Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

(СПбГМТУ)

Допущен к защите
Заведующий кафедрой

_____ (Столяров С. П.)
(подпись) (Ф.И.О.)

« » 2022 г.

_____ _____

Факультет Корабельной энергетики и автоматики

Кафедра Судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок

Направление подготовки 26.03.02 Кораблестроение, океанотехника и системотехника
(код, наименование)

объектов морской инфраструктуры

Направленность ООП (профиль) _____
(код, наименование)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

На тему Совершенствование методики анализа индикаторной диаграммы судового дизеля

ОБУЧАЮЩИЙСЯ _____ (_____)
(подпись) (Ф.И.О.)

РУКОВОДИТЕЛЬ _____ (_____)
(подпись) (Ф.И.О.)

Санкт-Петербург
2022

Санкт-Петербург
2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

(СПбГМТУ)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ (_____._____)
(подпись) (Ф.И.О.)

« » 2022 г.

_____ _____

Факультет Корабельной энергетики и автоматики

Кафедра Судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок

Направление подготовки 26.03.02 Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры
(код, наименование)

Направленность ООП (профиль) _____
(код, наименование)

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу

Обучающийся _____

Тема работы: Совершенствование методики анализа индикаторной диаграммы судового дизеля

Исходные данные: _____

Содержание расчетно-пояснительной записки: _____

Перечень графического материала (точное указание обязательных чертежей): _____

Задание по разделу «Технологическая часть проекта»: _____

Консультант _____

Задание по разделу «Технико-экономическое обоснование проекта»: _____

Консультант _____

Задание Задание по разделу «Охрана труда»: _____

Консультант _____

Консультанты по другим разделам проекта: _____

Дата выдачи

«___» _____ 20___ г.

Дата представления работы на кафедру

«___» _____ 20___ г.

Принял задание к исполнению

_____
(подпись обучающегося)

Руководитель

_____
(подпись)

РЕФЕРАТ

Отчет содержит: 71 страницу машинописного текста, 25 рисунков, 3 таблицы; 45 источников.

ИНДИКАТОРНАЯ ДИАГРАММА, ВЕРХНЯЯ МЁРТВАЯ ТОЧКА, ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ДИЗЕЛЯ, ПРОЦЕСС СЖАТИЯ, ПРОЦЕСС РАСШИРЕНИЯ, ПОКАЗАТЕЛЬ ПОЛИТРОПЫ.

Цель работы – разработка рекомендации к совершенствованию методики диагностирования судового дизеля на основе анализа индикаторных диаграмм.

В процессе работы изучены известные способы и средства регистрации индикаторной диаграммы дизеля, проведена их сравнительная оценка, выявлены параметры и характеристики, используемые для диагностирования технического состояния дизеля.

В результате исследования выявлено влияние погрешности в определении положения верхней мертвой точки (ВМТ) на качество диагностирования дизеля и разработаны рекомендации к совершенствованию методики диагностирования судового дизеля на основе анализа индикаторных диаграмм.

СОДЕРЖАНИ

Е

Введение.....5
Список условных обозначений и сокращений.....7
1. Известные способы и средства регистрации индикаторной диаграммы дизеля и их анализа.....9
1.1. Механические пружинно-поршневые индикаторы.....9
1.2. Пневмоэлектрические стробоскопические индикаторы.....12
1.3. Электронные индикаторы.....15
1.4. Методы косвенной регистрации индикаторной диаграммы.....22
1.5. Выводы по разделу.....24
2. Параметры и характеристики индикаторной диаграммы, используемые для диагностирования дизеля.....27
2.1. Возможные диагностические и структурные параметры индикаторной диаграммы.....27
2.2. Частная задача диагностирования с использованием индикаторных диаграмм.....29
2.3. Выводы по разделу.....31
3. Влияние погрешности определения положения вмт на индикаторной диаграмме на качество диагностирования дизеля.....32
3.1. Алгоритмом самодиагностики системы.....32
3.2. Результат выполненного исследования влияния основных факторов на качество анализа тепловыделения в дизеле по индикаторным диаграммам41
3.3. Выводы по разделу.....43
4. Усовершенствованный способ определения вмт на индикаторной диаграмме.....44
4.1. Обоснование выбора измерительного преобразователя.....46
4.2. Операции при определения вмт на индикаторной диаграмме с использованием вихретокового преобразователя.....49
4.3. Выводы по разделу.....51

5. Методика анализа индикаторной диаграммы судового дизеля по показателю политропы сжатия.....53
5.1. Методика расчета показателя политропы сжатия в дизельном двигателе по индикаторной диаграмме.....54
5.2. Методика расчёта текущего объёма цилиндра дизеля.....56
5.3. Результаты выполненного исследования показателя политропы сжатия по индикаторной диаграмме.....56
5.4. Выводы по разделу.....63
Заключение.....65
Список использованных источников.....66

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика дизельного двигателя важна при прогнозировании неисправностей, поломок и продлении эффективного срока службы ДВС. В условиях эксплуатации, как правило, оцениваются только теплотехнические параметры, которые не позволяют оценить техническое состояние двигателя в полном объеме. Важное значение при анализе работы двигателя имеют показатели индикаторной диаграммы (ИД) – кривая, которой показывает изменение давления газов в цилиндре в зависимости от хода поршня или объема цилиндра двигателя. Площадь диаграммы соответствует работе в цилиндре дизеля за один оборот коленчатого вала. Точность в определении ИД зависит от погрешности первичного преобразователя давления,-отметчика верхней мертвой точки (ВМТ) и степени дросселирования газа в индикаторном канале, а также ряда других возможных причин.

Многие современные ученные в своих трудах [8] – [12] предлагают методы использования индикаторных диаграмм для определения технического состояния дизельных двигателей. Однако при использовании большинства известных диагностических комплексов отсутствует возможность локализации неисправностей и, тем более — прогнозирования их развития. Поэтому более плодотворным может оказаться использование индикаторных диаграмм в решении задач диагностирования частного характера [1].

Общеизвестно, что индикаторные показатели рабочего процесса существенно зависят от герметичности_полости_цилиндра двигателя. В свою очередь, герметичность зависит как от работоспособности поршневых колец, так и от качества запорных поверхностей клапанов механизма газораспределения. Вовремя распознать указанные неисправности в период подготовки к межрейсовому текущему ремонту дизеля является актуальной проблемой эксплуатации.

Учитывая изложенное, сформулируем цель работы следующим образом.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка и проверка методики диагностирования герметичности цилиндра среднеоборотного дизельного двигателя на основе применения усовершенствованных средств регистрации и анализа экспериментальных индикаторных диаграмм.

Достижение цели работы планируется путем решения следующих задач исследования:

1) Анализа существующих средств регистрации индикаторной диаграммы и выбора наиболее подходящего средства регистрации ИД;

2) Изучения влияния диагностических параметров на изменение ИД;

3) Изучение влияния погрешности определения ВМТ на показатели ИД;

4) Разработка способа, снижения погрешности в определении ВМТ на ИД;

5) Совершенствование методики анализа индикаторной диаграммы судового дизеля.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

Список условных обозначений и сокращений

Обозначение	Наименование величины	Размерность
ВМТ	Верхняя мертвая точка	–
НМТ	Нижняя мертвая точка	–
Д	Дизель	–
ИД	Индикаторная диаграмма	–
ЭФИ	Электронный формирователь импульса	–
ЭВМ	Электронно-вычислительная машина	–
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь	–
ОЗУ	Оперативное запоминающее устройство	–
ТА	Топливная аппаратура	–
ПКВ	Поворот коленчатого вала	–
ТНВД	Топливный насос высокого давления	–
ИВК	Измерительно-вычислительные комплексы	–
ДДГ	Датчик давления газа	–
ДУП	Датчик угла поворота коленчатого вала	–
ДДТ	Датчик давления топлива	–
ДДН	Датчик давления наддува	–
°п.к.в.	Градус поворота коленчатого вала	*градус*
$(dx/d\varphi)_{max}$	Максимальная скорость относительного тепловыделения	*МПа/°п.к.в.*
$(dp/d\varphi)_{max}$	«Жёсткость» процесса сгорания	*МПа/°п.к.в.*
k	Показатель адиабаты	–
p_c	Давление рабочего тела в конце процесса сжатия	*МПа*
p_z	Максимальное давление рабочего цикла	*МПа*
p_k	Давление наддува	*МПа*
$p(\varphi)$	Изменение давления в цилиндре	*МПа*
$\varphi_{сам}$	Угол самовоспламенения (угол между точкой самовоспламенения горючей смеси и ВМТ поршня на диаграмме)	*°п.к.в.*
$\varphi_{сгор}$	Продолжительность сгорания,	*°п.к.в.*
$\varphi_ф$	Продолжительность подачи топлива форсункой	*°п.к.в.*
$\varphi_{сам} - \varphi_{нпн}$	Продолжительность периода между самовоспламенением и так называемым геометрическим началом топливоподачи топливным насосом высокого давления	*°п.к.в.*

T_k	Температура наддувочного воздуха	*K*
$\Delta m_{p.m}$	Суммарная масса утечек рабочего тела из полости цилиндра через зазоры в цилиндропоршневой группе и клапанах механизма газораспределения	*кг*
n	Средний показателя политропы сжатия	–
dFi	Угол поворота коленчатого вала	–
$g_{ц}$	Цикловая подача топлива	*кг/цикл (или г/цикл)*

1. ИЗВЕСТНЫЕ СПОСОБЫ И СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ ДИЗЕЛЯ И ИХ АНАЛИЗА

После создания и выпуска дизельных двигателей появились и устройства (индикаторы) для экспериментального определения и регистрации зависимости давления цилиндра двигателя от движения поршня, графическое изображение которой называют индикаторной диаграммой (ИД).

Первые индикаторные диаграммы были использованы Джеймсом Уаттом и его работником Джоном Саузерном для повышения эффективности паровых двигателей. [39] В 1796 году Д. Саузерн применил простой, но несовершенный, метод получения диаграмм. Он прикрепил планку таким образом, чтобы она двигалась синхронно с поршнем, тем самым отслеживая перемещение поршня относительно неподвижной оси, в то время как карандаш, связанный с измерителем давления, двигался в перпендикулярном поршню направлении, отмечая таким образом изменение давления. Диаграмма позволила Уатту рассчитать выполненную паром работу, с учётом того, что давление падает до нуля к концу хода, тем самым гарантируя, что вся полезная энергия была учтена. Уатт использовал эту диаграмму для решения задачи увеличения мощности паровой машины и долгое время держал ее в секрете.

1.1. Механические пружинно-поршневые индикаторы

В настоящее время существует множество конструкций механических индикаторов. Основное различие которых заключается в устройстве привода барабана индикатора. Он может быть приведен в движение от коленчатого вала, от поршня или автономного привода.

По принципу действия механический индикатор представляет собой пружинно-поршневой манометр-самописец представленный на рисунке 1.1, *а*. Рабочая камера индицируемого цилиндра сообщается через индикаторный кран с полостью цилиндра 1, в котором находится поршенек 7. Шток 6

поршенька посредством системы рычагов 4 и возвратной пружины 5 преобразуют циклически изменяющееся в цилиндре двигателя давление в возвратно-поступательное движение самописца 2, который оставляет след на бумаге, закрепленной с помощью пластинчатых пружин на вращающемся барабане 3. Жесткий привод от коленчатого вала, представленный на рисунке 1.1, *б*, в механических индикаторах применялся достаточно редко. [11]

Конструктивная проблема привода барабана наиболее просто решается в случае применения автономного часового привода, представленного на рисунке 1.1, *в*. Очевидным условием при индицировании двигателя в этом случае является равномерность вращения коленчатого вала. Обычно такой индикатор отличается большим диаметром барабана и позволяет снимать непрерывную диаграмму за несколько оборотов двигателя.

Наибольшее распространение получили механические индикаторы, в которых вращение барабана самописца осуществляется соответственно движению поршня. Вращение барабана производится с помощью шнура, один конец которого намотан на барабане, а другой конец соединяется в период съемки диаграммы, с индикаторным приводом. Барабан снабжен спиральной пружиной, возвращающей его в исходное состояние при ослабленном шнуре. Привод может быть кривошипным, рычажным и эксцентриковым. В любом случае, барабан совершает возвратно-вращательное движение, поворачиваясь на угол, соответствующий ходу поршня цилиндра двигателя. Такая конструкция, представленная на рисунке 1.1, *г* лишена недостатков рассмотренных выше решений. Необходимо отметить, что для тихоходных двигателей этот способ индицирования находит применение даже в наше время.

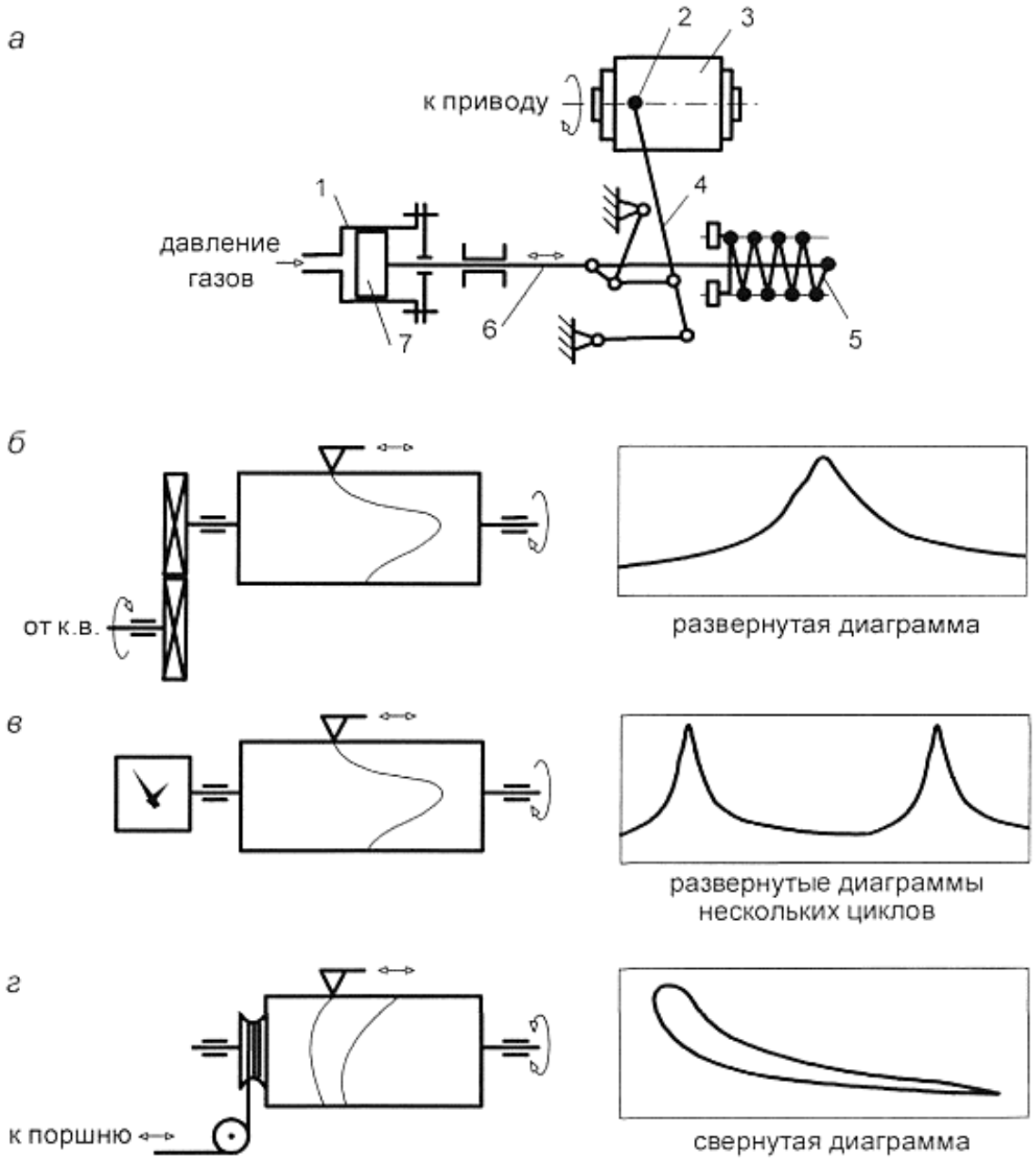

Рисунок 1.1 –Принцип действия механического индикатора (*а*) и схемы его привода: *б* - привод от коленчатого вала (к.в.); в - автономный привод; *г* - привод от поршня; *1* - цилиндр индикатора; *2* - перо самописца; *3* - барабан; *4* – система рычагов; *5* - пружина; *6* - шток; *7* - поршенек индикатора

Наиболее совершенной следует признать конструкцию фирмы «Зульцер», в которой использован индикаторный привод с поворотной головкой. Однако обработка таких ИД и идентификация неисправностей дизеля затруднительна. Основным недостатком механических индикаторов является низкая частота собственных колебаний пружинного самописца, что

позволяет использовать их только для записи диаграмм малооборотных двигателей. Другим существенным недостатком механических индикаторов следует признать возможность искажения диаграммы из-за неточной установки привода.

1.2. Пневмоэлектрические стробоскопические индикаторы

По мере развития тепловых двигателей и роста их технических возможностей изменялись и индикаторные приборы. Простые механические индикаторы уступили место более сложным, основанным на принципе сравнения текущего значения давления газа в камере двигателя и воздуха в резервуаре индикатора с использованием стробоскопического датчика. Наиболее популярный из которых стробоскопический электропневматический индикатор типа МАИ-2А предназначенный для индицирования поршневых машин, работающих на установившемся режиме с максимальной частотой вращения коленчатого вала до 5000 мин$^{-1}$. Устройство индикатора представлено на рисунке 1.2. [43]

Индикатор состоит из следующих основных узлов: датчика (приемника) давления 1, усилителя электрического импульса – тиратронного преобразователя 14, записывающего устройства 10, индуктивного отметчика ВМТ 13 и пульта управления (на рисунке не показан) – отдельного корпуса, внутри которого расположена электрическая часть индикатора; сзади к корпусу присоединены электрические кабели и трубки пневмосистемы, а на лицевой стороне расположены рукоятки кранов управления пневматической системой, манометр, вакуумметр и тумблеры управления электрической частью индикатора. При индицировании испытуемого дизеля 12 в полость датчика 1 через распределитель 11 пневматической системы подают воздух под плавно изменяющимся давлением в пределах ожидаемого давления в цилиндре. Когда давление в цилиндре двигателя совпадает с давлением в полости датчика, или станет немного ниже, контактное устройство размыкает цепь и на выходе датчика возникает электрический сигнал, который

усилиается и трансформируется в тиратронном преобразователе 14 до напряжения 14...18 кВ. Усиленный сигнал поступает на искровой разрядник 5, где образуется искра, пробивающая на электротермической бумаге отверстие, видимое как черная точка. Бумагу предварительно закрепляют на барабане 7, приводимом во вращение через валик 11, который, в свою очередь, получает вращение от коленчатого вала испытуемого дизеля 12.

Пример многоцикловой развернутой ИД снятой с помощью этого устройства представлен на рисунке 1.3. При записи такой диаграммы отмечаются: линия ВМТ 1; тарировочные линии постоянных давлений 2, по которым определяется масштаб диаграммы; линия атмосферного давления p_0 3; линия сгорания 4; линия сжатия-расширения, получаемая при отключенной подачи топлива в исследуемый цилиндр.

Так как скорость изменения противодавления воздуха в датчике гораздо меньше скорости изменения давления в цилиндре, в каждом цикле лишь две точки соответствуют совпадению давления в цилиндре с противодавлением воздуха в датчике: одна точка на линии повышения давления, другая на линии его снижения. Очевидно, в каждом последующем цикле это совпадение происходит при другом давлении и на диаграмме пробиваются очередные два отверстия и т. д. Соответствие давления в цилиндре положению точки (по высоте) на регистрационной бумаге достигается тем, что разрядник регистрационного устройства перемещается вдоль образующей барабана с помощью плунжерной пары 8 пневматического устройства, в которое подаётся воздух одновременно и под тем же давлением, что и в полость датчика. Это пневматическое устройство нагружено точно тарированной цилиндрической пружиной 6, благодаря чему разрядник перемещается строго пропорционально изменению давления в полости датчика. Подобрав посредством регулировочного крана определённую скорость

изменения противодавления воздуха в датчике, можно получить на регистрационной бумаге серию точек (отверстий), настолько близко расположенных одна к другой, что они образуют почти непрерывную линию изменения давления в цилиндре (см. рисунок 1.3).

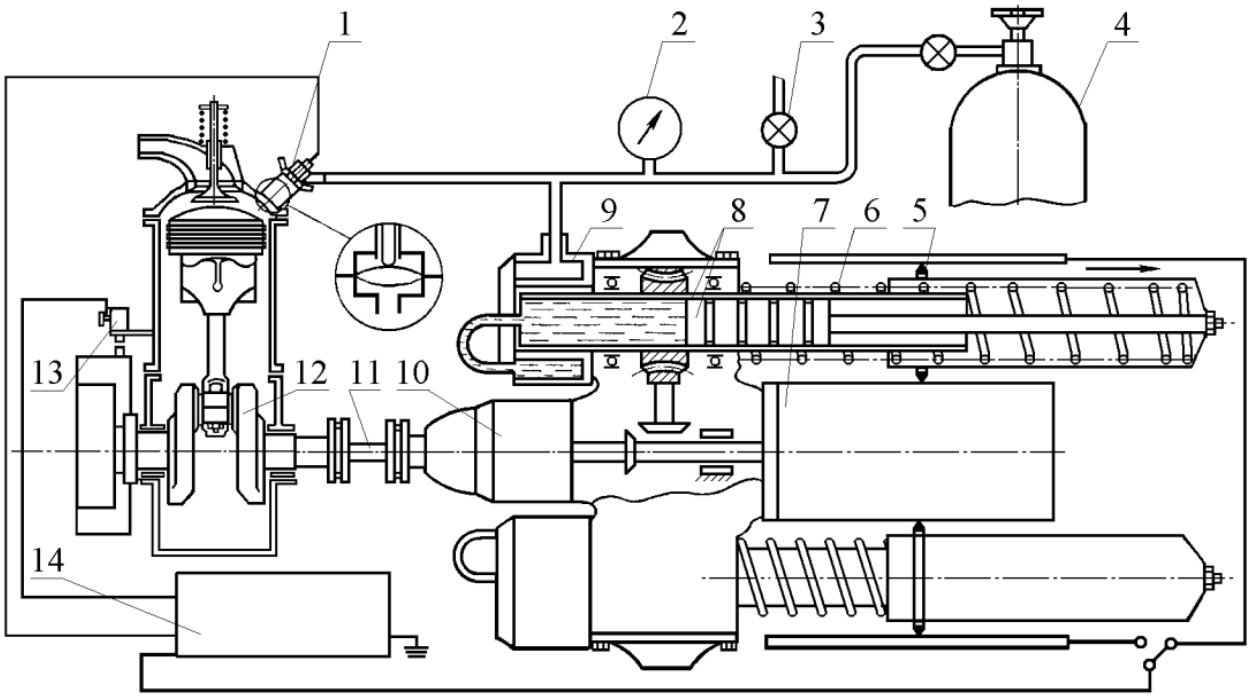

Рисунок 1.2 – Пневмоэлектрический стробоскопический индикатор МАИ-2А:
1 – датчик давления; *2* – манометр; *3* – кран в атмосферу; *4* – баллон сжатого воздуха; *5* – искровой разрядник записывающей части; *6* – пружина; *7* – барабан; *8* – плунжерная пара; *9* – распределитель пневматической системы; *10* – записывающая часть индикатора; *11* – соединительный валик с эластичными муфтами; *12* – испытуемый дизель; *13* – индуктивный отметчик ВМТ; *14* – тиратронный преобразователь

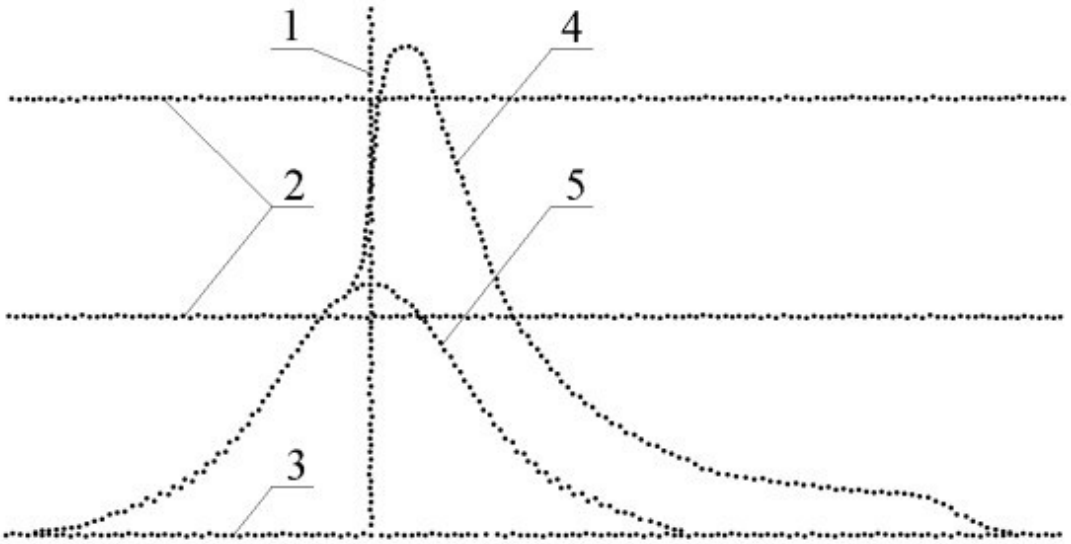

Рисунок 1.3 – Многоцикловая индикаторная диаграмма [43]:

1 – линия ВМТ; *2* – линия тарировки давления; *3* – линия атмосферного давления; *4* – линия сгорания; *5* – линия сжатия-расширения

Преимуществами электропневматического индикатора являются простота и надежность конструкции, минимальные искажения сигнала, генерируемого чувствительным элементом приемника давления в электронных схемах устройства, а также возможность объективной оценки погрешностей измерений. Датчик давления с водяным охлаждением может быть установлен таким образом, чтобы его чувствительный элемент располагался непосредственно в камере сгорания (без каналов, искажающих измерение давления). Точность записи диаграмм при размещении чувствительного элемента датчика непосредственно в камере сгорания обычно не превышает 1,5%. Поэтому такие индикаторные диаграммы часто используются для оценки качества записей, сделанных с помощью еще более современных электронных индикаторов.

Основным недостатком стробоскопических записей является необходимость их предварительной ручной обработки.

1.3. Электронные индикаторы

Абсолютно новым этапом в развитии средств индицирования ДВС является развитие компьютерных технологий и электроники. С конца

прошлого века на рынке появилось и продолжает появляться множество измерительных приборов на базе персональных или специализированных компьютеров. Хотя разработчики используют различные технические решения, устройства соответствуют одной из представленных на рисунок – 1.4 схеме. Общей особенностью таких измерительных систем является высокая скорость, возможность получения информации об изменениях давления в течение одного цикла и осреднение данных по произвольному количеству циклов. Именно с момента появления таких измерительных систем сложились условия для их широкого использования. Многоканальность плат ввода данных для одной из стандартных шин, данных (ISA или PCI) легко позволяла разработчикам расширить число контролируемых параметров. Измерительным комплексам этого периода характерно большое и разнообразное число первичных преобразователей - датчиков.

Электронные индикаторы обеспечивают непрерывную запись одного или серии последовательных циклов. Основными узлами электронного индикатора являются датчик, усилитель сигнала, несущего информацию, и регистрирующее устройство – осциллограф и/или ЭВМ.

Чувствительный элемент датчика может быть тензорезисторного, пьезоэлектрического, емкостного, индуктивного типа и др. Современные датчики для ДВС имеют хорошие метрологические свойства и вибростойкость, могут кратковременно работать при высоких температурах, оборудованы охлаждением. Малые габариты датчиков позволяют монтировать их так, чтобы чувствительный элемент соединялся с индицируемой полостью каналом минимальной длины.

Чувствительный элемент датчика преобразует воздействие на него давления (температуры) газа в соответствующий электрический аналоговый сигнал, который после аналогово-цифрового преобразования поступает в регистрирующее устройство ЭВМ. Однако в условиях рядовой эксплуатации

разветвленная кабельная система и большое число разъемов увеличивают время подготовки комплекса, снижают его надежность при использовании.

В современной практике исследований и испытаний ДВС широко применяют измерительно-вычислительные комплексы (ИВК), обеспечивающие автоматизированный сбор, преобразование, накопление, обработку большого объема информации о нагрузке, частоте вращения, давлениях, температурах, о количествах расходуемых сред и т.п. Результаты обработки информации регистрируются в виде протокола испытаний, состоящего из дискретных точек ИД, следующих через 0,5...1 °п.к.в.

Датчики и другую специализированную аппаратуру для испытаний дизелей выпускают фирмы A.V.L. (Австрия), Kestler (Германия), Autronica (Норвегия), НПК «Гарант» (Россия) и др. [43].

Отечественный переносной ИВК «Дизель-Адмирал-12М» (производитель НПК «Гарант», г. Санкт-Петербург) позволяет регистрировать и отображать следующие параметры дизеля [43]:

– давление в цилиндре дизеля (от 0 до 20 МПа);

– частоту вращения коленчатого вала (до 2500 об/мин);

– давление наддува (от 0 до 0,25 МПа);

– давление подачи топлива (от 0 до 100 МПа);

– максимальное давление сгорания;

– среднее индикаторное давление.

В состав ИВК «Дизель-Адмирал-12М» входят следующие составные элементы:

– ноутбук с операционной системой Windows XP и специальным программным обеспечением;

– блок управления и коммутации;

– датчик давления газа (ДДГ);

– датчик угла поворота коленчатого вала (ДУП);

– датчик давления топлива (ДДТ),

– датчик давления наддува (ДДН).

Схема соединений представлена на рисунке 1.4 (конструкция разъёмов исключает неправильное случайное соединение элементов комплекса).

Ноутбук и соединенный с ним через кабель блок управления и коммутации составляют так называемую рабочую станцию. Рабочую станцию располагают в удобном для работы месте, а датчики устанавливают на дизель. Аналоговые сигналы от датчиков поступают на рабочую станцию, где преобразуются в цифровой формат.

ДДГ присоединяют к индикаторному крану нужного цилиндра поочередно по мере выполнения измерений. Во избежание ожогов монтаж-демонтаж ДДГ выполняется только в защитных перчатках и при закрытом индикаторном кране. Время непрерывной работы ДДГ на открытом индикаторном кране не должно превышать 10 минут для предотвращения перегрева и выхода из строя чувствительного элемента. При необходимости проведения более длительных измерений следует периодически закрывать индикаторный кран (категорически запрещается охлаждать ДДГ водой).

ДУП устанавливают на кронштейне напротив специального отметчика, смонтированного на маховике.

ДДТ может быть установлен только в том случае, если между топливным насосом и трубкой высокого давления и форсункой конструкция дизеля позволяет установить специальный штуцер.

ДДН устанавливается на шланг, присоединённый вторым концом к воздушному ресиверу дизеля.

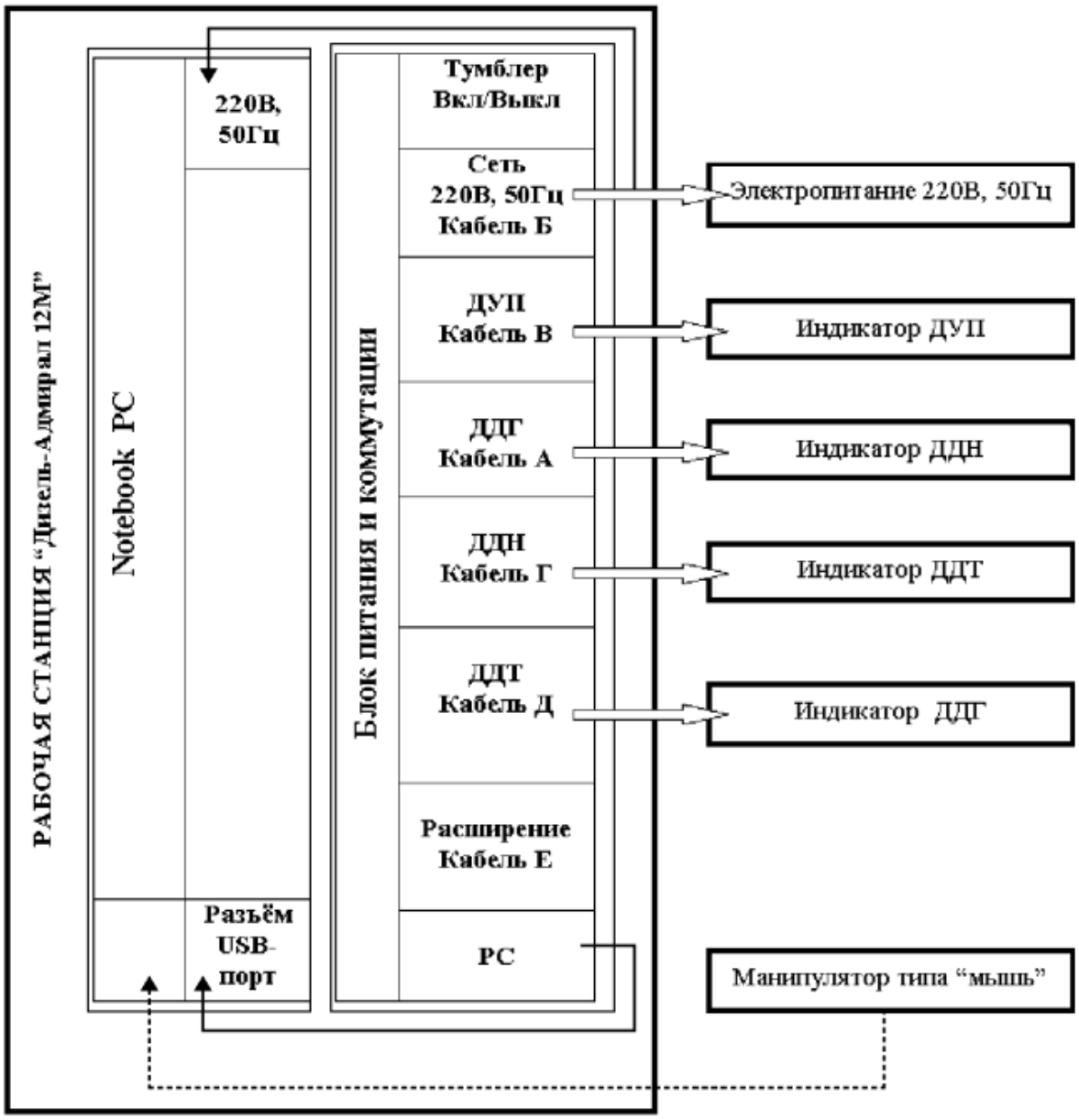

Рисунок 1.4 – Схема соединений в измерительно-вычислительном комплексе «Дизель-Адмирал-12М»

Специальное прикладное программное обеспечение ИВК «Дизель-Адмирал-12М» может работать по выбору пользователя в следующих режимах:

– режим «тип дизеля – выбор», предназначенный для работы с дизелем, на котором проводились работы ранее и данные занесены в архив;

– режим «установка ВМТ», предназначенный для адаптации комплекса к верхней мёртвой точке при первой установке системы на конкретный дизель;

– режим «тест датчиков», предназначенный для тестирования сигналов, поступающих от индикаторов (датчиков) на работающем дизеле;

– режим «измерение», предназначенный для регистрации результатов измерения и записи их в архив (пример соответствующего рабочего окна представлен на рисунке 1.5);

– режим «архив», предназначенный для анализа серии данных, полученных в режиме «измерение».

Известно, что при регистрации ИД в канале, соединяющем цилиндр дизеля и чувствительный элемент ДДГ, создается сопротивление течению газа, сопровождаемое колебаниями давления. Указанные факторы вызывают искажение экспериментальной ИД. Следовательно, в момент регистрации открывать индикаторный кран следует полностью. Приблизительно оценить абсолютную погрешность индицирования, вызванную размерами соединительного канала, можно по известной эмпирической формуле [35]:

$$\Delta p_{ск} = 8 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot \left(\frac{l_{ск}}{d_{ск}} \right) \cdot p_{max};$$

где $l_{ск}$ и $d_{ск}$ – соответственно длина и диаметр измерительного канала, мм.

Основное достоинство ИВК – возможность быстрого получения исчерпывающей информации и сравнительных данных о влиянии конструктивных, регулировочных и режимных факторов на рабочий процесс дизеля. К числу недостатков можно отнести трудность оценки погрешностей измерений при обработке первичного сигнала датчика в электронных приборах.

Современная техника индицирования позволяет проводить исследования рабочего процесса при небольших затратах времени и материальных средств как на экспериментальных стендах, так и в условиях эксплуатации – с переносным датчиком, закрепленным на индикаторных кранах цилиндров дизеля. Результаты исследования могут представлять собой

весьма ценный материал для анализа и рационализации внутрицилиндровых процессов в дизеле.

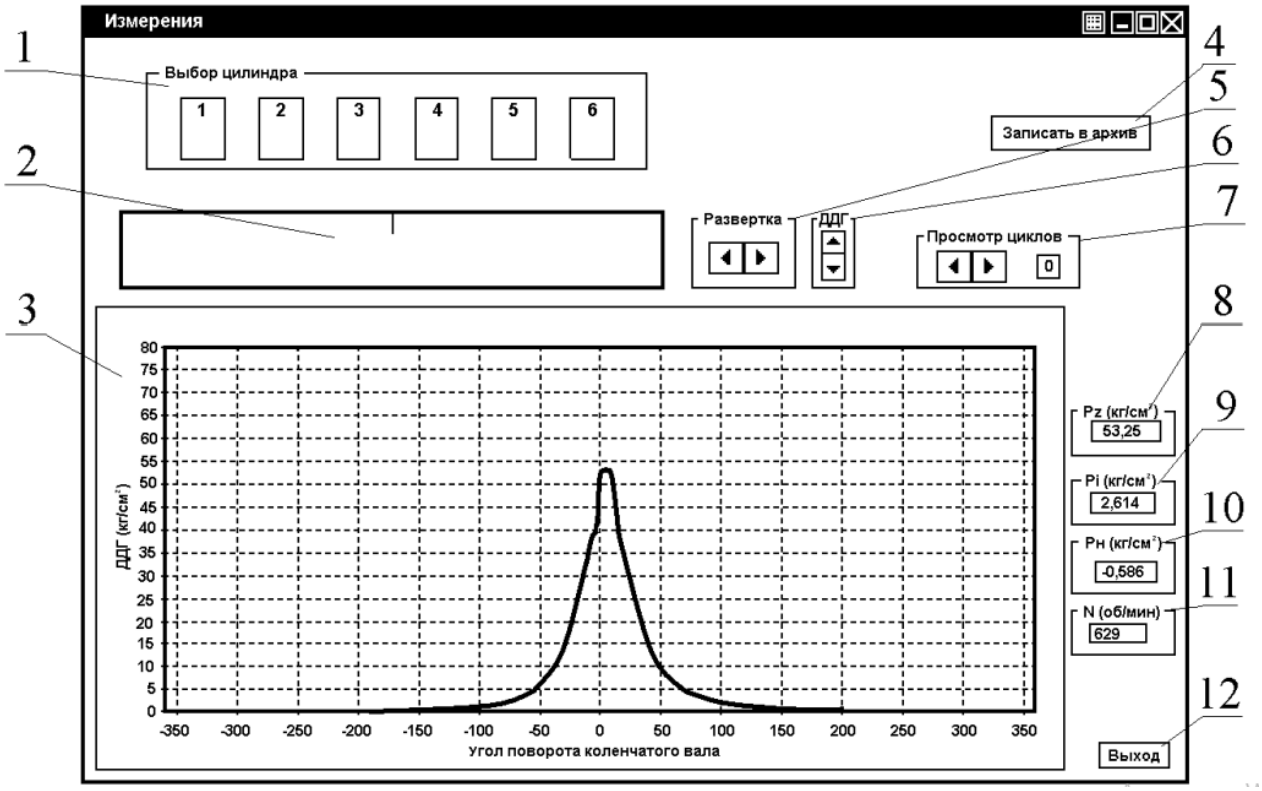

Рисунок 1.5 – Рабочее окно программного обеспечения измерительно-вычислительного комплекса «Дизель-Адмирал-12М» в режиме «измерение»: 1 – панель выбора индицируемого цилиндра; 2 – текстовое окно для вывода подсказок; 3 – графическая панель вывода развернутой индикаторной диаграммы; 4 – кнопка записи текущих результатов измерений в архив; 5 – кнопка изменения масштаба изображения по углу п.к.в.; 6 – кнопка изменения масштаба изображения по давлению газа; 7 – кнопка для возможности просмотра нескольких циклов; 8 – панель для вывода значения максимального давления цикла; 9 – панель для вывода значения среднего индикаторного давления; 10 – панель для вывода значения давления наддува; 11 – панель для вывода значения частоты вращения; 12 – кнопка выхода из рабочего окна в режиме «измерение»

Анализ показал, что при наличии отмеченных достоинств ИВК «Дизель-Адмирал» существенным недостатком комплекса является отсутствие возможности регистрации положения ВМТ на индикаторной диаграмме посредством прямых измерений. Вместо этого в работе ИВК предусмотрен режим «Установка ВМТ», предназначенный для «адаптации комплекса к

верхней мёртвой точке» посредством косвенных оценок её положения либо посредством автономных, не входящих в ИВК средств измерения.

1.4. Методы косвенной регистрации индикаторной диаграммы

Необходимо отметить существующие и не менее интересные для практического использования методы косвенной регистрации индикаторной диаграммы. Возможным способом оценки давления в цилиндре двигателя является измерение напряжений, возникающих в опорных элементах в точке крепления крышки к блоку цилиндров. Обнадеживающие результаты в этом направлении были опубликованы учеными Мурманского государственного технического университета в работах [4,5]. Предложенный ими метод индицирования заключается в том, что специально изготовленную стальную шайбу с закрепленными на ней тензорезисторами помещают под гайку или болт крышки цилиндров. Выходной сигнал от тензодатчика передается через усилитель на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и обрабатывается в компьютере. Сравнение индикаторных диаграмм, полученных в ходе эксперимента с результатами индикатора МАИ-2А, показало, что хотя погрешность измерения давления в отдельных точках ИД и достигает 5%, фазовые характеристики начала видимого сгорания, максимума давления сгорания, а также интегральный показатель - среднее индикаторное давление для сравниваемых методов практически совпадают. Автор [11] предполагает, что результаты могли быть улучшены, если бы при косвенном индицировании использовалась не шайба с наклеенными на ее поверхность тензоэлементами, а специально выпускаемые для этой цели тензоэлементы для непосредственного измерения осевого растяжения в болтах. Примером такой продукции является элемент типа KFG фирмы "Kyowa Electronic Instruments", Япония [6]. К сожалению, метод не получил дальнейшего развития, поскольку после 2000 года практически отсутствуют публикации на этот счет. Внесение этого метода в ряд косвенных методов измерения индикаторной диаграммы требует объяснения. Измерение только деформации шайбы или шпильки еще

не дает оснований противопоставлять его традиционным способам измерения давления. Ведь подобный деформируемый элемент- мембрана присутствует в конструкции практически любого первичного преобразователя давления. В рассмотренном методе чувствительным элементом (после соответствующей доработки) становится штатный конструктивный элемент двигателя. Тарировать такой датчик вне конструкции двигателя возможно только под задачи измерения деформации или силы, возникающей в силовых элементах крепления. Определение давления в цилиндре двигателя требует учета целого ряда дополнительных конструктивных и технологических особенностей конкретного двигателя.

С точки зрения простоты эксперимента вызывает интерес получение информации об индикаторном процессе по результатам виброметрии [7, 13, 14, 15]. Популярность которого обусловлена появлением нового метода обработки сигнала вибрации - вейвлетным анализом [16,17]. Предполагается, что в формировании вибрации цилиндровой втулки двигателя участвуют не только волны давления, вызванные сгоранием топлива в цилиндре, но и волны значительно меньшей амплитуды, связанные с работой органов газораспределения. Однако убедительного доказательства этому авторы [14] не приводят. С середины 1990-х годов Военный инженерно-технический университет предпринимает попытки получить индикаторную диаграмму опираясь на данные виброметрии. В работе [7] авторы обосновывают связь между вибрацией силовой шпильки блока цилиндров ДВС преимущественно с выделением теплоты в цилиндре. Качественное описание поведения ударной волны делается авторами с помощью уравнений газовой динамики, которые устанавливают зависимость перепада давлений (p_1/p_2) в волне от скоростей движения среды u_0 и ударной волны d. При этом авторы основываются на теории двойного разрыва (ударная волна и фронт пламени — границы разрывов) [18, 19], которая, по их мнению, лучше подходит для описания процесса горения в цилиндре двигателя:

$$\frac{1}{k}\cdot\frac{k+1}{k-1}\cdot\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2-\frac{2}{k-1}\left[\left(\frac{d-u_0}{c}\right)^2+\frac{1}{k}\right]\cdot\frac{p_2}{p_1}+\left[\left(\frac{d-u_0}{c}\right)^2\cdot\left(\frac{2}{k-1}+q\right)-\frac{1}{k}\right]=0;$$

$$\left(\frac{d-u_0}{c}\right)^2=\frac{1}{k}\cdot\left[\left(k^2-1\right)\left(\frac{1}{k-1}+\frac{q}{2}\right)^2-1\right]+\frac{1}{k}\cdot\sqrt{\left[\left(k^2-1\right)\left(\frac{1}{k-1}\cdot\frac{q}{2}\right)^2-1\right]^2-k^2}.$$

где k - показатель адиабаты, q - коэффициент, связанный с количеством выделившейся теплоты, c -скорость звука в невозмущенной среде.

При этом частота воздействия ударного импульса на стенки/рассчитывается по формуле

$$f=(1.05\ldots1.15)\frac{c}{2D}$$

Авторы утверждают, что основная сложность анализа сигнала вибрации состоит в селекции полезного сигнала - временной реализации *s(t)* в суммарном регистрируемом датчиком вибрации *x(t) = s(t) + ξ(t)*. [20, 21, 22]. По нашему мнению, погрешность в определении ВМТ чрезмерно велика. Кроме того, не ясна методика решения представленных выше систем уравнений, а главное, определения давления в цилиндре на участках цикла, когда теплота не выделяется. Представленные в работе [7] результаты противоречивы, оценить их достоверность и, тем более, повторить их достаточно проблематично.

К косвенному способу получения индикаторной диаграммы можно определить работы [23, 24], в которых авторы предлагают получить индикаторную диаграмму на основе результатов измерения мгновенной угловой скорости коленчатого вала. Однако точность такой диаграммы будет весьма сомнительной. На практике, по данным измерений мгновенных значений угловой скорости коленчатого вала можно судить о неравномерности распределения мощности по цилиндрам для шестицилиндровых двигателей и меньше.

1.5. Выводы по разделу

В результате анализа методов и средств регистрации индикаторной диаграммы можно сделать вывод о том, что несмотря на наличие различных

способов регистрации индикаторной диаграммы, каждый из них имеет свои достоинства и недостатки.

1) Механические индикаторы:

+ легкое решение проблемы определения диаграммы насосных ходов двигателя за счет выбора; жесткости, измерительной пружины индикатора:

- низкая частота собственных колебаний пружинного самописца;

- возможность искажения диаграммы из-за неточной установки привода.

2) электропневматический индикатор

+ простота и надежность конструкции;

+ минимальные искажения сигнала, генерируемого чувствительным элементом приемника;

+ возможность объективной оценки погрешностей измерений;

- необходимость их предварительной ручной обработки.

3) Измерительные приборы на базе персональных или специализированных компьютеров:

+ высокая скорость;

+ возможность получения информации об изменениях давления в течение одного цикла;

+ осреднение данных по произвольному количеству циклов;

- разветвленная кабельная система и большое число разъемов увеличивающих время подготовки комплекса, снижающих его надежность при многократном использовании.

4) Методы косвенной регистрации индикаторной диаграммы:

- В большинстве случаев не имеют практического применения и нуждаются в существенных доработках и уменьшении погрешностей.

В связи с изученным материалом для регистрации индикаторной диаграммы нами был выбран наиболее простой способ её записи при помощи

пневмоэлектрического стробоскопического индикаторами типа МАИ-2А, основным фактором при выборе это устройства сыграла его простора в использовании и наличие оборудования в учебно-экспериментальных стендах лаборатории ДВС СПбГМТУ. Основной недостаток предварительной ручной обработки ИД будет решен методом сканирования полученных диаграмм на широкоформатном сканере и их обработка с помощью современных средств черчения, а именно программного обеспечения КОМПАС – 3D v19.

2. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДИЗЕЛЯ

Комплексная диагностическая система может быть разработана таким образом, чтобы обеспечить требуемую эффективность рабочего цикла, оцениваемую индикаторным КПД. Указанный КПД непосредственно зависит от качества внутрицилиндровых процессов, что может быть отражено в параметрах индикаторной диаграммы. Её параметры в значительной мере зависят от технического состояния двигателя, в первую очередь от состояния топливной аппаратуры (ТА), системы воздухоснабжения, а также гидроплотности рабочего цилиндра, определяемой, в свою очередь, состоянием поршневых колец и клапанов механизма газораспределения [1].

Несмотря на опубликованное множество научных работ, эффективность методов технического диагностирования в повышении качества эксплуатации ДВС остается низкой, особенно при поиске дефектов и тем более прогнозировании их развития. Следовательно, более плодотворным может быть использование индикаторных диаграмм для решения диагностических задач частного характера.

2.1. Возможные диагностические и структурные параметры индикаторной диаграммы

В качестве результатов индицирования целесообразно применять как индикаторную диаграмму, так и полученные путём математического анализа диаграммы — так называемые характеристики тепловыделения при сгорании топлива [25, 26]. С учётом возможностей указанных средств диагностическими параметрами могут быть приняты параметры индикаторной диаграммы и характеристики тепловыделения:

– p_c — давление рабочего тела в конце процесса сжатия, МПа;

– p_z — максимальное давление рабочего цикла, МПа;

– $\varphi_{сам}$ — угол самовоспламенения (угол между точкой самовоспламенения горючей смеси и ВМТ поршня на диаграмме, выраженный в градусах п. к. в.;

– $(dx/d\varphi)_{max}$ — максимальная скорость относительного тепловыделения (или $(dp/d\varphi)_{max}$ — «жёсткость» процесса сгорания, МПа/п. к. в.);

– $\varphi_{сгор}$ — продолжительность сгорания, п. к. в.

Перечисленные параметры отражены на рисунке 2.1.

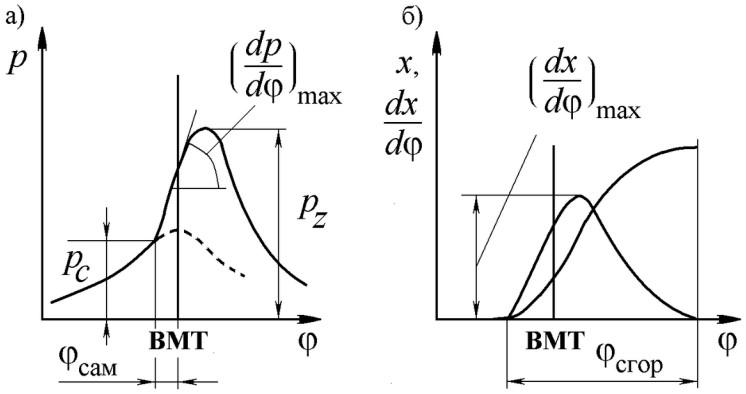

Рисунок 2.1 – Диагностические параметры по результатам индицирования рабочего процесса дизеля: *а* — по индикаторной диаграмме; *б* — по кривым тепловыделения при сгорании топлива

Количество выделенных независимых диагностических параметров (в данном случае — пять) определяет максимальное число структурных параметров дизеля, которое может быть включено в диагностическую математическую модель. Диагностическая модель представляет собой систему уравнений. С учётом очевидных требований о равенстве числа неизвестных числу уравнений, количество структурных параметров в данном случае должно быть не более пяти. Из большого числа возможных вариантов выбраны пять наиболее важных параметров, характеризующих техническое состояние указанных элементов дизеля и существенно влияющих на его индикаторный КПД.

Выбранные структурные параметры должны быть независимыми. Их изменение не должно вызывать разрывов функций диагностических параметров. Последнее требование означает, что с использованием разрабатываемой математической модели будет возможно диагностировать так называемые постепенные отказы [27]. В данном случае в состав структурных параметров могут быть включены:

– $\varphi_ф$ — продолжительность подачи топлива форсункой, п. к. в.;

– $(\varphi_{сам} - \varphi_{нпн})$ — продолжительность периода между самовоспламенением и так называемым геометрическим началом топливоподачи топливным насосом высокого давления (ТНВД), п. к. в.;

– p_k — давление наддува, МПа;

– T_k — температура наддувочного воздуха, К;

– $\Delta m_{p.m}$ — суммарная масса утечек рабочего тела из полости цилиндра через зазоры в цилиндропоршневой группе и клапанах механизма газораспределения, кг.

Теоретический анализ показывает, что изменение каждого из перечисленных структурных параметров в отдельности, а также совокупное их изменение в любом сочетании вызывает соответствующее изменение вышеуказанных диагностических параметров.

Возможны и другой состав, и количество диагностических и структурных параметров. Большее число структурных и диагностических параметров в локальной системе означает лучшие её возможности в выявлении местоположения неисправностей и в прогнозировании отказов. Однако при увеличении числа указанных параметров сложность получения диагностической математической модели существенно возрастает.

2.2. Частная задача диагностирования с использованием индикаторных диаграмм

Ввиду сложности получения диагностической математической модели при увеличенном количестве структурных и диагностических моделей целесообразно разработать и использовать модели частного характера. Важной для практики задачей является оценка герметичности полости рабочего цилиндра двигателя, которая, как было сказано выше, зависит от наличия зазоров в цилиндропоршневой группе и клапанах механизма газораспределения. Решение этой диагностической задачи позволяет определить степень изношенности элементов цилиндропоршневой группы деталей, в частности, поршневых колец, тарелок и сёдел клапанов.

Одним из возможных способов диагностирования степени изношенности цилиндропоршневой группы может оказаться регистрация изменения показателя политропы сжатия.

Процессы сжатия свежего заряда и расширения продуктов сгорания в цилиндрах ДВС могут быть представлены простой математической моделью – уравнением политропного процесса, согласно которому, давление газа, умноженное на его объем в степени n_1 , является величиной постоянной, где

индекс или показатель n_1 получил название среднего показателя политропы сжатия. Следовательно давление в любой точке процесса вычисляется на основании координат “опорной” точки (p_0, V_0), принадлежащей тому же политропному процессу

$$p = p_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{n_1}.$$

Из основных положений термодинамики следует, что предположение о постоянном политропном показателе при сжатии исключает возможность строгого математического описания знакопеременного процесса теплообмена в цилиндре двигателя. Несмотря на это, модель по-прежнему широко используется как в учебных, так и в инженерных расчетах [28], а также при разработке новых поршневых машин [29]. Это объясняется тем, что при правильном расчете значения среднего показателя политропы модель позволяет рассчитывать параметры рабочего тела на разных этапах цикла с достаточной для практики точностью.

Наряду с задачей прогнозирования давления в цилиндре дизеля (назовем эту задачу условно прямой), модель политропного процесса используется и для решения обратных задач. В этих случаях экспериментальную ИД анализируют на предмет определения величины показателей политропных процессов для использования в иных технических целях. Авторами работ [30, 31, 32 и др.] показана связь между величиной утечек рабочего тела в процессе сжатия и значением среднего показателя политропного процесса сжатия, что предлагается использовать для диагностирования потери гидравлической плотности цилиндра при износе и залегании поршневых колец или неплотном прилегании клапанов механизма газораспределения.

Несмотря на привлекательность использования модели политропного процесса, ее использование для целей диагностики сопряжено с серьезной проблемой, вызванной тем, что значение показателя политропы, определенного по экспериментальным данным, весьма чувствительно к погрешностям измерения индикаторной диаграммы, включая погрешность определения ВМТ.

2.3. Выводы по разделу

Так как техническое состояние дизеля определяется огромным числом структурных параметров, диагностическая модель может оказаться весьма громоздкой и сложной для использования [1].

Поэтому целесообразно разработать и применить на практике иерархический комплекс диагностических систем, состоящий из общей и ряда локальных диагностических систем, в которых диагностическими параметрами могут быть приняты параметры индикаторной диаграммы и характеристики тепловыделения. Большее число структурных и диагностических параметров в локальной системе означает лучшие её возможности в выявлении местоположения неисправностей и в прогнозировании отказов. Однако при увеличении числа указанных параметров сложность получения диагностической математической модели существенно возрастает. Одним из возможных способов диагностирования степени изношенности цилиндропоршневой группы может оказаться регистрация изменения показателя политропы сжатия.

Несмотря на привлекательность использования модели политропного процесса, ее использование для целей диагностики сопряжено с серьезной проблемой, вызванной тем, что значение показателя политропы, определенного по экспериментальным данным, чувствительно к погрешностям измерения индикаторной диаграммы, включая погрешность определения ВМТ.

3. ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВМТ НА ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЕ НА КАЧЕСТВО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДИЗЕЛЯ

В системах функциональной диагностики судовых дизелей одной из первостепенных решаемых задач является определение среднего индикаторного давления цилиндра на основе анализа регистрируемой индикаторной диаграммы. Многие экспериментаторы сталкивались с проблемой «нелепых» индикаторных показателей, не согласующихся с достоверно определенными при испытании эффективными показателями двигателя. Одна из причин этой проблемы кроется в неточном определении положения ВМТ. Имеются основания предположить, что наличие погрешности в определении положения ВМТ на индикаторной диаграмме оказывает влияние на качество анализа процесса тепловыделения в двигателе и на точность оценки утечек рабочего тела из рабочего цилиндра.

В системах функциональной диагностики обычно сигналом ВМТ служит сигнал, поступающий от датчика отметки ВМТ (контактного, индуктивного, оптического или другого типа), установленного на маховике двигателя. Поэтому важно установку данного датчика проводить очень точно. Ошибка в установке датчика приводит к значительным погрешностям при определении среднего индикаторного давления и других исследуемых величин.

3.1. Алгоритмом самодиагностики системы

В связи с указанным разработан алгоритм проверки правильности установки датчика-отметчика ВМТ, который включен в общий алгоритм функционирования системы диагностики, разработанной и используемой на АО «УК «БМЗ». Данный алгоритм можно назвать алгоритмом самодиагностики системы [40].

Некоторыми авторами принято, что если в процессе работы дизеля отключить подачу топлива в цилиндр, то кривая изменения давления в цилиндре *p(φ)* имеет относительно истинного положения ВМТ абсолютно симметричный вид и достигает своего максимума, когда объем цилиндра минимален, т. е. когда поршень находится в ВМТ, условное изображение этого допущения представлено на рисунке 3.1. В то же время системой диагностики она может быть отображена, как имеющая некоторое смещение относительно 0 град по шкале угла поворота коленчатого вала, и задача проверки правильности установки датчика ВМТ (правильности фазирования кривой *p(φ)* относительно истинного положения ВМТ) заключается в определении величины данного смещения. После определения величины смещения ВМТ осуществляется переустановка датчика отметки ВМТ, т. е. компенсация выявленного смещения.



Рисунок 3.1 – Кривая изменения давления в цилиндре дизеля (сжатие-расширение), полученная при помощи системы диагностики [41]

Наиболее простым способом нахождения истинного положения ВМТ является поиск точки кривой *p(φ)* абсолютного максимума. Но такой способ с рассмотрением каждой отдельной точки кривой имеет существенный недостаток, так как он не основан на данных о симметрии кривой, заключенной в множестве точек в области, прилежащей к ВМТ.

Автором [41] предложен следующий алгоритм анализа кривой *p(φ)* для выявления истинного положения ВМТ.

1. Запись при помощи системы диагностики процесса *p(φ)* (сжатия—расширения, с отключением подачи топлива в цилиндр). Полученный процесс в силу указанных выше причин может иметь некоторое смещение относительно истинного положения ВМТ.

2. Аппроксимация участка кривой, прилежащей к области ВМТ, полиномом второй степени $y = Ax^2 + Bx + C$; коэффициенты *A*, *B* и *C* могут быть найдены из системы уравнений [1]:

$$A\sum_{i=1}^{n} x_i^4 + B\sum_{i=1}^{n} x_i^3 + C\sum_{i=1}^{n} x_i^2 = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 y_i;$$

$$A\sum_{i=1}^{n} x_i^3 + B\sum_{i=1}^{n} x_i^2 + C\sum_{i=1}^{n} x_i = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i;$$

$$A\sum_{i=1}^{n} x_i^2 + B\sum_{i=1}^{n} x_i + Cn = \sum_{i=1}^{n} y_i;$$

где *n* — число точек, по которым производится аппроксимация.

3. Нахождение первой производной функции *y* по углу поворота коленчатого вала $y' = (Ax^2 + Bx + C)' = Ax + B$.

4. Нахождение значения аргумента, соответствующего экстремуму функции *y*. $Ax + B = 0;\ x = -B/A$.

Найденное значение аргумента *x* и определяет истинное положение ВМТ цилиндра.

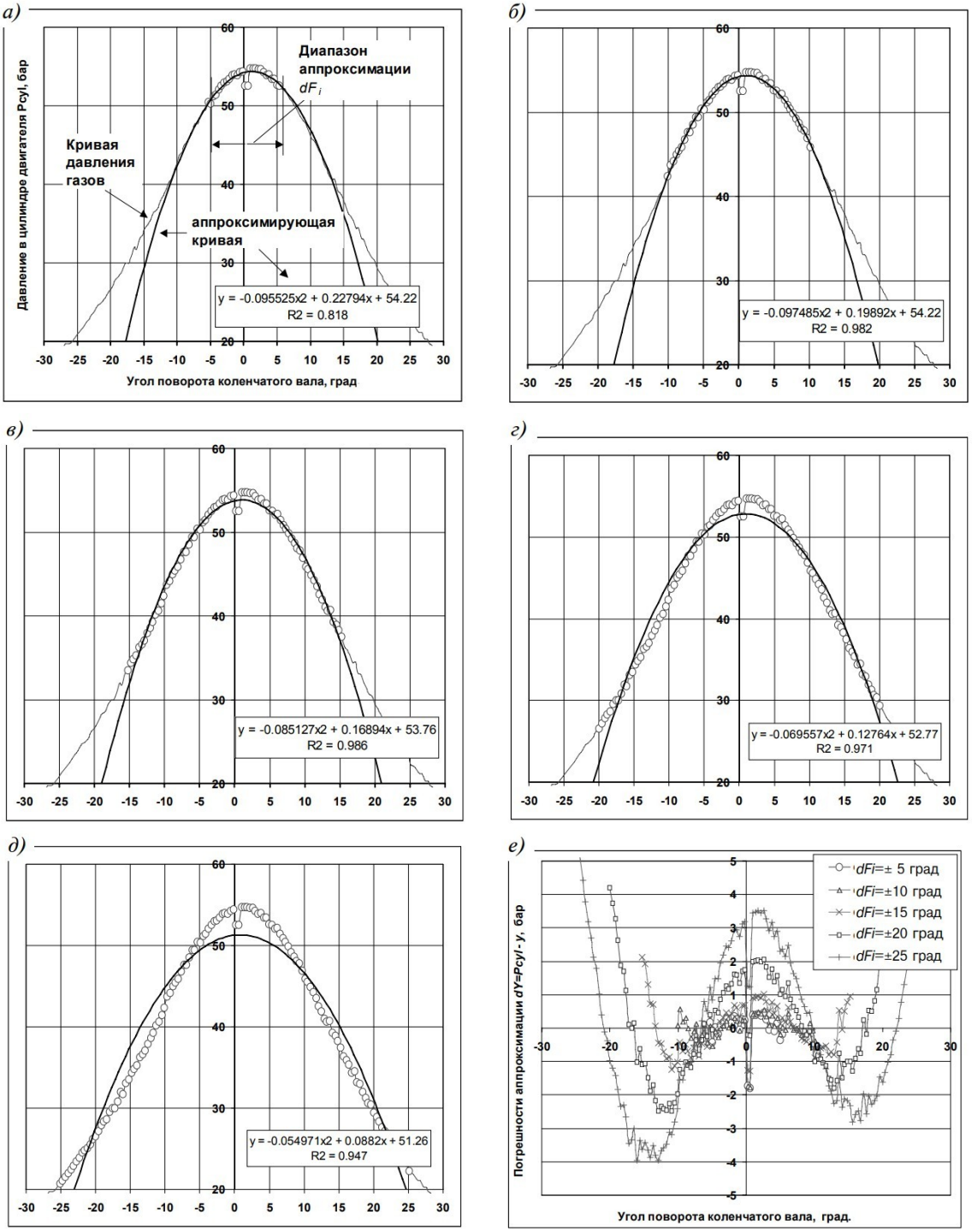

Рисунок 3.2 – Анализ качества аппроксимации кривой давления газов цилиндре дизеля полиномом второй степени для различных диапазонов аппроксимации *dFi*: *а), б), в), г), д)* — *dFi* = 5, 10, 15, 20, 25 град ПКВ; *е)* погрешность аппроксимации $dFi = P_{cyl} - y$

При такой постановке задачи возникает вопрос о том, какой по величине диапазон области определения функции y (кривой $p(\varphi)$) в окрестности ВМТ следует аппроксимировать полиномом (выбранный диапазон должен быть по возможности максимален по величине, давать минимальную погрешность

аппроксимации и, соответственно, минимальную погрешность в определении истинного положения ВМТ). На рисунке 3.2. (а—д) проиллюстрирована выполненная аппроксимация для различных диапазонов по углу поворота коленчатого вала *dFi* = ±5, 10, 15, 20 и 25 град ПКВ. Естественно, что диапазоны аппроксимации на данном этапе имеют ориентацию относительно 0 град по шкале, задаваемой системой диагностики с некоторой погрешностью. На рисунок 3.2. (е) представлены графики, отражающие погрешность аппроксимации для различных анализируемых диапазонов аппроксимации. Из графиков видно, что качество аппроксимации существенно зависит от величины диапазона и резко ухудшается для диапазонов, превышающих величину ±15 град ПКВ. Подтверждением этому служит также рассчитанные значения стандартной ошибки аппроксимации *S* представленной на рисунке 3.3.

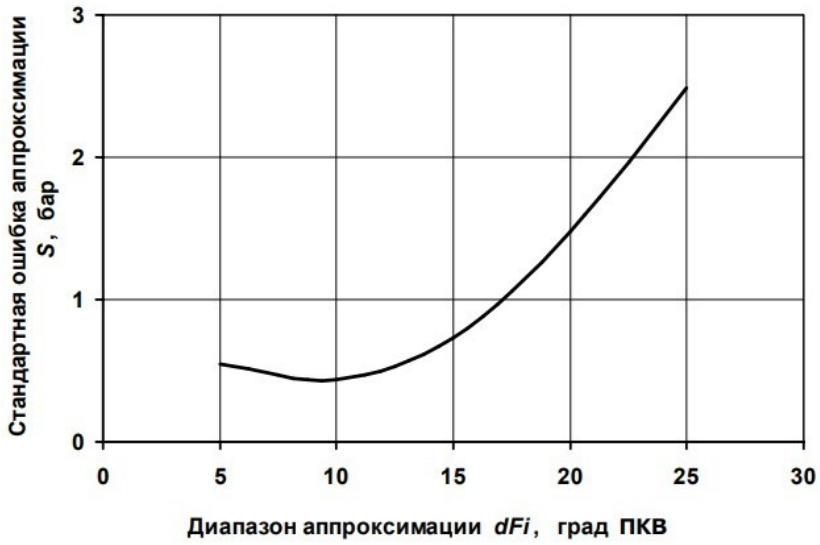

Рисунок 3.3 – Зависимость стандартной ошибки аппроксимации *p(Fi)* от величины диапазона аппроксимации *dFi*

Для диапазона ±5 град ПКВ *S* = 0,545 бар, для ±10 град ПКВ *S* = 0,439 бар, для ±15 град ПКВ *S* = 0,729 бар. Выполненный анализ позволяет выбрать оптимальный диапазон — ±(5—10) град ПКВ. В целом анализ показывает, что полином второй степени обладает хорошими аппроксимирующими качествами для диапазона, не превышающего ±15 град ПКВ.

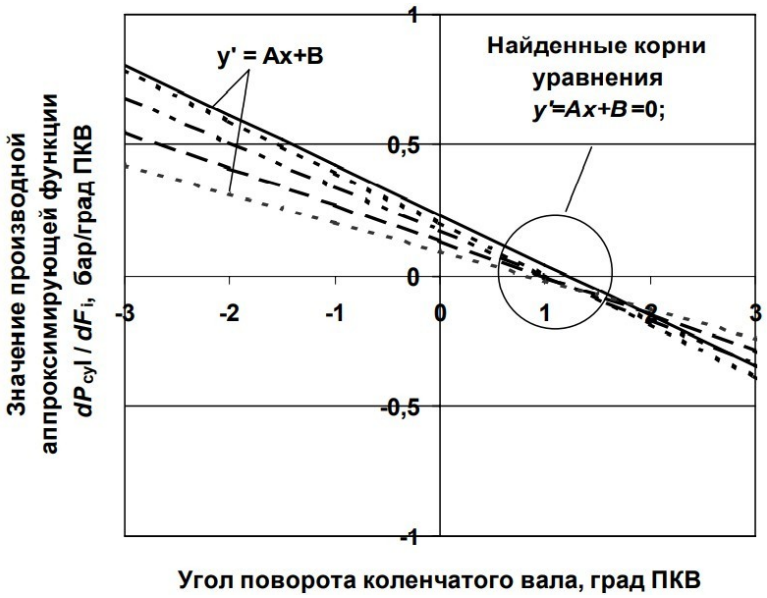

Рисунок 3.4 – К определению корней уравнения y' = 0

На рисунок 3.4 представлены графики нахождения корней уравнения *y' = 0* (для различных диапазонов аппроксимации АП), т. е. нахождения величин смещения истинной ВМТ от ВМТ, получаемой системой диагностики от датчика.

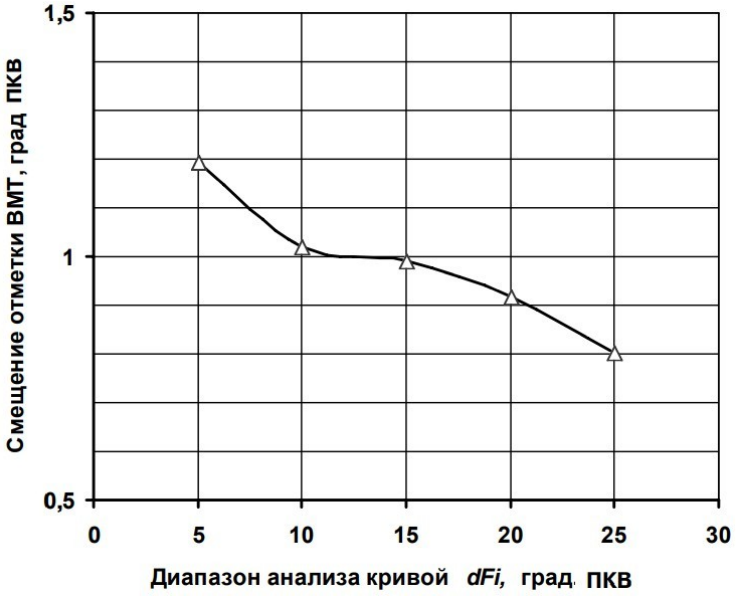

Рисунок 3.5 – Зависимость выявленного смещения отметки ВМТ при различном анализируемом диапазоне угла ПКВ

На рисунок 3.5 приведена зависимость выявленного смещения ВМТ как функция величины диапазона аппроксимации. Как видно, абсолютно одинаковый результат (смещение ВМТ = 1,0 град ПКВ) был получен при *dFi*, равных ±10 и 15 град ПКВ. Несколько отличающиеся результаты были

получены при *dFi*, равных 5, 20 и 25 град ПКВ. Однако следует отметить, что для всех исследуемых диапазонов *dFi* оценка истинного положения ВМТ уложилась в допуск ±0,2 град ПКВ. На основе рассмотренного конкретного случая можно сделать вывод, что датчик отметки ВМТ системы диагностики посылает сигнал в систему несколько раньше положенного времени и его положение следует изменить (в противном случае система диагностики будет завышать величину среднего индикаторного давления).

Однако ошибочно полагать, что положению ВМТ соответствует максимум давления индикаторной диаграммы, определенной при отключенной подаче топлива в цилиндр, т.е. диаграмме «сжатие - расширение». Также данный алгоритм нахождения положения ВМТ, основанный на определении экстремума экспериментальной диаграммы, аппроксимируя ее квадратичным полином, устраняет только одну составляющую ошибки, связанную с погрешностью определения мгновенных значений давления в цилиндре. При этом основная идея, по-прежнему, базируется на утверждении, что в ВМТ диаграммы «сжатие-расширение» давление имеет максимум. Это положение, фактически, стало основополагающим в работе многочисленных измерительных и диагностических комплексов. В действительности существует, как минимум, еще две причины, приводящие к изменению давления: теплообмен и утечки рабочего-тела. Специально выполненные расчетные исследования [41] показали, что неточность этого метода в условиях эксплуатации может достигать 4º.

Очевиден тот факт, что тепловой поток от рабочего тела к стенкам цилиндра достигает своих максимальных значений вблизи ВМТ, когда температурный перепад на стенке цилиндра максимален. Но, с другой стороны, площадь теплообмена при этом минимальна. Благодаря этому изменение давления в цилиндре из-за теплообмена не так существенно. На рисунке 3.6 приведены результаты расчетного исследования [41] влияния

средней температуры стенок цилиндра, на протекание процессов «сжатие-расширение» в цилиндре двигателя.

Расчет выполнен для двигателя на основании уравнения, эмпирически учитывающего конвективный и лучистый теплообмен в цилиндре ДВС. Потери рабочего тела из-за перетекания в этом случае не учитывались, а расчет изменения объема вследствие движения поршня осуществлялся с учетом геометрии кривошипно-шатунного механизма двигателя. Наиболее удобным, для анализа смещения максимума диаграммы давления относительно ВМТ является кривая скорости изменения давления $dp/d\varphi$ зависимости от угла поворота коленчатого вала φ которая пересекает ось абсцисс в точке экстремума функции $p(\varphi)$.

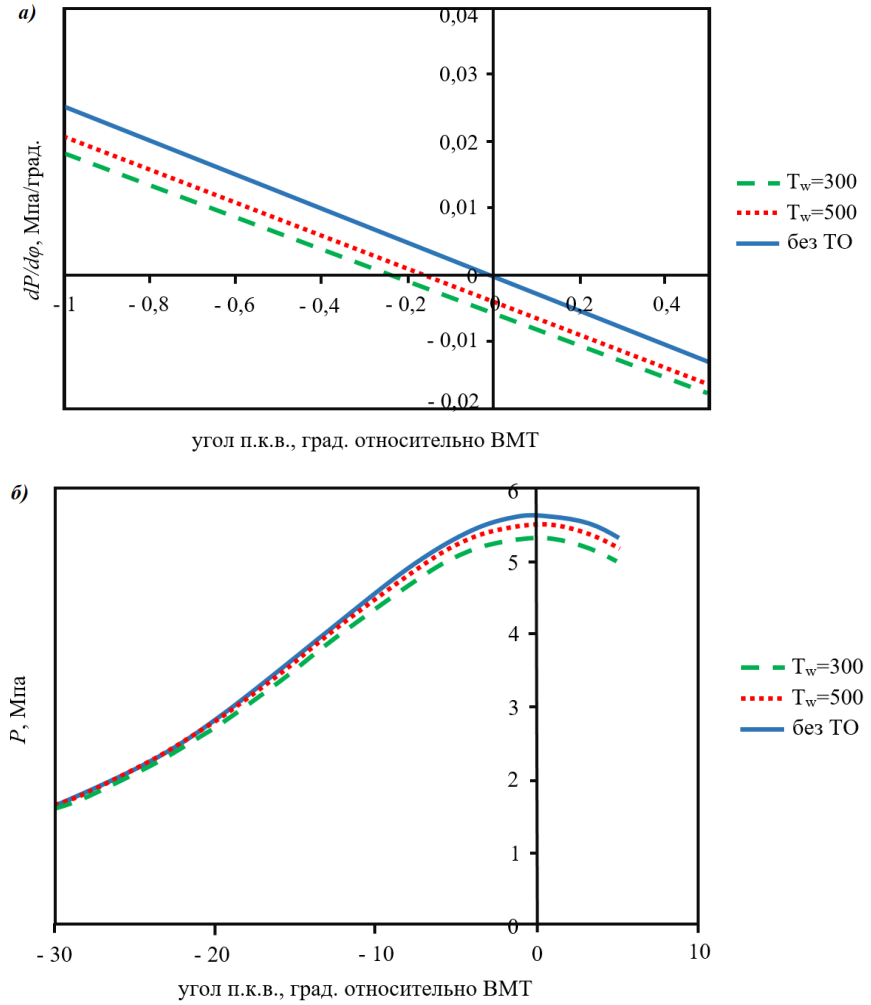

Рисунок 3.6 – Влияние теплообмена (ТО) на положение максимума давления диаграммы «сжатие – расширение»: *а* – изменение скорости нарастания давления; *б* – изменение давления; T_w – средняя температура стенок

При анализе представленных на рисунке 3.6 зависимостей следует обратить внимание на два важных, на наш взгляд, момента. Во-первых, влияние средней температуры стенок на смещение максимума давления диаграммы не значительно. Даже для нереальной для условий испытаний ДВС температуры стенок $T_w=300K$ максимум давления смещается относительно ВМТ чуть более 0,2 градуса угла п.к.в. Следует отметить, что расчет выполнялся для быстроходного дизеля. Влияние теплообмена в дизелях средней быстроходности и тихоходных несколько выше вследствие увеличения продолжительности процесса. Во-вторых, расчет без учета утечек рабочего тела дает завышенные значения давления в конце сжатия p_c. При экспериментальном исследовании рабочего процесса двигателя было установлено, что величина этого давления не превышает 4,3 Мпа [41].

Как и для теплообмена, продолжительность процесса оказывает решающее влияние на количество воздуха, которое перетечет из цилиндра в картер. Однако если в области ВМТ росту теплового потока препятствует уменьшение площади поверхности рабочей камеры, то для утечек воздуха зависимость однозначна: чем выше давление в цилиндре, тем выше скорость и расход воздуха через неплотности. В результате расход воздуха через неплотности возрастает по мере приближения поршня к ВМТ, одновременно с уменьшением его скорости до нуля. В результате характер изменения давления в области ВМТ преимущественно определяется утечками воздуха.

Кроме вышеназванных факторов, погрешность определения ВМТ может быть вызвана динамическим перемещением поршня, за счет изменения зазоров в подшипниках и скручиванием коленчатого вала двигателя. Величина этих погрешностей может достигать 1°.

Множество допустимых альтернатив Δ, удовлетворяющее всем ограничениям рассматриваемой задачи, определяется на основании конструктивных характеристик двигателя, исследуемого режима и с учетом опытных данных, дающих представление о границах их изменения в

эксплуатации. Проведенный в исследовании [8] анализ доказывает реально существующую погрешность в определении ВМТ до ±2º п.к.в.

3.2. Результат выполненного исследования влияния основных факторов на качество анализа тепловыделения в дизеле по индикаторным диаграммам

Необходимо ответить на вопрос: сколь существенное искажение характеристик тепловыделения имеет место при смещении положения ВМТ на ИД в указанных пределах?

Нами выполнено соответствующее исследование, некоторые результаты которого представлены на рисунке 3.7.

Использована ИД, полученная на дизеле 6ЧН30/38 (2Д42) при его работе на режиме с $g_ц$=0,0014 кг/цикл при частоте вращения 715 мин$^{-1}$. Кривые тепловыделения, изображенные сплошной линией, относятся к ИД, на которой положение ВМТ указано достаточно точно. Обратим внимание на то, что в этом случае линия идентификации $x=f(\varphi)$ к моменту окончания горения приближается к единице, что свидетельствует о достоверности результата.

При расчёте двух других вариантов положение ВМТ на диаграмме искусственно смещено на – 2,0° и +2,0° (градуса поворота коленчатого вала) относительно исходного варианта.

Из рисунка видно насколько значительно различаются интегральные характеристики тепловыделения. При смещении ИД на –2° среднее индикаторное давление p_i составляет всего 82% исходного варианта; при смещении ИД на +2° p_i увеличивается на 24%. Соответственно указанным значениям изменяется рассчитанная по ИД индикаторная мощность двигателя.

Также значительно различаются дифференциальные характеристики тепловыделения. При смещении ИД на –2° максимум относительной скорости тепловыделения $dx/d\varphi$ снижается с 0,033 до 0,029 и изменяется его положение с –7° до –10°; при смещении ИД на +2° максимум $dx/d\varphi$ увеличивается с 0,033 до 0,039 и изменяется его положение с – 7° до –5°. Указанные отклонения от

исходного варианта свидетельствуют о значительной ошибке в оценке жёсткости процесса сгорания. К тому же, при смещении ИД на –2° скорость тепловыделения $dx/d\varphi$ оказалась нулевой уже при 8° после ВМТ, что, разумеется, не соответствует действительности.

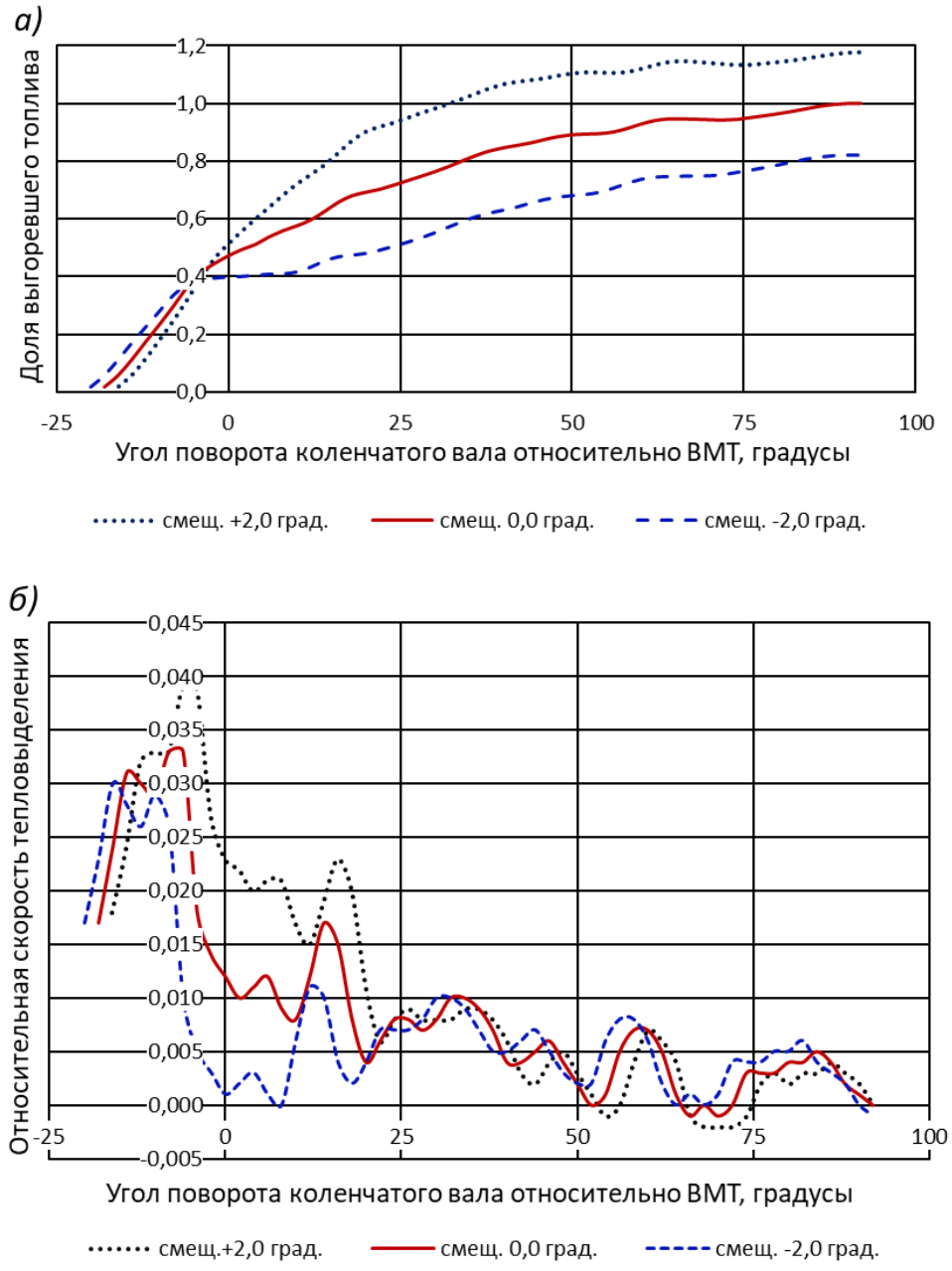

Рисунок 3.7 – Характеристики тепловыделения при сгорании топлива в дизеле: *а* – интегральная характеристика; *б* – дифференциальная характеристика

Итак, нами доказано, что ошибка в определении ВМТ на индикаторной диаграмме весьма существенно влияет на качество анализа тепловыделения при сгорании топлива в дизельном двигателе.

3.3. Выводы по разделу

Наши исследования показали, что погрешность в определении положения верхней мёртвой точки (ВМТ) на индикаторной диаграмме (ИД) оказывает весьма значительное влияние на качество анализа процесса тепловыделения при сгорании топлива в дизеле, а также на точность расчёта показателя политропы сжатия, выполняемых по диаграмме.

Авторы опубликованных работ оценивают реально существующую погрешность в определении ВМТ на ИД в пределах ±2,0 градуса поворота коленчатого вала [8].

Датчик отметчика ВМТ, сигнал которого подаётся на ИД, как правило устанавливают на маховике коленчатого вала двигателя в положении, соответствующем мёртвой точке поршня. Фиксирование указанного положения с достаточно высокой точностью представляет собой весьма трудную задачу. Дополнительные трудности вызывают искажения, вносимые измерительной системой при передаче сигнала датчика и регистрации его сигнала. Эти обстоятельства и вызывают отмеченную выше значительную погрешность в определении ВМТ на ИД.

На основании изученного нами принято решение разработать способ, снижения выявленной погрешности в определении ВМТ на ИД.

4. УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВМТ НА ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЕ

Предложенное принципиальное решение, обеспечивающее снижение погрешности в определении ВМТ на ИД, заключается в следующем.

Вместо формирования сигнала, соответствующего ВМТ поршня, формируется пара сигналов, соответствующих некоторому промежуточному положению поршня до ВМТ и посла ВМТ. Положение ВМТ на ИД определяется путём «программного» деления пополам отрезка между указанными сигналами.

Преимущество предлагаемого способа иллюстрировано рисунком 4.1.

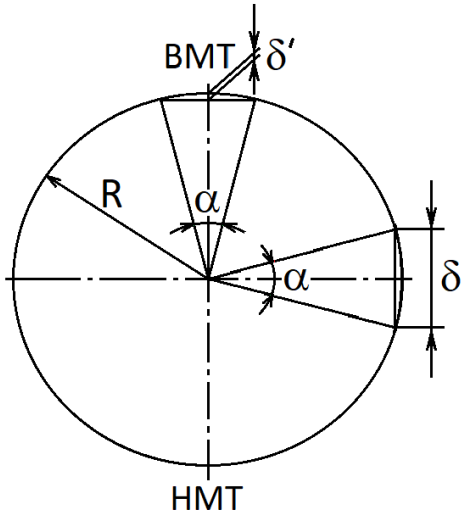

Рисунок 4.1 – К обоснованию способа определения ВМТ на индикаторной диаграмме

Для обеспечения угловой погрешности в определении ВМТ на ИД $\pm(\alpha/2)$ абсолютная погрешность линейного положения поршня в окрестности его ВМТ должна быть в пределах δ' (высота сегмента круга в секторе углового размера α) В случае регистрации текущего положения поршня, например, при 90 градусов до или после его ВМТ угловой погрешности в определении ВМТ на ИД $\pm(\alpha/2)$ может быть обеспечена при абсолютной погрешности δ (длина хорды окружности в секторе углового размера α). Наглядно показано, что

допустимая погрешность измерения текущего положения поршня при его значительном отклонении от мёртвых точек многократно выше, чем при его положении в окрестности ВМТ. Реализация предложенного принципа обеспечивает возможность существенного повышения точности определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме и, соответственно, повышения качества анализа внутрицилиндровых процессов в двигателе.

5. Для количественной оценки предложенного способа определения положения ВМТ на ИД по регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала выполнен соответствующий расчёт.

Допустим, необходимо рассчитать допустимую погрешность в измерении положения поршня, при которой обеспечена погрешность определения углового положения ВМТ в пределах ±2,0 °п.к.в.

При традиционном способе определения ВМТ (по результатам измерений перемещения поршня в окрестности его ВМТ, точнее в фиксации его положения при «нулевом перемещении») допустимая погрешность рассчитана по формуле высоты сегмента круга в секторе углового размера α = 4 °п.к.в.):

$$\delta' = R\left(1 - \mathrm{COS}\frac{\alpha}{2}\right),$$

где R – радиус окружности на рисунке 1 (радиус кривошипа в двигателе).

Расчёт для предложенного способа определения ВМТ (по регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала) выполнен применительно к угловому положению кривошипно-шатунного механизма 90 °п.к.в. до ВМТ (или 90 °п.к.в. после ВМТ) по формуле длины хорды окружности в секторе углового размера α = 4 °п.к.в.):

$$\delta = 2R \cdot \mathrm{Sin}\frac{\alpha}{2}.$$

В результате расчётов оказалось, что для исследованного случая (для обеспечения возможности определения положения ВМТ на ИД с погрешностью ±2,0 °п.к.в.) отношение допустимых погрешностей измерений положения поршня составило

$$\frac{\delta'}{\delta} \approx 115.$$

Выполненный расчёт позволяет сделать вывод о том, что предложенный способ определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме на основе регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала обладает явным преимуществом по сравнению с традиционным способом.

5. Для уменьшение погрешности определения ВМТ на ИД наряду с применением решения методического характера (а именно, описанного выше способа определения ВМТ посредством регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала) необходимо применить некоторые современные инструментальные средства. К таким средствам относятся, например, вихретоковые измерители и энкодеры.

4.1. Обоснование выбора измерительного преобразователя

Как было изложено выше, для реализации предложенного в данной работе способа определения ВМТ посредством регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала необходимо решить вопрос о применении некоторой измерительной систем. Ввиду того, что применение указанного способа направлено на повышение точности определения ВМТ, главное требование, предъявляемое к этим измерительным системам, заключается, соответственно, в обеспечении высокой точности измерений. Широко применяющиеся в практике отметчики ВМТ, основанные на использовании

индуктивных датчиков, обладают недостаточно высокой точностью преобразования.

Одним их возможных альтернативных вариантов может быть современный вихретоковый преобразователь

Вихретоковый преобразователь схематично изображен на рисунке 4.2.

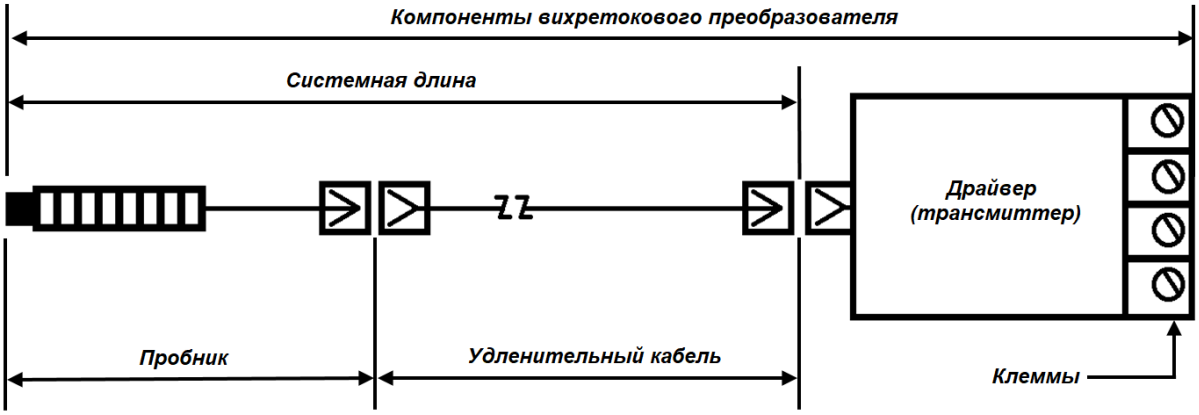

Рисунок 4.2 – Структурная схема вихретокового преобразователя

Вихретоковый преобразователь (eddy current probe) состоит из бесконтактного вихревого пробника, удлинительного кабеля и электронного блока. Электронный блок вырабатывает сигнал возбуждения пробника и осуществляет выделение информативного параметра. Выходным сигналом является электрический сигнал, прямо пропорциональный расстоянию от торца вихревого пробника до контролируемого объекта [45].

Конструктивная схема преобразователя иллюстрирована рисунком 4.3.

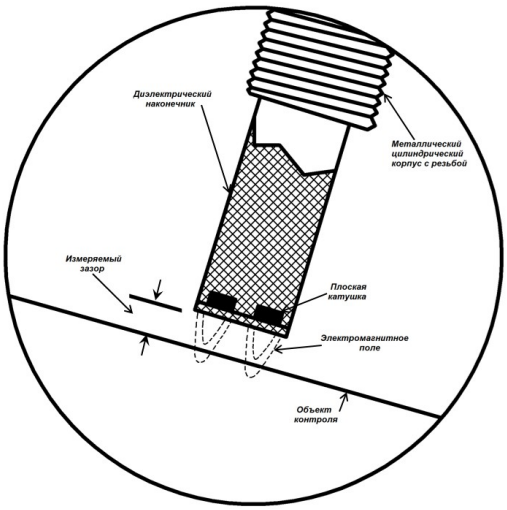

Рисунок 4.3 – Конструктивная схема вихретокового преобразователя

Поясним принцип работы вихретокового преобразователя. В торце диэлектрического наконечника вихревого пробника находится катушка индуктивности. Электронный блок обеспечивает возбуждение электромагнитных колебаний в катушке, в результате чего возникает электромагнитное поле, которое взаимодействует с материалом контролируемого объекта.

Если материал обладает электропроводностью, на его поверхности наводятся вихревые токи, которые, в свою очередь, изменяют параметры катушки – ее активное и индуктивное сопротивление. Параметры изменяются при изменении зазора между контролируемым объектом и торцом датчика. Электронный блок преобразует эти изменения в электрический сигнал, осуществляет его линеаризацию и масштабирование.

Вихретоковые преобразователи обладают хорошим частотным откликом (реакцией на изменение расстояния между торцом пробника и объектом контроля). Частотный диапазон может составлять 0 – 10 000 Гц. При этом неравномерность амплитудно-частотной характеристики не превышает 0,5 дБ [45].

Входным параметром вихретокового преобразователя является размер зазора между торцом пробника и электропроводящим объектом. Измеряемый зазор составляет несколько миллиметров и зависит от диаметра катушки, заключенной в торце диэлектрического наконечника. Выходной сигнал, пропорциональный измеряемому зазору, может быть представлен в виде напряжения, тока или в цифровом формате. Вид сигнала определяется типом системы наблюдения.

Для электронных блоков с выходным сигналом в виде напряжения указывают чувствительность (коэффициент преобразования зазора в электрический сигнал), которая в большинстве случаев весьма значительна: она составляет 8 мВ/мкм [45].

Вихретоковый метод обладает исключительной точностью, поскольку не только не имеет нижнего предела по частоте, но и не требует математической обработки результатов измерения ввиду прямого соответствия выходного сигнала текущему смещению поверхности объекта контроля (измерительного буртика, сигнального штифта) относительно поверхности датчика.

Вихретоковые преобразователи применимы для измерения [45]:

- эксцентриситета валов;
- толщины диэлектрических покрытий на металлическом основании;
- относительного температурного расширения механизмов;
- износа трущихся деталей и механизмов;
- слоя металлизации на диэлектрическом основании и др.

Сведения о выбранном вихретоковом преобразователе приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные характеристики выбранного вихретокового преобразователя

Тип электронного блока	Модель	Диаметр катушки пробника, (мм)	Диапазон измерения, (мм)	Чувствительность, выходной диапазон, (мВ/мкм)	Системная длина, (м)	Измеряемая величина
драйвер	АР2000А*2	5	0,3 – 2,3	-8	5/9	Вибрация, смещение

Для решения поставленной в работе задачи возможно применение и других современных инструментальных средств. К таким средствам относятся, например, энкодеры. Однако для решения вопроса о целесообразности их использования предстоит выполнить дополнительные исследования.

4.2. Операции при определения ВМТ на индикаторной диаграмме с использованием вихретокового преобразователя

Рассмотрим методику определения ВМТ на основе предложенного принципа регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала. Реализации методики

посвящён рисунок 4.4. Для осуществления указанной регистрации двигатель должен быть предварительно оборудован некоторыми элементами измерительной системы, которые показаны на рисунке 4.4 *а*.

а) **б)**

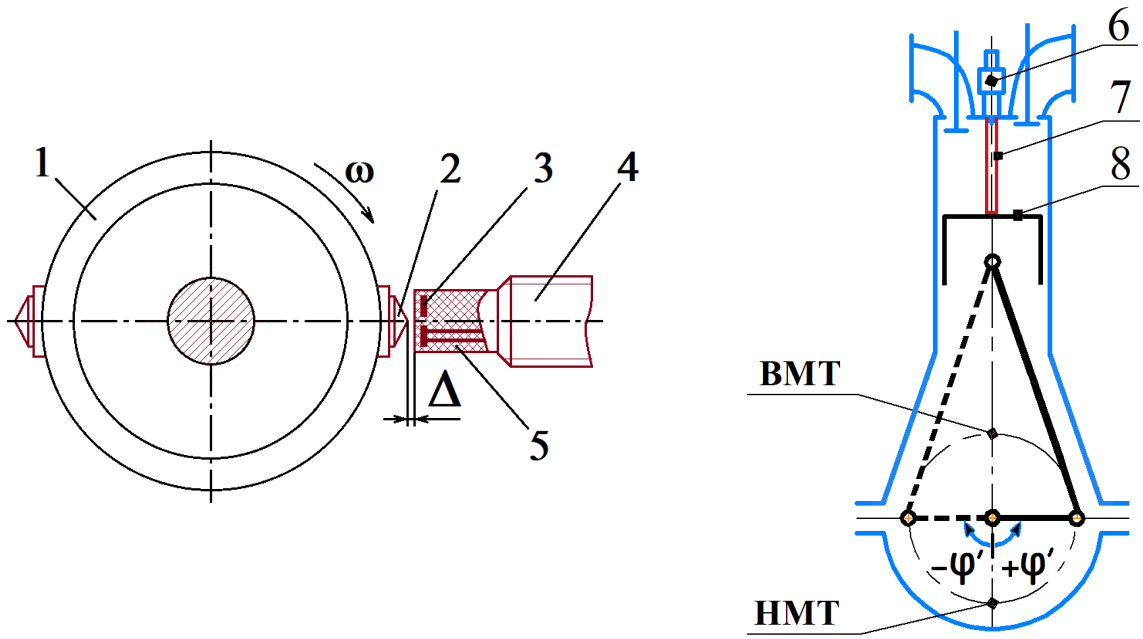

Рисунок 4.4 – К методике регистрации ВМТ поршня:
а – расположение элементов измерительной системы для определения положения ВМТ; *б* – способ определение симметричных положений коленчатого вала относительно ВМТ поршня; *1* – маховик коленчатого вала; *2* – сигнальный буртик; *3* – плоская катушка индуктивности; *4* – корпус вихретокового преобразователя; *5* – диэлектрический наполнитель; *6* – корпус форсунки; *7* – штанга-шаблон (закреплена в корпусе форсунки); *8* – поршень

На маховике коленчатого вала *1* закреплены два сигнальных буртика *2*. (с возможностью изменения их положения в окружном направлении по цилиндрической поверхности маховика). Вихретоковый преобразователь, содержащий корпус *4*, плоскую катушку *3* и диэлектрический наполнитель *5*, закреплен неподвижно на остове двигателя с образованием измеряемого зазора Δ.

Буртики *2* размещены на маховике *1* так, что при их движении мимо вихретокового преобразователя в измерительной системе вырабатывается

пара сигналов, симметрично расположенных относительно ВМТ поршня на расстояниях $+\varphi$ и $-\varphi$, °п.к.в. На рисунке представлен частный случай, в котором $\varphi = \pm 90$ °п.к.в.

Очевидно, что необходимо решить вопрос о размещении буртиков *2* на маховике *1* так, чтобы при работе двигателя (при измерениях) они давали пару сигналов, симметрично расположенных относительно ВМТ поршня. Для этого может быть применён способ, иллюстрированный рисунком 4.4 *б*.

Способ заключается в следующем. В корпусе форсунки *6* закрепляют неподвижно штангу-шаблон *7*. Вручную проворачивают коленчатый вал двигателя в направлении от НМТ на угол $+\varphi'$ до упора поршня *8* в штангу-шаблон. Закрепляют на маховике двигателя первый (из двух) сигнальный буртик *2* (см. рисунок 4.4 *а*) на оси вихретокового преобразователя *4*. Далее проворачивают коленчатый вал в обратном направлении от НМТ на угол $-\varphi'$ также до упора поршня в штангу-шаблон. Закрепляют на маховике двигателя второй сигнальный буртик на оси вихретокового преобразователя *4*.

Заметим, что на рисунке 4.4 показан частный случай, в котором $\pm\varphi' = |90|$°п.к.в. Указанный угол следует принять несколько меньшим 90° для того, чтобы на осциллограмме работы измерительной системы можно было проще выделить ту пару сигналов, между которыми размещается искомая ВМТ поршня.

4.3. Выводы по разделу

Наряду с предложенным в данной работе методическим принципом обеспечения повышенной точности определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме двигателя, рассмотрен способ реализации указанного принципа.

Для решения задачи предложено использовать измерительную систему, построенную на основе вихретокового преобразователя.

Способ определения положения ВМТ заключается в настраивании измерительной системы при двух фиксированных положениях кривошипно-шатунного механизма двигателя, соответствующих одному положению поршня относительно крышки цилиндра до и после ВМТ, в регистрации двух сигналов, соответствующих указанным положениям, и делении пополам отрезка осциллограммы между этими двумя сигналами.

5. МЕТОДИКА АНАЛИЗА ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ПОЛИТРОПЫ СЖАТИЯ

Методика может быть использована для определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и позволит повысить достоверность диагностирования деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя внутреннего сгорания за счет определения конкретных наиболее характерных неисправностей.

Суть методики заключается в оценке технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания. С помощью обработки индикаторной диаграммы, разбитой на участки, определяют изменение значений показателя политропы сжатия, по углу поворота коленчатого вала. Далее сравнивают их с эталонными значениями, по отклонениям оценивают техническое состояние цилиндропоршневой группы, а именно, степень изношенности элементов ЦПГ, которая связана с интенсивностью утечек заряда цилиндра через неплотности.

Назначение процесса сжатия в дизеле:

– повышение температуры в цилиндре для обеспечения самовоспламенения топлива;

– получение высокого термического КПД цикла за счет высокого уровня температур подвода теплоты в цикл при последующем сгорании топлива.

Процесс сжатия сопровождается следующими явлениями [44]:

- изменением площади поверхности контакта между воздушным зарядом цилиндра и его стенками по ходу поршня;

- переменным по направлению и интенсивности теплообменом между зарядом и стенками цилиндра;

- утечками заряда через «неплотности» полости цилиндра;

- испарением части топлива, впрыснутого в цилиндр до ВМТ; испарение сопровождается отбором от воздушного заряда теплоты парообразования.

Сжатие в дизеле можно рассматривать как политропный процесс с переменным показателем политропы. В расчетах для упрощения показатель политропы условно принимают как среднюю постоянную величину из условия равенства работы сжатия при истинном и условном его значениях.

По опытным данным, средний показатель потитропы сжатия дизелей имеет следующие пределы:

- МОД и СОД с охлаждаемыми поршнями 1,34 ...1,41;
- ВОД с неохлаждаемыми поршнями 1,38 ...1,42.

Наибольшее влияние на величину показателя политропы сжатия оказывают:

- размер цилиндра,
- степень сжатия,
- конструкция камеры сгорания,
- интенсивность охлаждения поршня,
- отсутствие или наличие наддува,
- температура охлаждающей воды,
- частота вращения коленчатого вала,
- герметичность полости цилиндра.

При разработке методики анализа индикаторной диаграммы по показателю политропы сжатия необходимо учитывать отмеченные факторы, влияющие на указанный показатель.

5.1. Методика расчета показателя политропы сжатия в дизельном двигателе по индикаторной диаграмме

1. Для расчета показателя политропы сжатия используют уравнение политропы

$$P \cdot V^n = const,$$

где n – показатель политропы

2. Для любых двух точек политропы, показанных на рисунке 5.1, это уравнение можно записать так:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

(5.1)

На рисунке 5.1 изображен элементарный участок политропы.

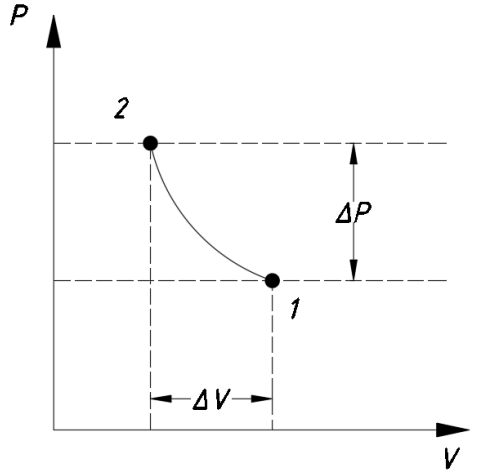

Рисунок 5.1 – Точки политропы сжатия в координатах *P-V*

3. Логарифмируя уравнения политропы (5.1), получаем

$$n = \frac{lg\, P_1 - lg\, P_2}{lg\, V_2 - lg\, V_1} \qquad (5.2)$$

4. Если нанести кривую процесса сжатия на логарифмическую *(P-V)* – диаграмму, представленную на рисунке 5.2, получим “спрямленную” линию процесса:

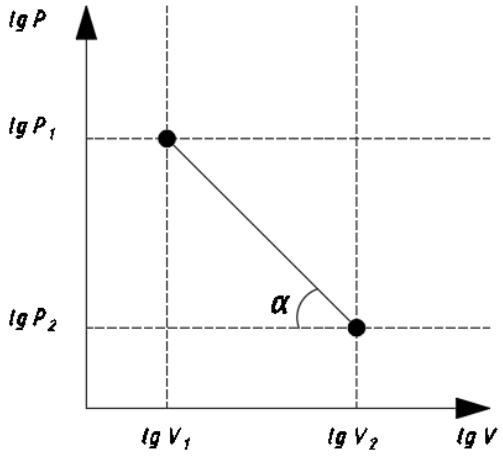

Рисунок 5.2 – Отображение индикаторного процесса сжатия в логарифмических координатах

5. Тангенс угла наклона линии (*tg α*) на рисунке 5.2 представляет собой показатель политропы «*n*».

5.2. Методика расчёта текущего объёма цилиндра дизеля

1. Объём камеры сжатия

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_s + V_c}{V_c} = \frac{V_s}{V_c} + 1, \quad (5.3)$$

где ε – геометрическая степень сжатия; V_a – полный объём цилиндра; V_c – объём камеры сжатия; V_s – объём, описываемый поршнем (рабочий объём).

Из формулы (5.3) следует, что

$$V_c = \frac{V_s}{\varepsilon - 1}.$$

2. Текущий объём цилиндра

$$V_\varphi = V_c + F_П S_\varphi = V_c + F_П \frac{S}{2}\left[(1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\varphi)\right], \quad (5.4)$$

где $F_п$ – площадь поршня ($F_П = \pi D^2 / 4$, где D – диаметр цилиндра); S – ход поршня; λ – постоянная КШМ ($\lambda = R / L$, где R – радиус кривошипа; $R = S/2$); φ – текущий угол поворота коленчатого вала.

5.3. Результаты выполненного исследования показателя политропы сжатия по индикаторной диаграмме

Разработанная нами методика диагностирования была применена к судовому среднеоборотному дизельному двигателю 40ДМ (12 ДН 23/30). Индикаторные диаграммы были сняты стробоскопическим электропневматическим индикатором типа МАИ-2А, установленном на учебно-экспериментальных стендах лаборатории ДВС СПбГМТУ. Полученные результаты были переведены в цифровой вид с помощью современных средств сканирования и обработаны в КОМПАС – 3D v19, результаты этой работы приведены на рисунке 5.3.

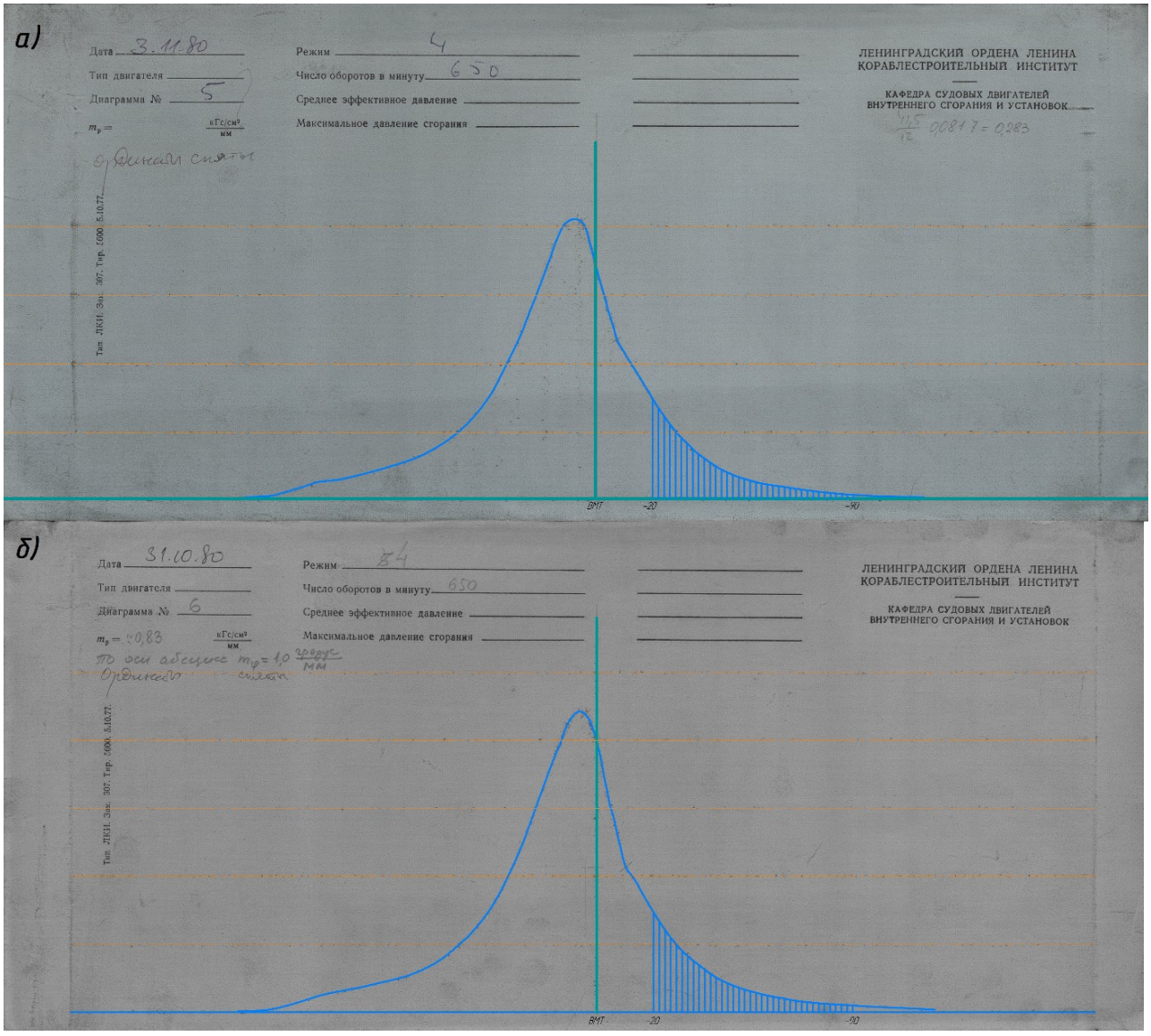

Рисунок 5.3 – Индикаторные диаграммы, полученные на электропневматическом индикаторе типа МАИ-2А

Для дальнейшего изучения нами был выбран участок сжатия, ординаты линии сжатия (от -20º до -90º) на индикаторной диаграмме выстроены с шагом 2º.

Далее на основании сформулированных выше методик нами произведен расчет постоянных величин двигателя.

Исходные данные:

Ход поршня S=0,3 м;

Диаметр поршня D=0,23 м;

Геометрическая степень сжатия ε=15,8.

Расчетные постоянные:

Площадь поршня $F_П = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}23^2}{4} = 0{,}04153 \ \ м^3$;

Объем описываемый поршнем $V_s = F_П S = 0{,}453 \cdot 0{,}3 = 0{,}01246 \ \ м^3$;

Объем камеры сжатия $V_c = \frac{V_s}{\varepsilon - 1} = \frac{0{,}01246}{15{,}83 - 1} = 8{,}4 \cdot 10^{-4} \ \ м^3$;

Постоянная КШМ $\lambda = \frac{R}{L} = \frac{0{,}15}{0{,}61} = 0{,}246$.

В программе для работы с электронными таблицами «Microsoft Excel» рассчитан показатель политропы сжатия “*n*”. Результаты расчёта и обработки индикаторной диаграммы представленной на рисунке 5.3 а, приведены в таблице 5.1, по ним построены кривые $lg\,P = f(lg\,V)$ рисунок 5.4 и график изменения показателя политропы рисунок 5.6 с отображением влияния возможной погрешности в определении ВМТ.

Таблица 5.1 – Расчет показателя политропы на участке сжатия

Угол ПКВ, *гр. п.к.в.*	Ордината, *мм*	*p, МПа*	*Lg P*	*Lg V*	*n*
-90	3,0027	0,2492	-0,6034	-2,1059	1,4100
-88	3,1248	0,2594	-0,5861	-2,1182	1,4096
-86	3,2565	0,2703	-0,5682	-2,1309	1,4091
-84	3,3989	0,2821	-0,5496	-2,1441	1,4089
-82	3,5529	0,2949	-0,5303	-2,1577	1,4089
-80	3,7199	0,3088	-0,5104	-2,1719	1,4082
-78	3,9010	0,3238	-0,4897	-2,1866	1,4078
-76	4,0978	0,3401	-0,4684	-2,2017	1,4075
-74	4,3120	0,3579	-0,4462	-2,2175	1,4064
-72	4,5453	0,3773	-0,4234	-2,2337	1,4061
-70	4,8000	0,3984	-0,3997	-2,2506	1,4055
-68	5,0785	0,4215	-0,3752	-2,2680	1,4041
-66	5,3833	0,4468	-0,3499	-2,2860	1,4036
-64	5,7178	0,4746	-0,3237	-2,3047	1,3991
-62	6,0843	0,5050	-0,2967	-2,3240	1,3962
-60	6,4872	0,5384	-0,2689	-2,3439	1,3918
-58	6,9302	0,5752	-0,2402	-2,3645	1,3896
-56	7,4191	0,6158	-0,2106	-2,3858	1,3808
-54	7,9568	0,6604	-0,1802	-2,4078	1,3761
-52	8,5510	0,7097	-0,1489	-2,4306	1,3754
-50	9,2105	0,7645	-0,1166	-2,4540	1,3701
-48	9,9415	0,8251	-0,0835	-2,4782	1,3698
-46	10,7558	0,8927	-0,0493	-2,5032	1,3611
-44	11,6586	0,9677	-0,0143	-2,5289	1,3569
-42	12,6640	1,0511	0,0216	-2,5554	1,3559

-40	13,7874	1,1444	0,0586	-2,5826	1,3509
-38	15,0400	1,2483	0,0963	-2,6106	1,3497

Продолжение таблицы 5.1

-36	16,4412	1,3646	0,1350	-2,6392	1,3412
-34	17,9996	1,4940	0,1743	-2,6686	1,3406
-32	19,7417	1,6386	0,2145	-2,6985	1,3329
-30	21,6761	1,7991	0,2551	-2,7289	1,3320
-28	23,8290	1,9778	0,2962	-2,7598	1,3314
-26	26,2172	2,1760	0,3377	-2,7910	1,3310
-24	28,8531	2,3948	0,3793	-2,8222	1,3309
-22	31,7423	2,6346	0,4207	-2,8534	1,3304
-20	34,8781	2,8949	0,4616	-2,8841	1,3303

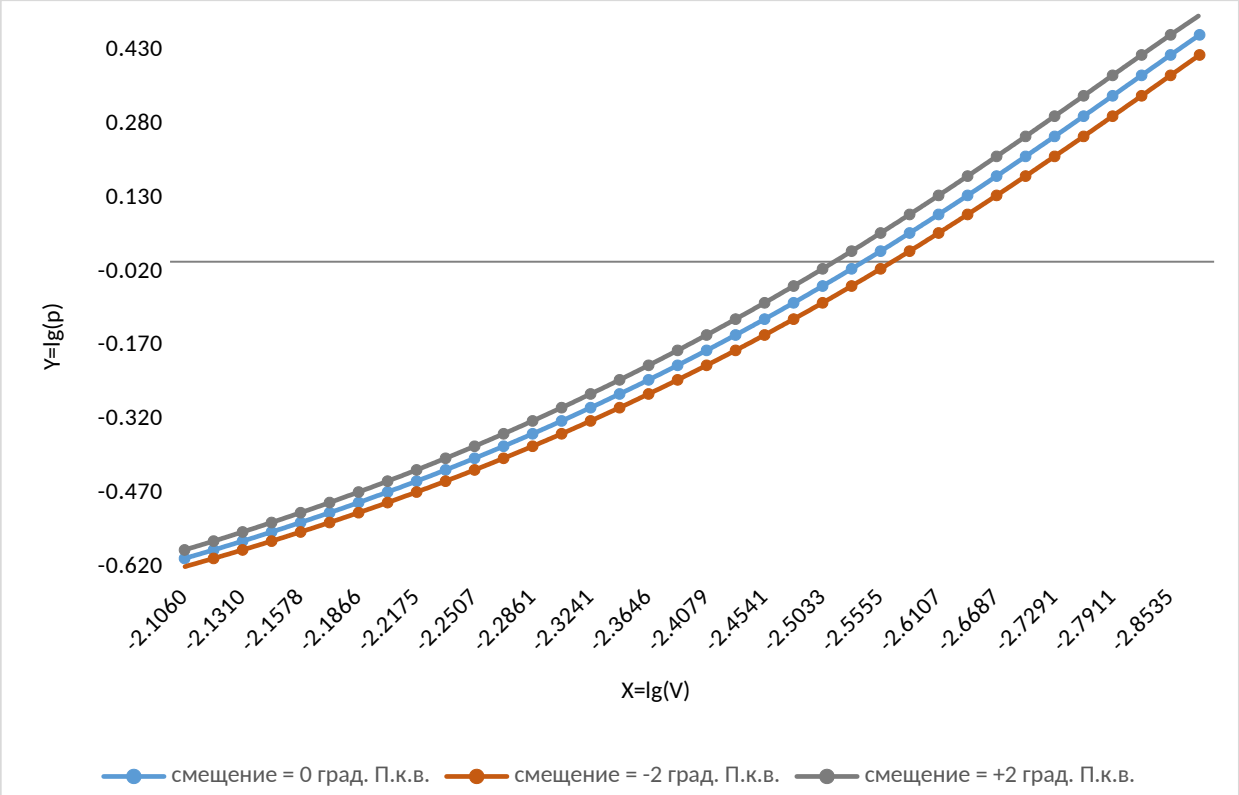

Рисунок 5.4 – Отображение индикаторного процесса сжатия на судовом дизеле 40ДМ в логарифмических координатах

Процесс сжатия в логарифмических координатах отображается почти прямой линией. Используя метод наименьших квадратов (МНК), аппроксимируя логарифмические кривые процесса сжатия с помощью полинома первой и второй степени рисунок 5.5 где видно, что квадрат множественного коэффициента корреляции стремиться к единице (R^2>0.98 рисунок 5.5 а и R^2=1 рисунок 5.5 б) а формула логарифмической кривой $y=0{,}0004x^2+0{,}015x-0{,}6$. Полученный коэффициент корреляции указывает на то

что данные в результате обработки индикаторной диаграммы имеют минимальную погрешность. Однако проведенный эксперимент не подтверждает выводов, сделанных в статье [32].

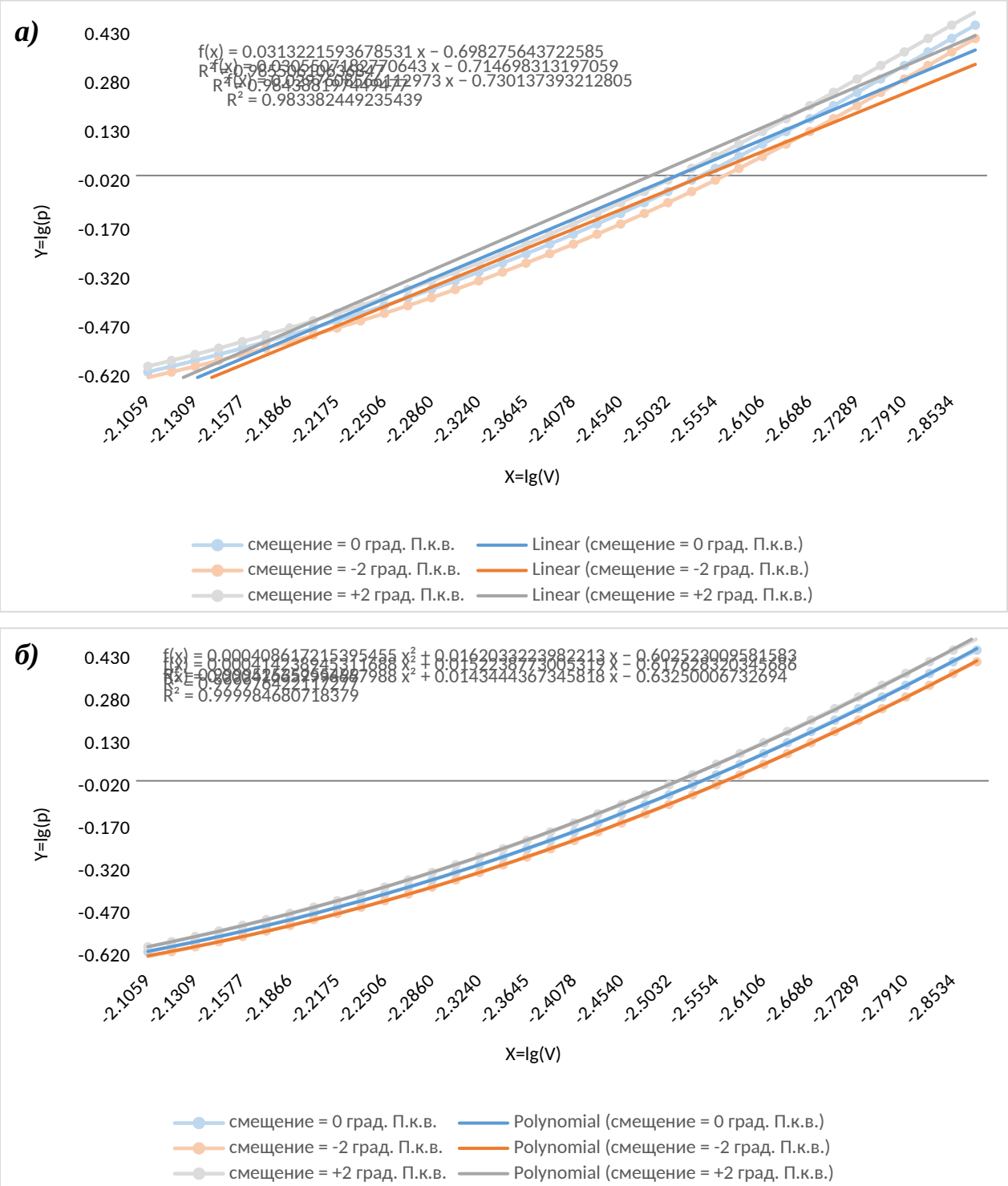

Рисунок 5.5 – Аппроксимация логарифмических кривых процесса сжатия:

а — полином первой степени; *б* — полином второй степени

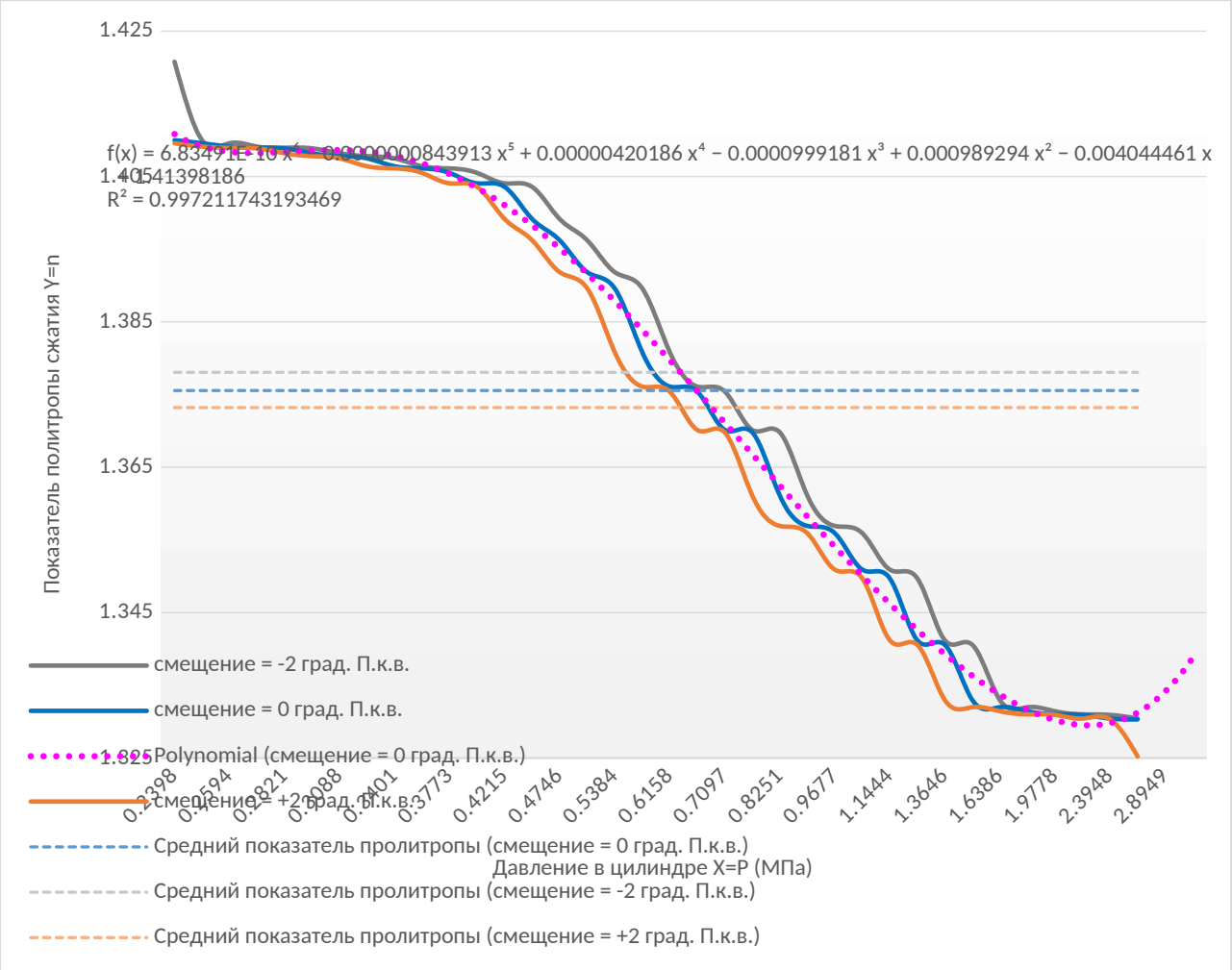

Рисунок 5.6 – Отображение изменения показателя политропы сжатия.

Результаты расчёта и обработки индикаторной диаграммы представленной на рисунке 5.3 б, приведены в таблице 5.2, график кривых $lg\,P = f(lg\,V)$ рисунок 5.7, а график изменения показателя политропы рисунок 5.8.

Таблица 5.2 – Расчет показателя политропы на участке сжатия

Угол ПКВ, *гр. п.к.в.*	Ордината, *мм*	*p, МПа*	*Lg P*	*Lg V*	*n*
-90	3,0349	0,2519	-0,5988	-2,1059	1,4104
-88	3,1582	0,2621	-0,5815	-2,1182	1,4100
-86	3,2914	0,2732	-0,5635	-2,1309	1,4099
-84	3,4354	0,2851	-0,5449	-2,1441	1,4096
-82	3,5912	0,2981	-0,5257	-2,1577	1,4091
-80	3,7600	0,3121	-0,5057	-2,1719	1,4088
-78	3,9431	0,3273	-0,4851	-2,1866	1,4066
-76	4,1419	0,3438	-0,4637	-2,2017	1,4040
-74	4,3578	0,3617	-0,4417	-2,2175	1,3971
-72	4,5920	0,3811	-0,4189	-2,2337	1,3968

-70	4,8476	0,4024	-0,3954	-2,2506	1,3959

Продолжение таблицы 5.2

-68	5,1269	0,4255	-0,3711	-2,2680	1,3928
-66	5,4321	0,4509	-0,3460	-2,2860	1,3906
-64	5,7663	0,4786	-0,3200	-2,3047	1,3885
-62	6,1331	0,5090	-0,2932	-2,3240	1,3858
-60	6,5360	0,5425	-0,2656	-2,3439	1,3830
-58	6,9795	0,5793	-0,2371	-2,3645	1,3792
-56	7,4680	0,6198	-0,2077	-2,3858	1,3701
-54	8,0049	0,6644	-0,1776	-2,4078	1,3658
-52	8,5981	0,7136	-0,1465	-2,4306	1,3634
-50	9,2553	0,7682	-0,1145	-2,4540	1,3618
-48	9,9851	0,8288	-0,0816	-2,4782	1,3597
-46	10,7967	0,8961	-0,0476	-2,5032	1,3541
-44	11,6981	0,9709	-0,0128	-2,5289	1,3522
-42	12,7033	1,0544	0,0230	-2,5554	1,3506
-40	13,8256	1,1475	0,0598	-2,5826	1,3502
-38	15,0811	1,2517	0,0975	-2,6106	1,3499
-36	16,4862	1,3684	0,1362	-2,6392	1,3489
-34	18,0584	1,4988	0,1758	-2,6686	1,3483
-32	19,8168	1,6448	0,2161	-2,6985	1,3474
-30	21,7806	1,8078	0,2571	-2,7289	1,3432
-28	23,9630	1,9889	0,2986	-2,7598	1,3404
-26	26,3816	2,1897	0,3404	-2,7910	1,3385
-24	29,0497	2,4111	0,3822	-2,8222	1,3363
-22	31,9709	2,6536	0,4238	-2,8534	1,3322
-20	35,1336	2,9161	0,4648	-2,8841	1,3300

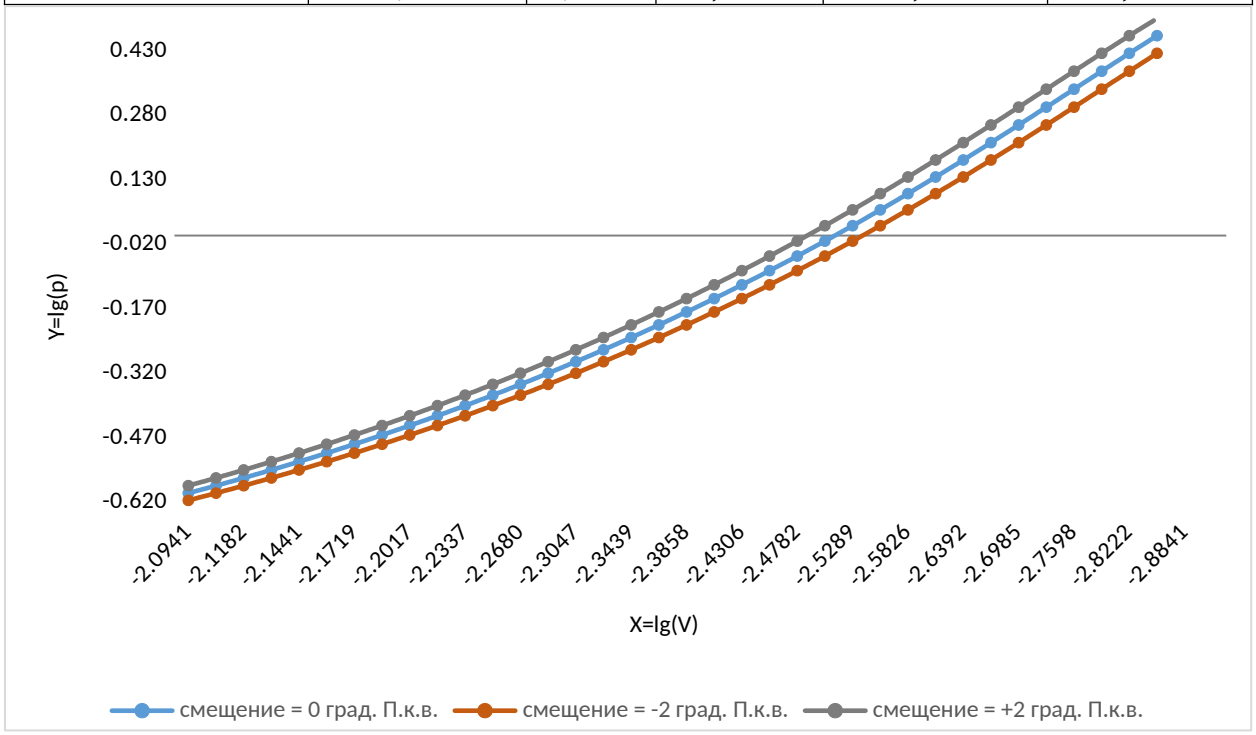

Рисунок 5.6 – Отображение индикаторного процесса сжатия на судовом дизеле 40ДМ в логарифмических координатах

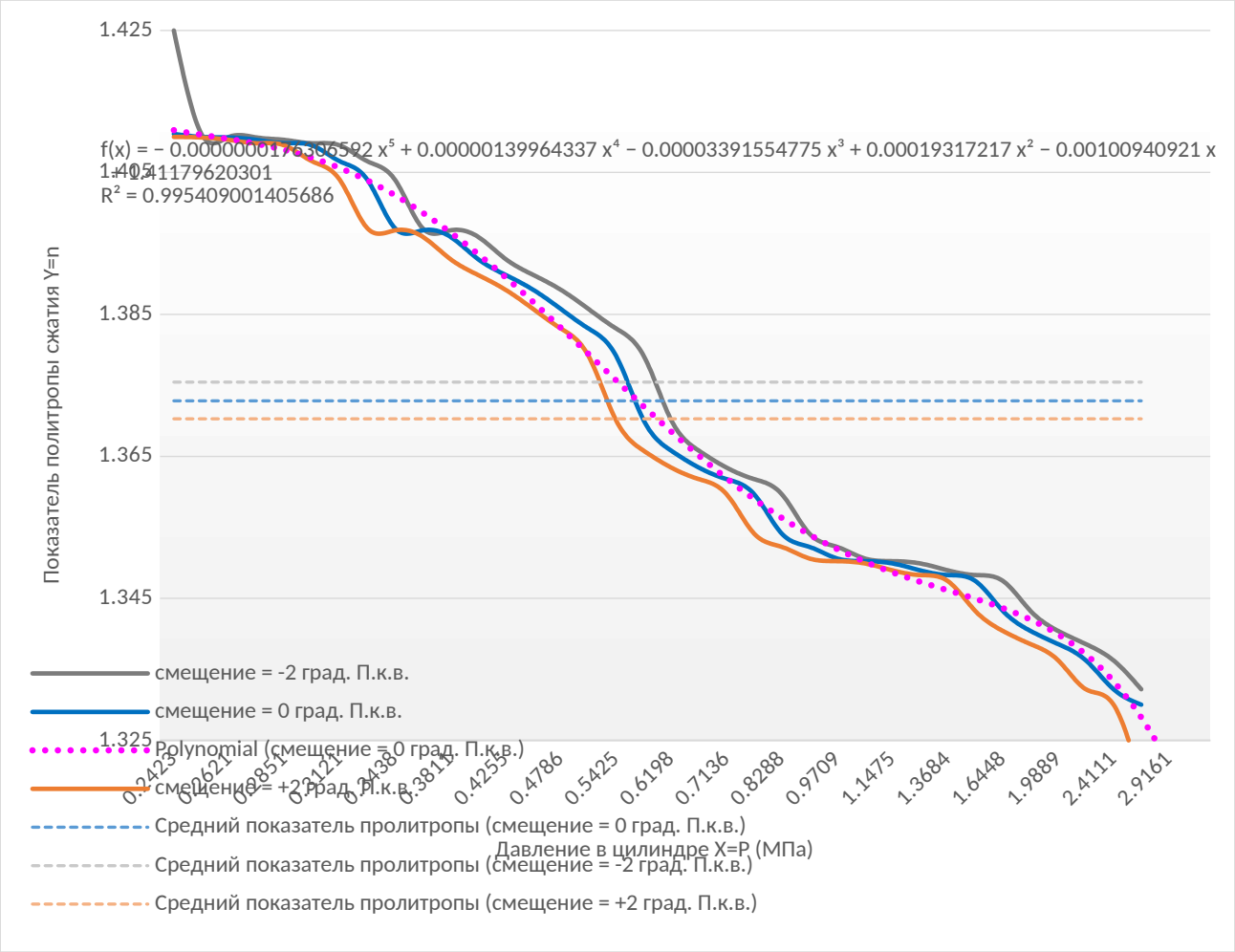

Рисунок 5.7 – Отображение изменения показателя политропы сжатия.

В результате проведенного анализа индикаторных диаграмм можно сделать вывод от том показатель политропы сжатия судового среднеоборотного дизельного двигателя 40ДМ (12 ДН 23/30) находится в допустимых пределах, следовательно, герметичность полости рабочего цилиндра двигателя не нарушена.

5.4. Выводы по разделу

В результате проделанной работы нами сформирована рабочая методика анализа индикаторной диаграммы судового дизеля по показателю политропы сжатия которая заключается в обработке полученной индикаторной диаграммы, разбитой на участки и определении изменения значений

показателя политропы сжатия, по углу поворота коленчатого вала. Сравнении показателя политропы с эталонными значениями и оценке технического состояния цилиндропоршневой группы по полученным отклонениям.

Проведенное нами исследование подтверждают значения среднего показателя политропы сжатия дизельного двигателя лежащего, в пределах от 1.34 до 1.42, а также представляют схема анализа индикаторной диаграммы для диагностирования степени изношенности цилиндропоршневой группы ДВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о том, что ввиду сложности создания диагностической математической модели дизеля при увеличенном количестве структурных и диагностических параметров целесообразно разработать и использовать модели частного характера. Важной для практики задачей является оценка герметичности полости рабочего цилиндра двигателя, которая, как было сказано выше, зависит от наличия зазоров в цилиндропоршневой группе и клапанах механизма газораспределения. Решение этой диагностической задачи позволит определить степень изношенности элементов цилиндропоршневой группы деталей, в частности, поршневых колец, тарелок и сёдел клапанов.

Одним из способов диагностирования степени изношенности цилиндропоршневой группы двигателя может оказаться сравнение показателя политропы сжатия по сравнению с её эталонным значением. Широкий круг диагностических задач может быть решен посредством анализа индикаторных диаграмм на тепловыделение при сгорании топлива. Для достоверного оценки значения показателя политропы сжатия по индикаторной диаграмме, параметров характеристик тепловыделения и других диагностических параметров необходимо обеспечить достаточно высокую точность определения положения верхней мёртвой точки на диаграмме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гаврилов В.В. Принципы построения иерархического комплекса систем диагностирования судового дизеля / Гаврилов В.В., Мащенко В.Ю. // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2016, Вып. 3(37). – С. 155–166.

2. Ракитин В.И., Первушин В.Е. Практическое руководство по методам вычислений с приложением программ для персональных компьютеров: Учеб. пособие. - М.: Высш. шк., 1998.-383 с : ил

3. Сомов В.А, Кузьменков О.П., Солдатов В.К. Электрические индикаторы для судовых двигателей внутреннего сгорания. Л.: Морской тр-т, 1958-218 с.

4. Малышев, В.С. Техническая диагностика двигателей методом косвенного индицирования [Текст] / В.С. Малышев, А.Ю; Корегин //Материалы юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию МГТУ (11-12 окт.).- Мурманск: МГТУ, 2000-С.40-43.

5. Малышев, В.С. Техническая диагностика двигателей методом косвенного индицирования [Текст] / В.С. Малышев, А.Ю. Корегин //Наука - производств у - 20001- №2-С. 16-17.

6. Тензодатчик, тензометрический датчик, тензорезистор и другая тензометрия [Электронный ресурс]: сайт дистрибьютера фирмы Kyowa в России. – Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. Japan, 2004- Режим доступа: http://www.kyowa.ru

7. Кирюхин, СН. Разработка метода синтеза индикаторных диаграмм по результатам виброметрирования двигателя [Текст]/ СН. Кирюхин, А.Н. Терехин, А.О. Шиманская и др. // Двигателестроение- 2008- №3 - С.21-24.

8. Лашко В. А. Метод идентификации технического состояния дизеля по результатам расчётно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации / В. А. Лашко, А.

Ю. Коньков, А. А. Маркелов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2007. — № 1. — С. 57–68.

9. Лашко В. А. Средства и методы диагностирования дизелей по индикаторной диаграмме рабочего процесса / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. — 147 с.

10. Маркелов А. А. Диагностирование дизеля по результатам расчётно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуа-тации: дис. … канд. техн. наук / А. А. Маркелов. — Хабаровск: ТГУ, 2007. — 175 с.

11. Коньков А. Ю. Диагностирование технического состояния тепловозного дизеля по индикаторной диаграмме на основе теории идентификации / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко // Двигателестроение. — 2009. — № 3. — С. 19–23.

12. Коньков А. Ю. Количественное оценивание износов и разрегулировок тепловозного дизеля по данным индицирования рабочих процессов / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко, В. Г. Кочерга // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. — 2009. — Т. 1. — № 5 (17). — С. 102–109.

13. Папуша, А.Н. Собственные колебания одно- и многослойных цилиндровых втулок ДВС [Текст] / А.Н. Папуша, А.И. Прыгунов // Двигателестроение 1990-№9.- С. 9-12

14. Прыгунов, А.И. Виброметрия и виброакустическая диагностика главных энергетических установок рыбопромысловых судов [Текст] / А.И. Прыгунов, А.А. Панкратов // Наука - производству- 2000- №2 - С.13 - 14.

15. Doyle, J. F. A wavelet deconvolution method for impact force identification [Текст]/ J. F. Doyle// Experimental Mechanics- 1997-V.37.-№4- P. 403-408.

16. Дремин, И.М. Вейвлеты и их-использование [Текст] / И.М: Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук - 2001.- Т. 171.- №5.- С.465-501.

17. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB [Текст] / Н.К. Смоленцев- М.:ДМК Пресс, 2005- 304 с.

18. Зельдович, Я.Б. Математическая теория горения и взрыва [Текст] / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе- М.: Наука, 1980-478 с.

19. Щелкин, К.И. Газодинамика горения [Текст] / К.И. Щелкин; Я.К. Трошин - М.: АН СССР, 1963- 256 с.

20. Главные компоненты временных рядов: Метод "Гусеница" [Текст]/ Под ред. Д.Л.Данилова и А.А.Жиглявского- СПб.: Пресском- 1997- 308 с.

21. Голяндина, Н.Э. Метод "Гусеница" - SSA: анализ временных, рядов [Текст]: Учеб. пособие/ Н.Э. Голяндина.-СПб.: Изд-во СПГУ-76 с.

22. Gorban, A. Principal Manifolds for Data Visualisation and Dimension Recluc-' tion [Текст] /A. Gorban, B. Kegl, D. Wunsch, A. Zinovyev (Eds.), LNCSE 58, Springer, Berlin - Heidelberg - New York, 2007.-340 pp.

23. Пат. 2078324 Российская Федерация, МПК G01M15/00. Способ определения технического состояния двигателя внутреннего сгорания и экспертная система для его осуществления [Текст] / Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Альт В.В. ; заявитель и патентообладатель Сибирский физико-технический институт аграрных проблем СО РАСХН; Сибирский институт механизации и электрификации СО РАСХН .- № 94037900/06 ; заявл. 22.09.1994 ; опубл. 27.04.1997.

24. Савченко, О.Ф. Измерительный технологический комплекс экспертизы технического состояния ДВС [Текст] / О.Ф. Савченко, И.П. Добролюбов, В.В. Альт // Двигателестроение- 1998- №2 - С.27-30.

25. Лашко В. А. Теория идентификации в приложении к задачам диагностики дизеля / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Международная науч.-техн. конф. «Двигатели-2008». Хаба-ровск, 15 – 19 сентября 2008 г.: Материалы конференции. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2008. — С. 264–269.

26. Гаврилов В. В. Теоретические основы и методика анализа процесса горения в судовом ДВС по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Мащенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 154–164.

27. Васильев-Южин Р. М. Совершенствование метода параметрического диагностирования судовых дизелей. Основные принципы / Р. М. Васильев-Южин, П. М. Гоцак, С. И. Золотарев // Двигателестроение. — 1988. — № 6. — С. 46–48.

28. Исаев, А.П. Анализ методов расчета показателей рабочего цикла судовых ДВС / А.П. Исаев, С.А. Каргин, К.К. Колосов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2009. – № 1. – С. 193-198.

29. Babaelahi, M., Sayyaadi, H. A new thermal model based on polytropic numerical simulation of Stirling engines // Applied Energy. 2015. Т. 141. № 1. С. 143- 159.

30. Ерыганов, А.В. Определение степени сжатия дизеля по результатам индицирования рабочего процесса/ А.В. Ерыганов, Р.А. Варбанец // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология, 2017. – №1. – С. 44-49.

31. Ерыганов, А.В. Определение степени сжатия дизеля по результатам индицирования рабочего процесса/ А.В. Ерыганов, Р.А. Варбанец // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология, 2017. – №1. – С. 44-49.

32. Обозов, А.А. Оценка герметичности камеры сгорания судового малооборотного дизеля для использования в системах технической диагностики // Судостроение. 2007. №6. С. 48-50.

33. Комовский, В.Р. Пьезокварцевые датчики для измерения быстроизменяющихся давлений в высокофорсированных двигателях внутреннего сгорания / В.Р. Комовский, С.С. Соколов // Тр. центр. науч.–иссл. дизельного института.– вып. 67.– Рабочие процессы дизелей / под общ. ред. В.И. Балакина.– Л., 1975.

34. Моек, Е. Техническая диагностика судовых машин и механизмов / Е. Моек, Х. Штрикерт.– Л.: Судостроение, 1986.– 232 с.

35. Райков, И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания : учеб. для вузов / И.Я. Райков.– М.: Высшая школа, 1975.– 320 с.

36. Шарапов, В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова; под ред. В.М. Шарапова.– М.: Техносфера, 2006.– 632 с.

37. AVL – DiTEST [Электронный ресурс] / AVL DiTest GmbH, 2020.– Режим доступа: http://www.avlditest.com

38. Equipment for vehicle technical inspections, headlamp adjustment systems, pollution inspection stations, EOBD reader, braking bench, suspension bench - Capelec [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.capelec.fr

39. Леонов И. В., Луцкая С. А. Развитие методов снятия и обработки индикаторных диаграмм / Леонов И. В., Луцкая С. А./ Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник»: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2015. – 6 с.

40. Обозов, А.А. Разработка теоретических основ и средств повышения эффективности систем технического диагностирования малооборотных дизелей: дис. … канд. техн. наук / Обозов, А.А. — Брянск: ЗАО «УК «БМЗ», 2010. — 425 с.

41. Лашко, В. А. Расчетный метод коррекции действительного положения ВМТ при индицировании ДВС / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Двигателестроение. – 2007. – № 3(229). – С. 34-38.

42. Woshni G., Anisitis F. Eine Methode zur Vorausberechnung der Anderung des Brennverlaufs mittelschbell-laufender Dieselmotoren bei geranderten betriebsbedingungen [Текст] // MTZ, 1973, №4, S/ 106 – 115.

43. Гаврилов В.В., Мащенко В.Ю. Анализ процесса горения в судовом дизеле по индикаторным диаграммам: учеб. пособие / В.В. Гаврилов, В.Ю. Мащенко. СПб.: СПбГМТУ. – 2015. – 62 с.

44. Гаврилов В.В. Судовое главное энергетическое оборудование. Судовые двигатели внутреннего сгорания: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГУВК, 2011. – 228 с.

45. Куличенков В.П., Саранцев В.В., Чепуркин А.А. Системы и устройства контроля механических параметров турбоагрегатов: Учебно-методическое пособие. – Минск: БНТУ – 2015. – 133 с.