

На правах рукописи

ЛЕПЕШКИН

Дмитрий Игоревич

**УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОВЫШЕНИЕМ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ
ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ**

05.04.02 – «Тепловые двигатели»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Омск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)» на кафедре «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование»

Научный руководитель: Иванов Александр Леонидович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Ведрученко Виктор Родионович
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры «Теплоэнергетика»
Омского государственного университета путей
сообщения

Новосадов Сергей Юрьевич
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры «Автомобильной подготовки»
Военно-технического университета (г. Балашиха)

Ведущая организация: «Научно-исследовательский испытательный центр
бронетанковой техники» 3 ЦНИИ МО РФ

Защита диссертации состоится «27» марта 2015 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038 Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Ленина 46. Телефон 8 (3852) 29-87-22, *e-mail*: D21200403@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038 Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Ленина 46, и на сайте: <http://www.altstu.ru/main/scienceevent/thesis/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «27» января 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:
кандидат технических наук, доцент



Кулманаков С.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Тепловые двигатели и дизель в первую очередь являются основным источником механической энергии на транспорте и других отраслях народного хозяйства.

Многочисленные исследования в области технической эксплуатации большегрузных автомобилей отечественного производства свидетельствуют, что на эффективность работы дизеля в значительной степени влияет техническое состояние топливной аппаратуры высокого давления (ТАВД) и нарушения в работе её отдельных элементов приводит к снижению мощностных и экономических показателей дизеля. Кроме того, как показал анализ, около 40% отказов дизелей приходится на систему питания. Следовательно, обеспечение поддержания технического состояния топливной аппаратуры (ТА) в удовлетворительном состоянии является **актуальной задачей**.

Анализ научной, специальной литературы и работ таких ученых как И.В. Астахов, П.М. Белов, В.Р. Бурячко, Н.Р. Брилинг, Д.Н. Вырубков, Л.Н. Голубков, А.С. Орлин, Н.Х. Дьяченко, А.Л. Карунин, А.К. Костин, В.Н. Луканин, Е.К. Мазинг, В.Ф. Платонов, Р.В. Русинов, Б.Н. Фанлейб, В.М. Эфрос и многих других, рассматривавших вопросы физических основ моделирования процесса топливоподачи и улучшения его параметров, позволил сформулировать цель исследования и поставить задачи, которые предстоит решить для достижения поставленной цели.

В ходе предварительных исследований автором установлено, что изменение жесткости пружин форсунки и нагнетательного клапана (НК) оказывают значительное влияние на показатели работы дизеля. Одним из способов выявления состояния элементов ТАВД является применение диагностических комплексов способных по параметрам топливоподачи (например, изменению сигнала давления в топливопроводе высокого давления) оценивать техническое состояние данных элементов ТАВД в целом и состояние пружин форсунок и нагнетательных клапанов в частности. Это обстоятельство и определило направление исследований в данной диссертационной работе.

Общи положения диссертационного исследования

Целью исследования является улучшение мощностных и экономических параметров работы дизеля за счет повышения стабильности параметров упругих элементов топливной аппаратуры высокого давления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Уточнить закономерности изменения технического состояния ТАВД дизеля и сформировать математическую модель топливоподачи, учитывающую жесткость упругих элементов ТАВД.
2. Проанализировать эффективность известных методик определения технического состояния элементов топливной аппаратуры дизелей.
3. Разработать методику контроля состояния упругих элементов ТАВД дизеля.
4. Выполнить экспериментальные исследования влияния потери жесткости упругих элементов ТАВД на параметры топливоподачи и дизеля в целом.

5. Разработать практические рекомендации по контролю качества упругих элементов ТА дизелей в процессе их эксплуатации.

Объектом исследования является топливная аппаратура высокого давления дизеля КамАЗ 740.31-240.

Предметом исследования является влияние изменения упругих свойств пружин форсунки и нагнетательного клапана на мощностные и экономические параметры работы дизеля.

Научная новизна заключается в разработке методики оценки технического состояния ТАВД в процессе эксплуатации и в совершенствовании математической модели процесса топливоподачи ТАВД дизеля.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в решении важной научно-практической задачи улучшения показателей дизеля в условиях эксплуатации повышением стабильности работы упругих элементов ТАВД, а так же реализации основных теоретических положений до уровня технических решений, реализованных на ремонтных заводах и подтвержденными актами внедрения.

Методы исследования: для реализации задач и достижения поставленной цели в работе используются расчетно-аналитические и экспериментальные методы диагностирования, методы графической и статистической обработки экспериментальных данных, обобщение научной и специальной литературы.

На защиту выносятся:

- математическая модель процесса топливоподачи ТАВД дизеля, учитывающая параметры жесткости пружин упругих элементов ТАВД;

- результаты экспериментальных исследований параметров топливоподачи с учетом технического состояния упругих элементов ТАВД дизеля КамАЗ-740.31-240;

- методика контроля качества ТАВД на транспортном средстве по амплитудно – фазовой характеристике давления топлива (без демонтажа силовой установки).

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается фактическим объемом полученных экспериментальных данных, с использованием достигнутых теоретических результатов, применением сертифицированной современной измерительной аппаратуры, систематической её поверкой и контролем погрешностей, выполнением рекомендаций соответствующих стандартов на испытания и корректной статистической обработкой экспериментальных данных с использованием ПК. Научные положения, выводы и практические рекомендации обоснованы результатами, полученными в ходе экспериментов.

Личный вклад соискателя. В статьях, написанных в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 70%. Однако разработка общей концепции построения и положений диссертации, касающихся вопросов разработки методики контроля технического состояния ТАВД дизеля выполнены автором самостоятельно. Материалы диссертации основаны на исследованиях автора в период с 2010 по 2014 годы.

Апробация результатов работы.

Материалы диссертации были представлены и одобрены на:

- на международном конгрессе ФГБОУ ВПО «СибАДИ». Транспорт. Технологии. Инновации. Омск. 2013;
- на международной научно-практической конференции «Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов, освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики, вклад науки». Омск 2014.

Получено решение о выдаче патента на изобретение (Аккумуляторная система подачи топлива в дизель), по заявке №2013147206/06(073351) от 22.10.2013 года. Авторы: Лепешкин Д.И., Саенко М.М., Жигadlo А.П., Иванов А.Л.

Реализация результатов исследования.

Результаты исследования внедрены и используются в учебном процессе Омского автобронетанкового инженерного института, на предприятиях: Мытищенский машиностроительный завод г. Мытищи, Уральский завод транспортного машиностроения г. Екатеринбург, 103 бронетанковый ремонтный завод г. Чита, акты испытаний и внедрений в приложении к диссертации.

Структура и объём работы. Диссертация содержит 194 страницы, включающих 46 рисунков, 22 таблицы и состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы, включающего 133 источника, в том числе 10 зарубежных и трех приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы исследования. Формулируются цель и основные задачи исследования, излагается научная новизна и практическая ценность, приводятся выносимые на защиту положения и краткое содержание работы.

В первой главе проводится анализ состояние вопроса исследования в области изменения технического состояния ТА в процессе эксплуатации, статистики отказов элементов топливной аппаратуры дизелей, а так же особенностей технического диагностирования ТА дизелей, проведен анализ существующей системы технического обслуживания и методов диагностирования ТА дизелей и определения ее остаточного ресурса.

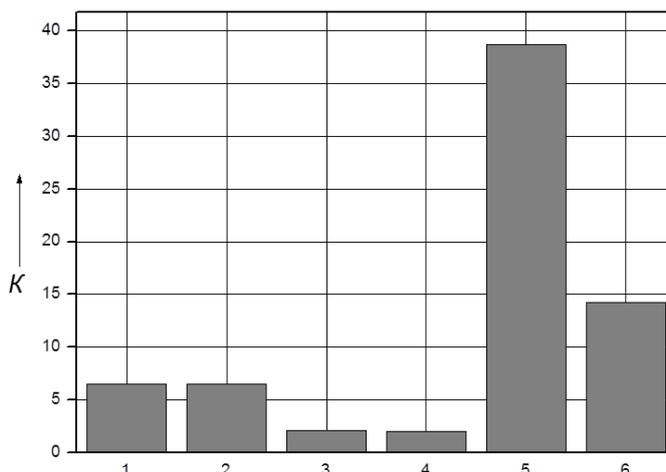
Известно, что состояние ТА оказывает значительное влияние на показатели работы дизеля, в частности на мощность и расход топлива. По данным различных источников, около 40% отказов у дизелей происходит вследствие недовлетворительной работы топливной аппаратуры (рис. 1).

В современных условиях остро назрела проблема повышения надежности двигателей внутреннего сгорания. Добиться этого можно, лишь поддерживая исправное состояние техники, выявляя зарождающиеся неисправности на начальной стадии. Конструктивной особенностью ТА дизелей является наличие прецизионных пар трения и механических упругих узлов. От изменений, возникающих в этих деталях при эксплуатации, зависят и изменения выходных параметров ТА. Исследованию проблемы повышения надежности ТА дизелей посвящены труды многих известных ученых, таких как: В.В. Антипов,

В.И. Бахтиаров, В.И. Бельских, В.Н. Бугаев, П.А. Власов, В.С. Ждановский, П.М. Кривенко, В.М. Михлин, А.В. Николаенко, Ю.Б. Свиридов, А.И. Селиванов, и многих других. В условиях насыщения парка автомобилями с дизелями наиболее актуальной проблемой является поддержание в исправном состоянии ТАВД.

К - доля отказов %; 1 - кривошипно-шатунный механизм, в том числе детали ЦПГ; 2 - механизм газораспределения; 3 - корпус дизеля; 4 - система смазки; 5 - система питания топливом; 6 - система охлаждения.

Рисунок 1. Статистическое распределение отказов дизеля



В результате работы над первой главой диссертационного исследования имеется возможность сделать следующие выводы:

- на долю отказов ТАВД приходится около 40% нарушений и поломок дизеля;
- средняя относительная частота отказов для деталей ТАВД составляет: для форсунок 10,5%, для ТНВД 9%, техническое состояние отдельных элементов ТАВД оказывает существенное влияние на работу дизеля в целом;
- существующие методы определения технического состояния элементов ТАВД как правило, требуют временной остановки автомобиля для частичной разборки узла или агрегата.

Наиболее полно отвечающим современным требованиям определения технического состояния упругих элементов ТА была признана методика исследований процесса топливоподачи по амплитудно-фазовым показателям сигнала высокого давления топлива, т.е. сравнительная оценка существующего сигнала давления топлива от угла поворота кулачкового вала ТНВД с эталонным (при полностью исправной и отрегулированной ТАВД).

Во второй главе рассматривалось теоретическое обоснование проводимых исследований. Были рассмотрены показатели эффективности и критерии оценки ТА дизелей в целом и её отдельных структурных компонентов. Задача теоретического и экспериментального исследований влияния технического состояния ТНВД и форсунки ставилась таким образом, чтобы при минимальной сложности расчетов и экспериментальных исследований получить объективную оценку технического состояния упругих элементов ТАВД дизелей по параметрам волновых явлений в линии высокого давления.

Проведено комплексное теоретическое исследование процессов топливоподачи при диагностировании состояния упругих элементов ТАВД на основе физической модели процессов, происходящих при топливоподаче, исследования механизма возникновения гидравлических ударов и гидродинамической модели процесса топливоподачи с учетом возникновения газовой фазы. Определены и обоснованы оценочные показатели эффективности работы ТА на основе ус-

вершенствованной математической модели топливоподачи для оценки технического состояния упругих элементов ТАВД.

Расчеты процессов топливоподачи и впрыскивания наиболее полно представлены в работах И.В. Астахова, Л.Н. Голубкова, Н.Х. Дьяченко, Н.А. Керимова, В.Н. Луканина, А.П. Перепелина, Б.Н. Файнлейба, Ю.А. Фомина и др.

С целью сокращения времени счета решаем обобщенную задачу (единый системный модуль, описывающий работу ТНВД и форсунки) в соответствии с реальным функционированием топливовпрыскивающей аппаратуры. Для этого рабочий процесс, как это обычно принято, у насоса разбиваем на 4 этапа (рис. 2). Первый этап характеризуется тем, что нагнетательный клапан закрыт и разобщает полость штуцера и топливного насоса. Топливо вытесняемое плунжером частично проходит через впускное окно, а частично сжимается в рабочей полости насоса (рис. 2а).

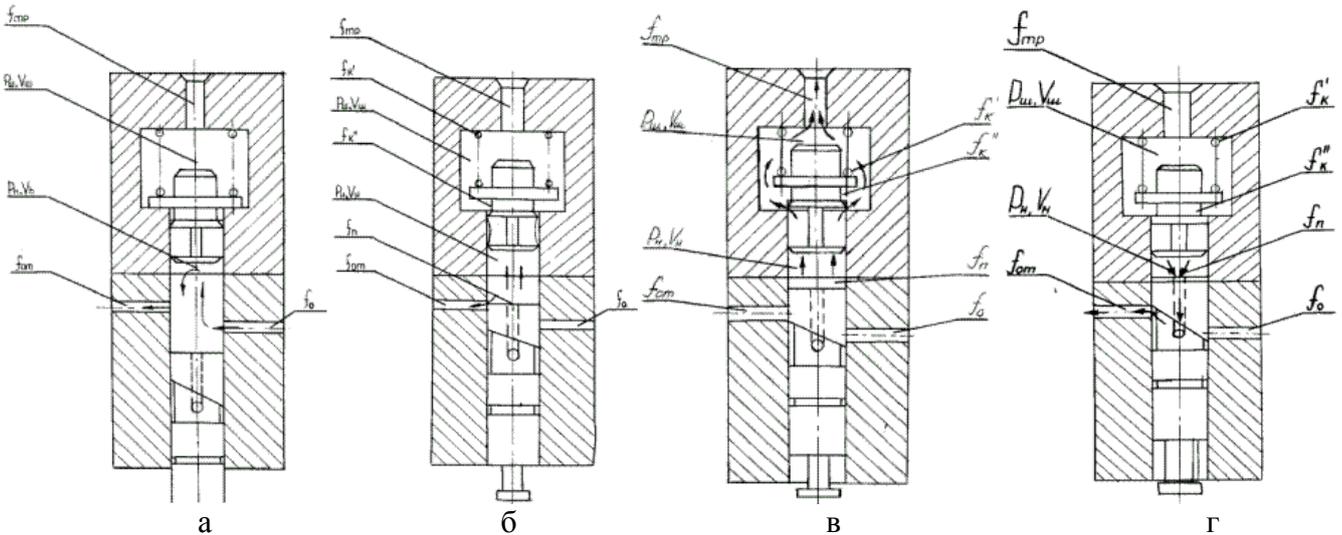


Рисунок 2 Схема этапов работы ТНВД

Второй этап (рис. 2б) соответствует движению плунжера при открытых впускных окнах. Этот этап описывается системой из трех уравнений: уравнение массового баланса для сосредоточенного объема насоса, уравнение массового баланса для сосредоточенного объема штуцера и уравнение движения нагнетательного клапана.

$$f_n \cdot \mathcal{Q}_n(t) = \beta \cdot V_m(h) \cdot \frac{dP_n}{dt} + \mu \cdot f_{ui}(x_k) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_n(t) - P_{ui}(t))} + f'_k(x_k) \cdot \frac{dx_k}{dt} + \mu \cdot f_o(h) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_n(t) - P_o)}$$

$$f'_k(x_k) \cdot \frac{dx_k}{dt} = -f_{mp} \cdot u_o(t) + \mu \cdot f_{ui}(x_k) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_n(t) - P_o)} - \beta \cdot V_{ui}(x_k) \cdot \frac{dP_{ui}}{dt} \quad (1)$$

$$m_{kn} \cdot \frac{d^2 x_k}{dt^2} = -k_{np}(\delta + x_k) - P_{ui}(t) \cdot f''_k(x_k) + P_{ui}(t) \cdot f'_k(x_k),$$

где $f_{ui}(x_k)$ – функциональная зависимость площади клапанной щели от положения клапана;

x_k – координата клапана по отношению к начальному положению;

$f'_k(x_k)$, $f''_k(x_k)$ – функциональные зависимости приведенной площади нагнетательного клапана со стороны насоса и штуцера соответственно;

$V_{ui}(x_k)$ – функциональная зависимость объема полости штуцера от

координаты НК; $m_{кл}$ – масса НК; k_{np} – коэффициент жесткости пружины;

δ – предварительное поджатие пружины НК;

$u_0(t)$ – функциональная зависимость скорости истечения топлива из полости штуцера;

f_{uz} – коэффициент расхода через щель при перемещении иглы.

Третий этап (рис. 2в) начинается при закрытии впускных окон и заканчивается при открытии отсечного окна. В соответствии с этим представлена система уравнений:

$$\begin{aligned} f_n \cdot U_n(t) &= \beta \cdot V_n(h) \cdot \frac{dP_n}{dt} + \mu \cdot f_{uz}(x_k) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_n(t) - P_{uz}(t))} + f'_k(x_k) \cdot \frac{dx_k}{dt} + \\ &+ \mu \cdot f_{om}(h) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_n(t) - P_{uz}(t))} \\ f''_k(x_k) \cdot \frac{dx_k}{dt} &= -f_{mp} \cdot u_0(t) + \mu \cdot f_{uz}(x_k) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_n(t) - P_{uz}(t))}; \\ m_{кл} \cdot \frac{d^2 x_k}{dt^2} &= -k_{np}(\delta + x_k) - P_{uz}(t) \cdot f''_k(x_k) + P_n(t) \cdot f'_k(x_k), \end{aligned} \quad (2)$$

где $f_{om}(h)$ – функциональная зависимость площади отсечных окон от положения плунжера;

Четвертый этап (рис. 2г) начинается соответственно при открытии отсечного окна и заканчивается при посадке нагнетательного клапана в седло. Расчет рабочего процесса у форсунки также как и в ТНВД разбивается на 4 этапа.

Для анализа состояния системы из математических моделей элементов собирается модель всей системы топливоподачи, однако, совокупность моделей всех входящих в систему элементов, не является еще математической моделью системы. Для формирования замкнутой системы уравнений к уравнениям элементов нужно добавить уравнения связей между параметрами входящими в неё элементов. Этими уравнениями связи являются различные геометрические (зависимость размера окон ТНВД от положения и угла поворота плунжера), гидравлические (зависимость коэффициента расхода от формы сечения) скорости истечения и т.д. факторов и кинематическими зависимостями. Например, моделирование привода ТНВД включало в себя расчет зависимости $h_n = f(t)$ (h_n – подъем плунжера), а также ее корректирование с учетом крутильных колебаний вала, которые являются неизбежным следствием упругости металла и вносят существенные погрешности в расчет.

На завершающем этапе была выполнена оптимизация алгоритма компоновки модели, проведены расчетные исследования и проанализированы результаты математического моделирования процесса топливоподачи с учетом технического состояния упругих элементов ТНВД и форсунки.

Баланс топлива при отсечке в общем виде можно представить уравнением:

$$\alpha V_n \frac{dp_n}{dt} = f_n C_n - \mu_0 f_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \sqrt{P_n - P_{sc}}} - \mu_{uz} f_{uz} \sqrt{\frac{2}{\rho} \sqrt{P_n - P_{sc}}} - f_k \frac{dh_k}{dt}, \quad (3)$$

где α – коэффициент сжимаемости топлива;

V_n – объем топлива в надплунжерном пространстве;

p_n – давление топлива в надплунжерном пространстве;

$f_n C_n$ - скорость объемного вытеснения топлива при движении плунжера;
 $\mu_0 f_0$ - эквивалентное проходное сечение отсечного тракта;
 $p_{вс}$ - давление во всасывающей полости насоса;
 $\mu_{ц} f_{ц}$ - эквивалентное проходное сечение нагнетательного клапана;
 f_k - площадь нагнетательного клапана по разгрузочному пояску;
 h_k - подъем нагнетательного клапана.

Основными уравнениями математической модели штатной топливной системы являются уравнения неустановившегося движения топлива в топливопроводе высокого давления, а также, уравнения граничных условий у насоса и форсунки. В качестве основы принята модель процесса топливоподачи, предложенная А.П. Перепелиным. По математическим моделям, с помощью специализированных программ, в том числе, программы MathCad, были получены зависимости изменения давления от угла поворота кулачкового валика ТНВД, некоторые из них представлены на рисунках 3 - 5.

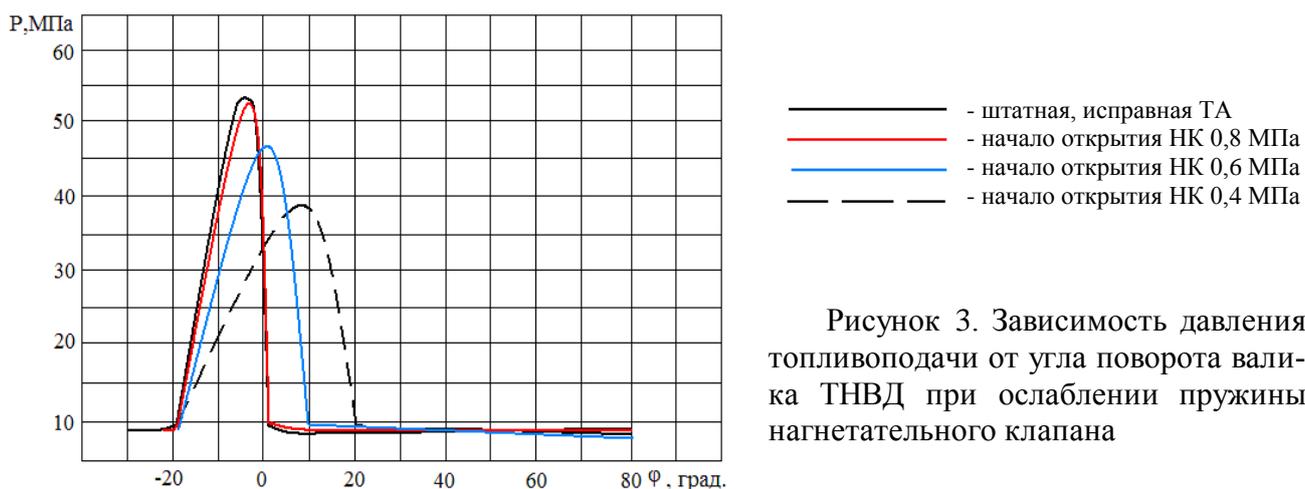


Рисунок 3. Зависимость давления топливоподачи от угла поворота валика ТНВД при ослаблении пружины нагнетательного клапана

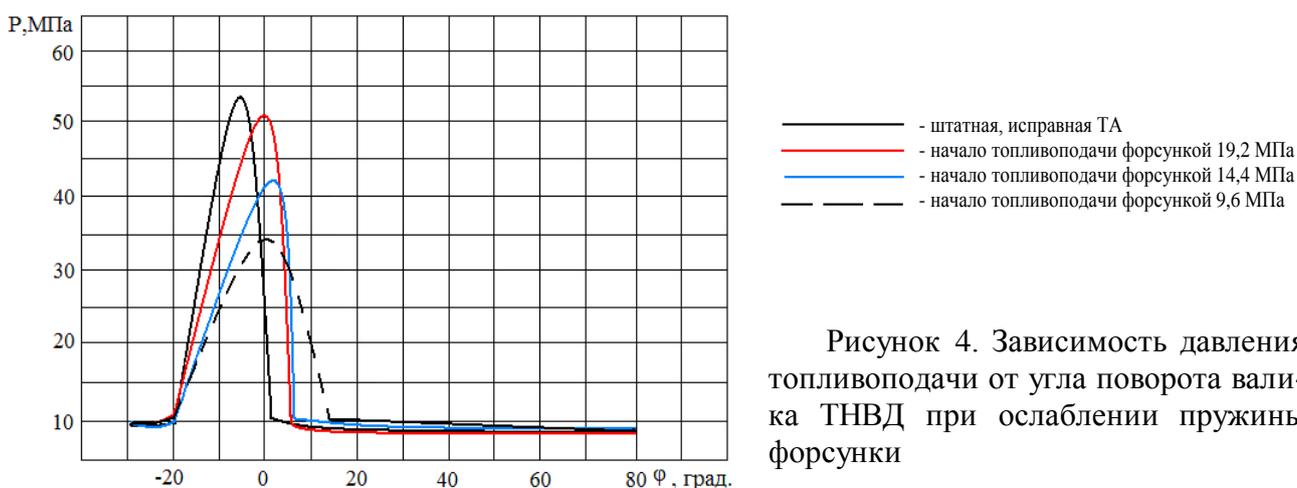


Рисунок 4. Зависимость давления топливоподачи от угла поворота валика ТНВД при ослаблении пружины форсунки

Анализируя представленные графические зависимости очевидно, что наблюдается высокая информативность данных. Так снижение упругих свойств пружины НК на 20% не приводит к заметному изменению характеристик топливоподачи. Снижение упругости пружины НК на 40% и 60% уже приводит к более заметному снижению давления впрыска и увеличению цикловой подачи топлива, что по характеру и величине изменения зависимостей позволит сделать вывод о степени и виде предполагаемой неисправности элемента ТАВД.

При этом снижение упругих свойств пружины форсунки сильнее снижает давление впрыска, чем пружины НК. Снижение упругости пружины форсунки на 40% и 60% уже приводит к ещё более заметному снижению давления впрыска и увеличению цикловой подачи топлива.

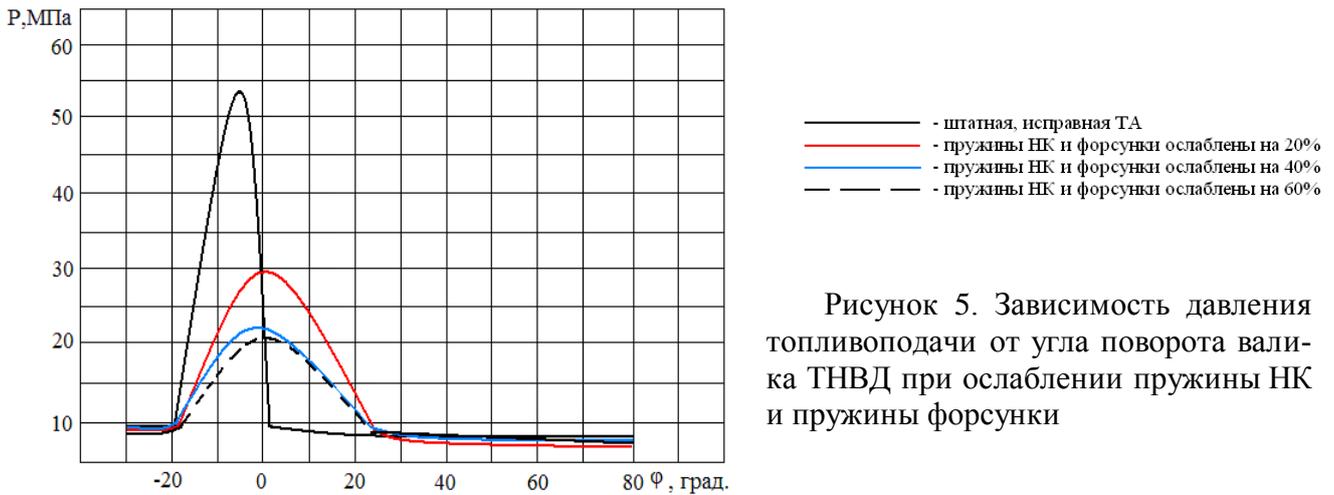


Рисунок 5. Зависимость давления топливоподачи от угла поворота валика ТНВД при ослаблении пружины НК и пружины форсунки

Основываясь на результатах расчетных исследований второй главы диссертационного исследования можно сделать следующие выводы:

- зависимость давления топливоподачи от угла п.к.в. обладает высокой информативностью и позволяет при их анализе определить вид и степень развития неисправности конкретного элемента ТАВД;

- снижение упругих свойств пружины НК на 20% не приводит к заметному изменению характеристик топливоподачи, снижение упругости пружины НК на 40% и 60% приводит к снижению давления впрыска на 14,8% и 27,8% соответственно и смещению максимального давления топливоподачи на 5 и 12 градусов п.к.в. в сторону ВМГ;

- снижение упругих свойств пружины форсунки влияет на давление топливоподачи в большей степени, чем снижение упругости пружины НК, так снижение упругих свойств пружины форсунки на 20% приводит к снижению давления впрыска на 7%, снижение на 40% и 60% приводит к снижению давления впрыска на 22,2% и 37% соответственно;

- комплексная неисправность приводит к тому, что при ослаблении пружин на 60% давление впрыска снижается более чем на 50%, таким образом, при совместном ослаблении пружин форсунки и НК на 20% возможен выход системы за границу работоспособности.

В третьей главе представлены цели, программа и общая методика проведения экспериментальных исследований. Целью экспериментального исследования является получение экспериментальных данных для проверки адекватности математической модели. Для решения поставленной задачи была разработан общий метод исследований процесса диагностирования топливной аппаратуры дизеля по амплитудно-фазовым показателям сигнала высокого давления топлива. Метод предусматривает проведение теоретических и лабораторных исследований.

В качестве объекта исследований использовалась топливная аппаратура четырехтактного дизеля КАМАЗ-740.

В соответствии с поставленной задачей программа предусматривает проведение экспериментальных исследований в 2 этапа.

На 1-м этапе проводились безмоторные испытания ТАВД, которые предусматривали выполнение следующих работ:

- определение объемной характеристики топливоподачи топливной аппаратурой высокого давления;
- осциллографирование давления топливоподачи по программе датчика высокого давления у штуцера ТНВД и форсунки;

На 2-м этапе проводились стендовые моторные испытания на полноразмерном дизеле КАМАЗ-740, во время которых определялись скоростные и нагрузочные характеристики дизеля при исправной ТАВД и при моделировании неисправности упругих элементов НК и форсунки.



Рисунок 6. Общий вид стенда для испытания ТА

Для проведения безмоторных исследований применялся стенд отечественного производства для испытания и регулирования ТА дизелей (рис.6) со смонтированным на нем ТНВД, комплектом трубопроводов высокого давления и эталонных форсунок. Стенд оборудован штатными приборами и приспособлениями. Привод ТНВД осуществлялся трехфазным асинхронным двигателем мощностью 7,5 кВт, номинальным числом оборотов 1450 мин⁻¹.

Исследования проводились для получения значений давления топливоподачи штатной ТА и при моделировании неисправностей. Предварительно ТНВД был отрегулирован и испытан согласно ТУ, а форсунки отрегулированы на давление начала впрыска 24 МПа. Диагностический комплекс регистрации процессов топливоподачи и характеристики работы дизеля был смонтирован на основе ПК, в которой установлен модуль АЦП. Модули объединены между собой системой проводников и шин, образующих каналы связи и обмена информацией.

Испытания топливной аппаратуры проводились на дизеле КАМАЗ-740 согласно ГОСТ 14846-81. Установка состоит из двигателя КАМАЗ-740 (без сцепления и коробки передач), тормозного устройства и измерительной аппаратуры (рис. 7). В качестве тормозного устройства применялся динамометр постоянного тока типа DS 1036-4/n с одним свободным концом вала.

При проведении экспериментальных исследований минимальное количество замеров N_{min} определяется с заданной доверительной вероятностью α по формуле:

$$N_{min} = K_{\alpha} \frac{t^2}{\alpha^2}, \quad (4)$$

где N_{\min} - минимальное количество параллельных опытов;

K_e - коэффициент вариации;

t - критерий Стьюдента (при $n=3$, $\alpha=0.05$, $t=3$).

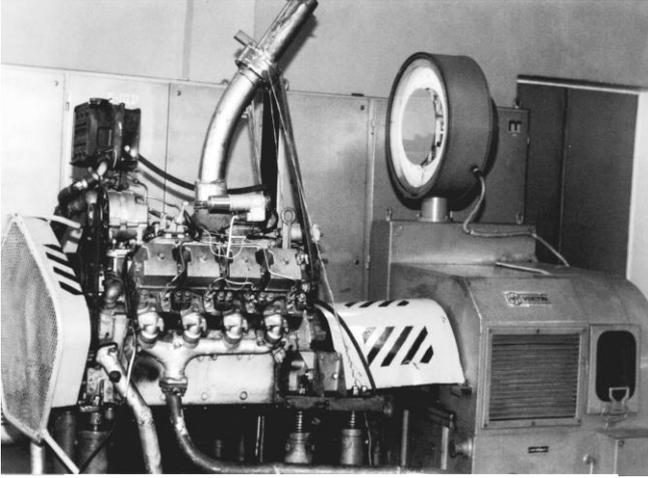


Рисунок 7. Общий вид стенда для испытания дизеля КАМАЗ-740

Коэффициент вариации определяется по результатам предварительных опытов:

$$K_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\bar{a}_i}, \quad (5)$$

где δ_i - относительная погрешность i -того измеряемого параметра в предварительной серии опытов;

\bar{a}_i - среднее значение i -того измеряемого параметра в предварительной серии опытов.

При заданных значениях $\alpha=0,05$ имеем $K_e=4,1$ и $N_{\min}=3$.

Характеристики давления топливоподачи снимались при фиксированных положениях рычага управления подачей топлива, составляющих 50% ($n_b=850$ мин⁻¹, $N_e=0,5$, $M_e=\max$) и 100% ($n_b=1300$ мин⁻¹, $N_e=1$) от положения полной подачи. Замеры осуществлялись после стабилизации режима работы аппаратуры.

Целью проведения испытаний являлось получение значений давления у штуцеров ТНВД и форсунки в зависимости от угла поворота кулачкового валика насоса, а также определение цикловой подачи топлива. Перед началом испытаний (после прогрева аппаратуры в течение часа) и после окончания работы проверялась работоспособность измерительной и регистрирующей аппаратуры путем регистрации нулевых и контрольных отметок.

Применяемый датчик давления был тарирован в соответствии с прилагаемой к нему инструкцией по эксплуатации, после чего производился контрольный замер величины регистрируемого давления с использованием эталонного манометра. Для соблюдения корректности эксперимента весь цикл испытаний был проведен в течение одного дня в одинаковых условиях влажности, температуры окружающего воздуха и атмосферного давления. Среднее значение давлений у штуцера ТНВД и форсунки выбиралось по результатам трех замеров.

После определения характеристик давления впрыска исправной ТАВД, поочередно имитировались неисправности ТНВД, в частности – снижение жесткости пружины НК. Характеристика давления топливоподачи исправной ТА ($n_b=850$ мин⁻¹, $\%N_e=0,5$), а также после имитации неисправности представлена на рис. 8.

После испытаний топливного насоса определялась зависимость давления топливоподачи возле штуцера форсунки. Также сначала снимались данные при исправной форсунке, затем имитировалась неисправность пружины форсунки. Зависимость давления топливоподачи исправной ТА, а также после имитации неисправности ($n_b=850$ мин⁻¹, $\%N_e=0,5$) представлена на рисунке 9.

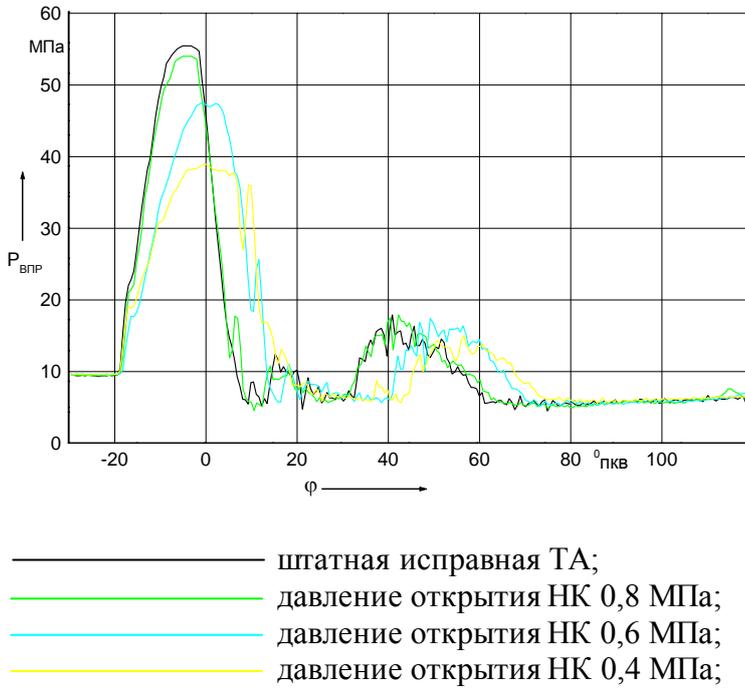


Рисунок 8. Зависимость давления топливоподачи от угла поворота валика ТНВД у штуцера НК

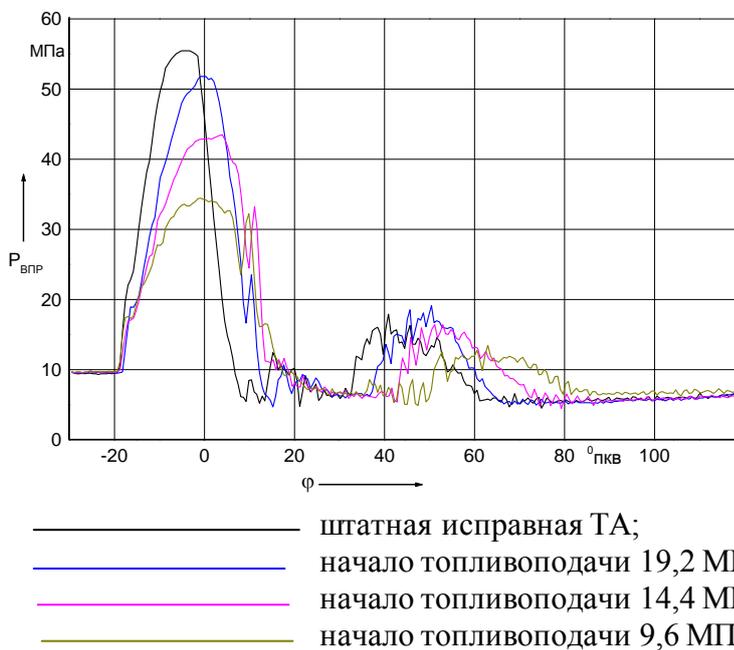


Рисунок 9. Зависимость давления топливоподачи от угла поворота валика ТНВД у штуцера форсунки

Далее имитировалась комплексная неисправность НК и форсунки. Определялась зависимость давления топливоподачи при ослаблении пружин и НК и форсунки. Зависимость давления топливоподачи исправной ТА, а также после имитации комплексной неисправности ($n_B=850 \text{ мин}^{-1}$, $\%N_e=0,5$) представлена на рисунке 10.

Параметры процесса снимались последовательно для штатной и экспериментальной комплектации ТАВД. Замер регистрируемых параметров осуществлялся после установления стабильного режима работы аппаратуры. Полученные результаты заносились в память ПК и сохранялись в виде файлов для последующей обработки.

Проведя анализ полученных данных, можно заключить, что ослабление пружины НК и форсунки оказывает существенное влияние на работу ТА. Характер изменения давления топливоподачи - ухудшение характеристик. Давление в топливопроводе высокого давления падает, а продолжительность цикловой подачи увеличивается (рис. 8). Ослабление

пружины форсунки ухудшает параметры впрыска гораздо сильнее, чем ослабление пружины НК. При имитации комплексной неисправности (рис. 10) на зависимости видно, что полностью нарушается правильная работа топливной секции. Недопустимо (до 45%) снижается давление впрыска, а цикловая подача растягивается по времени в 2 - 3,5 раза. По мере накопления статистической информации о характере отклонений волн давления от показателей исправной ТА, формируется "средняя" волна, по характеру протекания которой

имеется возможность более достоверно оценить вид и степень той или иной неисправности.

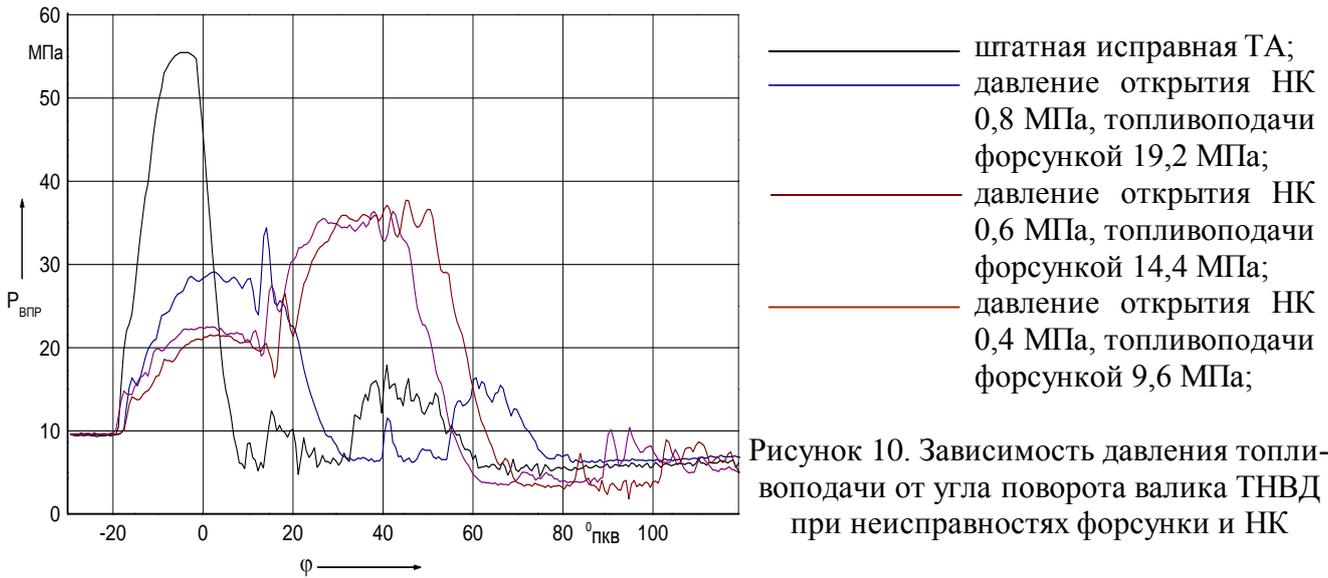


Рисунок 10. Зависимость давления топливopодачи от угла поворота валика ТНВД при неисправностях форсунки и НК

После проведения стендовых испытаний ТАВД была проведена серия моторных экспериментов с целью выявления влияния имитируемых неисправностей на выходные параметры дизеля. Сначала снимались параметры исправной ТАВД, затем – после моделирования неисправностей.

Оценка погрешности результатов измерений является одним из важных этапов подтверждения достоверности проведенных исследований и должна проводиться в соответствии с принятыми математическими методами обработки результатов наблюдений: ГОСТ 8.0207-76, ГОСТ 8.009-72. Испытания, проведенные на стенде испытания ТА и на моторном стенде, носили сравнительный характер. Систематические погрешности сводятся к минимуму следующими мероприятиями: рациональным выбором типа и конструкции измерительной аппаратуры и ее предварительной тарировкой; непрерывным контролем работы, настройки и стабильности показаний приборов измерительного комплекса; снятием показаний приборов на установившихся режимах работы двигателя.

Случайные ошибки устраняются применением автоматических и полуавтоматических измерительных схем, многократным проведением измерений при одинаковых условиях, а также тщательной обработкой полученных данных.

Таким образом по результатам исследований в третьем разделе работы можно сделать следующие выводы:

- разработанная программа и используемая методика экспериментальных исследований позволили выполнить задачу по оценке влияния моделируемых неисправностей (в частности потери жесткости упругих элементов) ТАВД на параметры топливopодачи и работу дизеля в целом;

- анализ результатов оценки погрешностей измерений показывает, что оборудование, выбранное для проведения экспериментальных исследований, отвечает предъявляемым требованиям;

- ослабление пружины НК и форсунки оказывает существенное влияние на работу ТА, так подтверждено, что ослабление пружины форсунки в большей степени (до 6-8 % на некоторых режимах) влияет на ухудшение параметров

процесса топливоподачи по сравнению с ослаблением пружины НК, при совместном влиянии ослабления пружин форсунки и НК топливная аппаратура выходила за границу работоспособности при ослаблении пружин свыше 20%;

- при имитации комплексной неисправности полностью нарушается правильная работа топливной секции, недопустимо (до 45%) снижается давление впрыска, а цикловая подача растягивается по времени в 2 - 3,5 раза;

- по результатам испытаний ТАВД проведена проверка адекватности расчетных данных результатам экспериментальных исследований, показавшая их удовлетворительную сходимость на принятом уровне доверительной вероятности $P = 0,95$, следовательно используемая математическая модель адекватно описывает процессы топливоподачи на исследованных режимах;

В четвертой главе представлен анализ полученных результатов исследования, техническая и экономическая оценка предлагаемой методики диагностирования ТАВД, а также рекомендации по использованию предлагаемой методики.

Анализируя полученные в ходе проведения безмоторного эксперимента данные, можно с уверенностью утверждать, что ослабление пружины НК, возможное в процессе эксплуатации, может привести не только к снижению давления впрыска, но и к существенному увеличению времени цикловой подачи. Это, в свою очередь, приведет к увеличению расхода топлива и недопустимому повышению выброса в атмосферу вредных веществ. Аналогичные изменения в процессе топливоподачи возникают при снижении жесткости или поломке пружины форсунки. При этом из анализа полученных графических зависимостей очевидно, что неисправность форсунки оказывает более существенное влияние на процесс топливоподачи, чем неисправность НК.

Изменение процесса топливоподачи вызовет недопустимые изменения регламентированных выходных параметров, а именно существенное (до 50%) снижение давления впрыска и увеличение продолжительности цикловой подачи (более чем в 2 раза). Следовательно, существует необходимость в технологическом воздействии при техническом обслуживании и последующем ремонте ТАВД. Анализируя все полученные зависимости, можно отметить то, что моделирование совместного ослабления пружин НК и форсунок приводит к полному нарушению процесса топливоподачи, а выход регламентированных параметров за установленные пределы наступает уже при ослаблении пружин нагнетательного клапана и форсунки на 20%.

Результаты моторного эксперимента подтверждают данные стендовых испытаний. На всех испытательных режимах работы двигателя было отмечено ухудшение выходных показателей дизеля. Проанализировав зависимости давления топливоподачи при неисправном НК, заметно, что снижение жесткости пружины на 20% лишь незначительно снижает давление впрыска и практически не влияет на цикловую подачу. Результаты моторного эксперимента это подтвердили. Характер протекания кривых на графиках скоростной и нагрузочной характеристик существенно не изменился (отклонения укладываются в погрешность измерений). Дальнейшее снижение жесткости пружины (на 40%)

привело к снижению давления впрыска на 10,4% и увеличению цикловой подачи на 6,6%. Моторные параметры при моделировании этой неисправности ухудшились в среднем на 6,2% по сравнению с исправной ТАВД.

Таким образом, учитывая рекомендации различных литературных источников, утверждающих, что эксплуатация дизеля при снижении мощностных показателей более чем на 10% нецелесообразна, по ряду экономических и экологических причин можно сделать вывод, что при ослаблении пружины даже одной форсунки более чем на 20% эксплуатацию ТАВД необходимо прекратить и выполнить мероприятия технического обслуживания. После завершения моторного эксперимента с моделированием неисправностей форсунки ТАВД была возвращена в исправное состояние и проверена. Затем по вышеописанной методике моторные показатели снимались при моделировании совместной неисправности нагнетательного клапана и форсунки. Вначале пружины НК и форсунки были ослаблены на 20%. Анализируя характеристику давления топливоподачи, делаем вывод, что давление впрыска снизилось на 46%, т.е. практически в 2 раза, а цикловая подача увеличилась на 67%. При проведении моторного эксперимента с моделированием данной неисправности моторные показатели ухудшились на 19,8% по сравнению с исправной ТАВД. По сути, в «неисправном» цилиндре удовлетворительное смесеобразование и сгорание отсутствовало, он периодически выключался из рабочего цикла двигателя и лишь создавал потери на трение и сжатие воздуха.

Анализируя полученные моторные характеристики, можно сделать вывод о том, что если ослабление пружин НК и форсунки на 20% выводит дизель за рамки целесообразного использования по назначению, то проводить испытания с плановым ухудшением состояния ТАВД нет смысла, т.к. очевидны дальнейшие ухудшения моторных показателей. Также очевидно, что вышеописанных результатов достаточно для того, чтобы в реальной эксплуатации своевременно выявлять снижение характеристик давления топливоподачи и не допускать выхода моторных показателей за регламентированные пределы. Кроме этого, в перспективе, основываясь на статистических данных, можно будет прогнозировать момент наступления отказа того или иного элемента ТАВД. В целях недопущения снижения моторных показателей ниже регламентируемого уровня рекомендуется в процессе проведения технического диагностирования выявлять снижение давления в этих деталях и принимать решение о целесообразности дальнейшей эксплуатации или проведении необходимого технического обслуживания. Основываясь на показаниях зависимостей, полученных в ходе проведения экспериментов, были разработаны практические рекомендации по внедрению методики диагностирования упругих элементов ТАВД дизелей. Кроме того, определены технические условия на проведение диагностирования.

Сравнение результатов диагностирования ТАВД разработанной методикой непосредственно на автомобиле с результатом контроля этой же аппаратуры на безмоторном стенде СТМ-1М показало идентичность результатов. Достоверность диагностирования по 20 автомобилям составила 0,9. Основной причиной, снижающей достоверность процесса диагностирования, является отклонение

объемов топливопроводов высокого давления из-за разности их длины. Для повышения точности диагностирования в процессе ТО двигателя необходимо включить мероприятия по оценке влияния объемов топливопроводов. Анализ нестабильности показателей системы, проверенный сравнением сигналов используемых датчиков, снятых в начале эксплуатации и через полгода работы с эталонной секцией на безмоторном стенде, показал, что погрешность находится в пределах допустимой точности данного диагностического комплекса. Общая надежность системы, как показал опыт её эксплуатации в течение года, ограничена лишь надежностью датчика высокого давления. На основании полученного опыта, а также учитывая, что датчик рассчитан на давление, многократно превышающее давление в ТАВД, была принята периодичность проверки системы автоматизированного контроля через 1000 часов работы.

Продолжительность диагностирования одного автомобиля занимает в среднем 0,5 часа и совмещается по времени и месту проведения с очередным обслуживанием.

Экономическая эффективность разработки была проведена в соответствии с принятыми рекомендациями и требованиями. Расчет годового экономического эффекта проведен по экономии приведенных затрат в сфере эксплуатации и обслуживания базовых и предлагаемых средств диагностирования.

Таблица 1 - Результаты расчета экономического эффекта от внедрения предлагаемого метода диагностирования ТАВД дизеля КАМАЗ-740

Составляющие расчета и их обозначение	До внедрения	После внедрения
Коэффициент учета изменения производительности диагностирования B_2/B_1	1	1,15
Приведенные затраты в сфере производства Z_1 , тыс. руб.	79	75
Годовые издержки на содержание 1-го объекта диагностирования I_T , тыс. руб.	27,6	25,7
проведенных текущих ремонтов $Z_{тр}$	3,4	2,8
расход ГСМ $Z_{топ}$	26,8	25,0
проведение ТО $Z_{то}$	5,6	5,0
проведение диагностирования Z_d	2,46	1,4
потери от простоя при $D C_{пл}$	7,3	4,3
потери от простоев из-за отказов C_0	9,0	7,3
Годовые издержки на содержание средства диагностирования, тыс. руб.	1,4	0,65
Экономический эффект на единицу СД, за год использования, тыс. руб.		24,0
на один автомобиль, тыс. руб.		1,2
Срок окупаемости, лет		0,9

Приведенные расчеты показывают, что разработанная методика диагностирования ТАВД и рекомендации по её применению обладают достаточно высокой экономической эффективностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Улучшение показателей работы дизеля в условиях эксплуатации повышением стабильности работы ТА основывалось на выполненных анализах научной и специальной литературы, возможных отказов элементов ТА дизелей, преимуществ и недостатков существующих методов контроля состояния упругих элементов ТАВД, и используемой при этом аппаратуры, а также проведенных при этом теоретических и экспериментальных исследований.

Полученные в ходе данного исследования результаты позволили решить следующие выводы:

1. На основании анализа закономерностей изменения технического состояния ТАВД дизеля установлено, что средняя относительная частота отказов для деталей ТАВД составляет: для форсунок 10,5%, для ТНВД 9%. Сформированная математическую модель топливоподачи, учитывающая жесткость упругих элементов ТАВД, позволила установить, что неисправность возникающая в ТАВД оказывает существенное влияние на изменения параметров процесса топливоподачи, зафиксировав и идентифицировав которые имеется возможность определения вида и степени развития неисправности.

2. Выполненный анализ эффективности известных методик определения технического состояния элементов ТА дизелей позволил установить, что наиболее полно отвечает современным требованиям контроля состояния ТАВД методика исследований процесса топливоподачи по амплитудно-фазовым показателям сигнала высокого давления топлива, при этом определено, что волновой сигнал в линии высокого давления обладает достаточно высокой информативностью.

3. Разработана методика контроля состояния упругих элементов ТАВД дизеля, проведенные при этом расчеты показывают, что данная методика обладает достаточно высокой экономической эффективностью позволит окупить затраты на её внедрение менее чем за один год.

4. Выполненный комплекс экспериментальных исследований влияния потери жесткости упругих элементов ТАВД на параметры топливоподачи и дизеля в целом позволил подтвердить адекватность усовершенствованной математической модели топливоподачи и установить что:

- снижение упругих свойств пружины НК на 20% не приводит к заметному изменению характеристик топливоподачи, снижение упругости пружины НК на 40% приводит к снижению давления впрыска на 14,8%, смещению максимального давления топливоподачи на 5° п.к.в. в сторону ВМТ, увеличению цикловой подачи на 6,6%, моторные параметры при данной неисправности ухудшились в среднем на 6,2%. Снижение упругости пружины НК на 60% приводит к снижению давления впрыска на 27,8%, смещению максимального давления топливоподачи на 12° п.к.в. в сторону ВМТ, увеличению времени цикловой подачи на 7,2%, при этом ухудшения моторных показателей составили 7,8%;

- при ослаблении пружины форсунки на 20% снижает моторные показатели так же, как 40% ослабления пружины НК, при ослаблении пружины форсунки на 40% безмоторный эксперимент показал снижение давления впрыска на 21,2% и увеличение цикловой подачи на 8,7%, при этом моторные показатели ухудшились на 12,4%, при ослаблении пружины форсунки на 60% давление впрыска упало на 38%, а продолжительность цикловой подачи увеличилась на 29%, ухудшение моторных показателей составило 15,7% по сравнению с исправной ТАВД;

- при комплексной неисправности полностью нарушается правильная работа топливной секции, до 45% снижается давление впрыска, а цикловая подача растягивается по времени в 2 - 3,5 раза, при ослаблении пружин НК и форсунки на 20% давление впрыска снизилось на 46%, а цикловая подача увеличилась на

67%, моторные показатели ухудшились на 19,8% по сравнению с исправной ТАВД. Следовательно, ослабление пружин НК и форсунки на 20% выводит дизель за рамки целесообразного использования по назначению.

5. Разработаны практические рекомендации по контролю качества упругих элементов ТА дизелей в процессе их эксплуатации. Установлено, что реализация разработанной методики контроля состояния упругих элементов ТАВД дизеля в условиях эксплуатации при проведении технического обслуживания возможна на авторемонтном предприятии без внесения существенных изменений в технологический процесс.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что все задачи, поставленные в данном исследовании, решены, цель работы, заключающаяся в улучшении мощностных и экономических параметров работы дизеля за счет повышения стабильности параметров упругих элементов топливной аппаратуры высокого давления, достигнута.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования заключаются в расширении перечня диагностируемых неисправностей ТАВД и в создании промышленного автоматизированного диагностического комплекса на основе использования разработанной методики оценки технического состояния ТАВД в процессе эксплуатации.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

(По теме диссертации опубликовано 3 научных статьи, все в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ)

1. - Лепешкин, Д.И. Проблемы разработки автоматизированной системы диагностирования топливоподающей аппаратуры [Текст] / Д.И. Лепешкин, А.Л. Иванов. Вестник СибАДИ. Выпуск 4(32) Омск 2013. С. 7 - 17.

2. - Лепешкин, Д.И. Экспериментальные исследования по осцилографированию процессов в топливной аппаратуре дизеля. [Текст]/ Д.И. Лепешкин, А.Л. Иванов. / Омский научный вестник – вып. 3 (123), Омск. 2013. – С. 150 - 153.

3. - Лепешкин, Д.И. Критерии топливной аппаратуры дизелей [Текст] / Д.И. Лепешкин Вестник СибАДИ. Выпуск 6 Омск 2014. С. 45 - 49.

4. Получено решение о выдаче патента на изобретение (Аккумулирующая система подачи топлива в дизель), по заявке №2013147206/06(073351) от 22.10.2013 года. Авторы: Лепешкин Д.И., Саенко М.М., Жигadlo А.П., Иванов А.Л.