров автомобильных дизелей семейства ЯМЗ [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.20.03/О.Д. Климпуш. -Уфа, 1973. -168 с.

43. Козеев, А.А. Повышение эффективности диагностирования инжекторов автотракторных и комбайновых дизелей [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.20.03/А.А. Козеев. -Уфа, 2010. -128 с.
44. Коньков, А.Ю. Диагностирование технического состояния дизеля в эксплуатации на основе идентификации быстропротекающих рабочих процессов[Текст]: дис. … д-ра техн. наук: 05.04.02/А.Ю. Коньков. -Хабаровск, 2010. -414 с.
45. Корнев, В.А. Способ обеспечения оптимальной достоверности диагностирования топливной аппаратуры дизелей переносными приборами[Текст] : дис.... канд. техн. наук: 05.22.10/В.А. Корнев. -М., 1983. -183 с.
46. Коровин, А.И. Прибор для общего диагностирования топливной аппаратуры дизельных двигателей [Текст] /А.И. Коровин//сб. науч. тр. ЧПИ. -1979. -№ 233. -67 с.
47. Коффон, Дж. Расширение микропроцессорных систем[Текст]/Дж. Коффон, В. Лонг. -М.: Машиностроение, 1987. -318 с.
48. Крутов, В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания[Текст] /В.И. Крутов. -М.: Машиностроение, 1989. -416 с.
49. Крючков, С.В. Совершенствование методов и средств контроля показателей топливоподачи при испытаниях топливных насосов тракторных двигателей[Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.20.03/С.В. Крючков. -Саранск, 2006. -179 с.
50. Кулешов, А.С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания[Текст]/А.С. Кулешов, Л.В. Греков. -М.: МГТУ, 2000. -64 с.
51. Курбатов П.А. Математическое моделирование электромеханических систем электрических аппаратов [Текст]/ Курбатов П.А. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 110 с.
52. Левин, М.И. Современное состояние. Проблемы дизельной автоматики в зарубежной практике и отечественный опыт [Текс]/ М.И. Левин//Двигателестроение. -1999. -№ 4. -С. 28-31. -2000. -№ 1. -С. 19.