

ПОСТРОЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА СУДОВОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Половинка Э. М., Слободянюк Н. В.

1. Введение

Переменные режимы составляют существенную часть эксплуатационного периода транспортных дизелей [1]. В силу этого такие режимы в значительной части определяют все эксплуатационные характеристики подобных энергетических установок. Но и для энергетических установок, работающих в основном со стабильными нагрузками, переменные режимы имеют большое значение, так как их качество характеризует надёжность в условиях маневрирования и экологическую безопасность в зонах санитарного контроля.

В указанных зонах требования к содержанию наиболее значительной составляющей вредных веществ в отработавших газах судовых дизелей – оксидов азота – регламентируются нормами Международной Морской Организации (International Maritime Organization, ИМО), представленными на рис. 1.

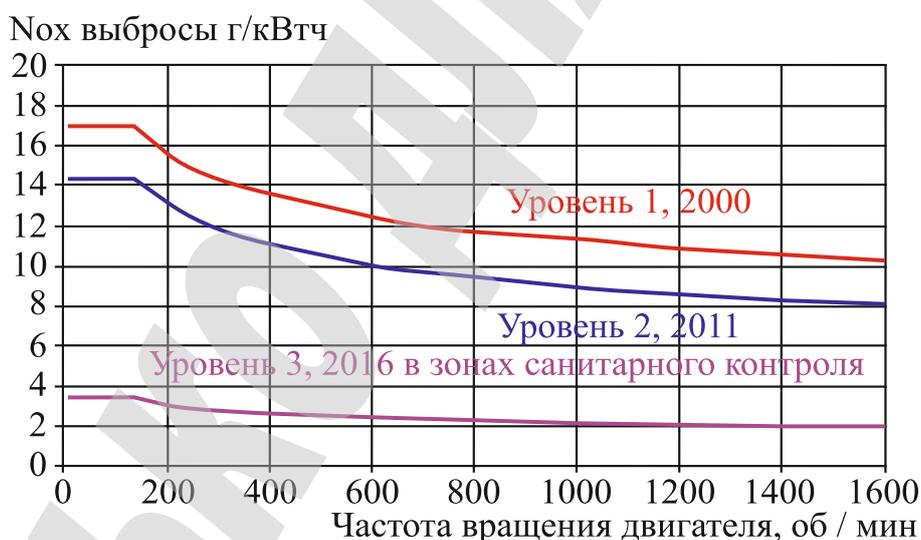


Рис. 1. Требования Международной Морской Организации (ИМО) к эмиссии NO_x в отработанных газах судовых дизелей (составлено автором на основе данных источника [2])

В Украине в настоящее время нормы экологической безопасности по выбросам отработавших газов регламентируются стандартом Евро 5.

Для обеспечения принятых норм и показателей в области дизелестроения предусматриваются исследования в следующих основных направлениях [3]:

- совершенствование конструкции двигателей (оптимизация процесса топливоподачи);
- учет эксплуатационных факторов (оптимизация режимов работы двигателей);

– применение нетрадиционных топлив.

Исследования в области улучшения топливных систем высокого давления направлены на:

- повышение точности дозирования цикловой подачи топлива;
- оптимизацию процесса сгорания на всех эксплуатационных режимах, в том числе при пуске, холостом ходе, разгоне и выбеге;
- обеспечение оптимальной экономичности, экологичности и эксплуатационной надежности.

Поскольку процессы топливоподачи играют определяющую роль в обеспечении всех характеристик дизелей, в том числе и на переменных режимах, исследования в этой области актуальны.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования в данной работе являются гидродинамические процессы в топливной системе высокого давления судового среднеоборотного двигателя на переменных режимах.

Указанные процессы реализованы в системе топливоподачи непосредственного действия, характерной для широко распространённого типа судового двигателя.

Характеристики топливоподачи в значительной мере определяют все эксплуатационные параметры дизелей на всех режимах, в том числе и на переменных. Одновременно с переходными процессами на переменных режимах формируются участки нагрузочной характеристики.

Совместное исследование переходных процессов и режимов нагрузочной характеристики ранее не проводилось. Решение такой задачи представляет научный и практический интерес и рассматривается в данной работе.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является получение данных об изменении параметров впрыскивания топлива судового среднеоборотного дизеля при переменном положении рейки топливного насоса высокого давления при соответствующих режимах нагрузочной характеристики.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Определить динамические параметры процессов перехода между режимами нагрузочной характеристики в условиях динамических испытаний.
2. Определить временные характеристики процесса-скорости перехода системы на стабильный режим.

4. Исследование существующих решений проблемы

Ранее установлено [4], что основным фактором, определяющим протекание скоростной характеристики системы топливоподачи, является начальное давление. Испытания показали, что в условиях безмоторного стенда [5] возможно построение заданной характеристики (в данном случае – скоростной) в рамках одного опыта. Полученный результат послужил основанием для подготовки и проведения аналогичного эксперимента с целью построения нагрузочной характеристики.

Установленные таким способом данные позволят синтезировать процесс топливоподачи на переменных режимах, соответствующих реальному их протеканию в двигателе с одновременным изменением частоты вращения и перемещением рейки топливного насоса высокого давления.

При разработке систем впрыскивания топлива дизелей выполняются требования нормативных документов [6] к конструктивным решениям и технико-экономическим показателям. Одновременно проводятся исследования, направленные на развитие средств и процессов топливоподачи. При этом рассматриваются как установившиеся, так и переменные эксплуатационные режимы.

Комплексный подход с учётом экономических и экологических показателей использован авторами работы [7] при решении задачи оптимизации топливной аппаратуры.

В результате выполненного аналитического обзора предлагаются следующие решения поставленной задачи:

- оптимизация управления топливной аппаратурой для каждого режима двигателя;
- применение многофазного впрыска для снижения шума, дожигания органических компонентов и обеспечения работы нейтрализатора;
- гибкое управление углом опережения впрыска в зависимости от режима работы дизеля;
- максимально возможное снижение неравномерности подачи топлива по цилиндрам;
- самодиагностика топливной системы.

При разработке средств, обеспечивающих снижение токсичности отработавших газов дизелей на переходных режимах, основное внимание уделили изменению угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) [8]. Рассмотрены различные технические решения по реализации переменных значений УОВТ. Выделены три группы таких устройств:

- 1) приставки к топливному насосу высокого давления (ТНВД) (муфты опережения впрыскивания топлива);
- 2) элементы, встроенные в ТНВД;
- 3) электронно-управляемые форсунки и насос-форсунки.

Применение средств управления УОВТ позволяет использовать оптимальные характеристики регулирования, при которых достигается заданная мощность, экономические и экологические характеристики двигателя.

На рис. 2 представлены базовые характеристики УОВТ, разработанные некоторыми зарубежными фирмами. Графики построены в форме зависимости угла начала впрыскивания $\varphi_{оп}$ от частоты вращения n и крутящего момента M_e . Численные значения даны в относительных величинах.

Базовые характеристики УОВТ формируются микропроцессором системы автоматического управления для дизельных двигателей с конструктивно разными камерами сгорания и топливными системами высокого давления. Оптимальные значения УОВТ выбираются в зависимости от назначения дизеля с учетом степени форсирования режимов работы и конструктивных особенностей.

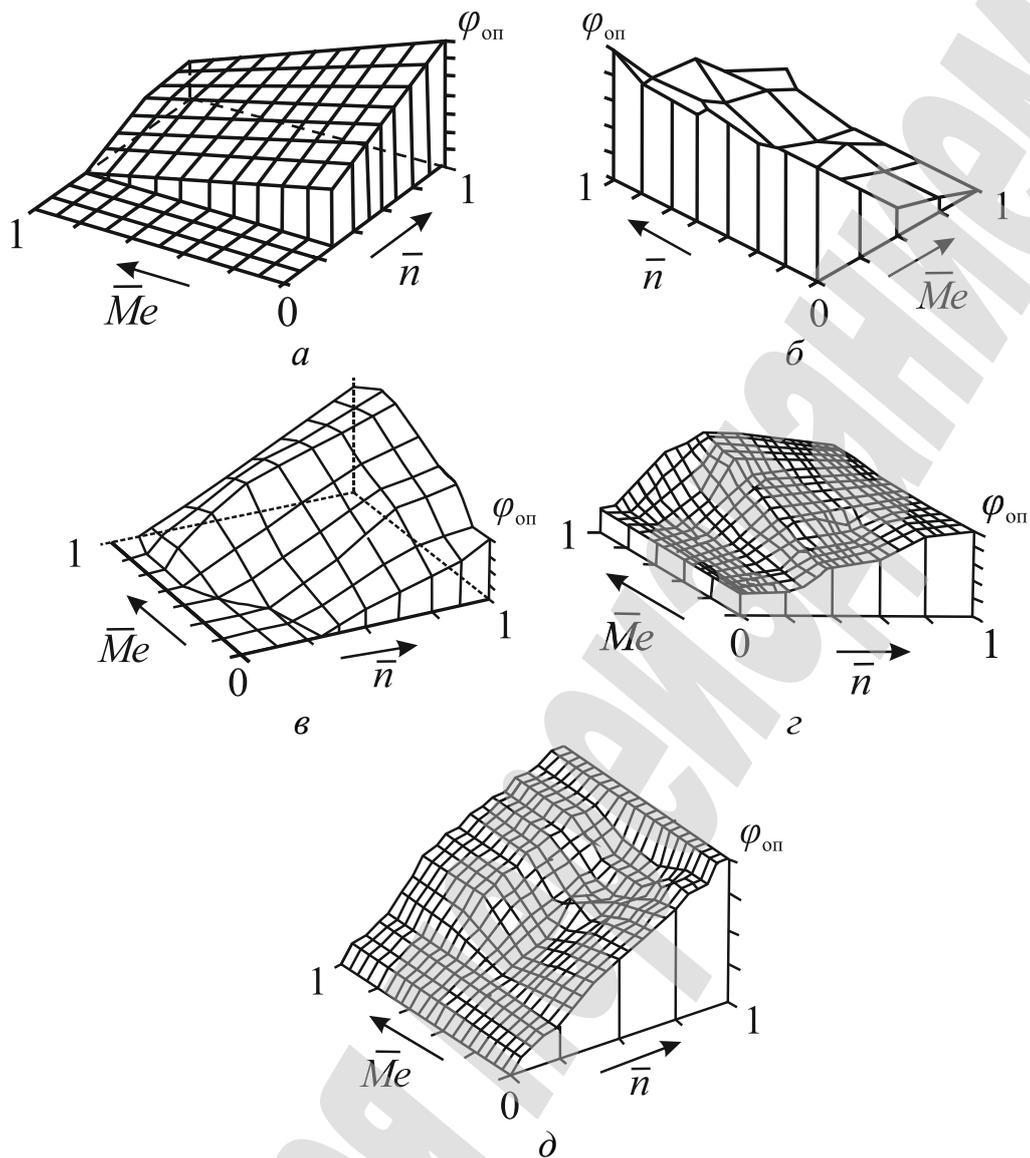


Рис. 2. Базовые характеристики угла опережения впрыскивания топлива $\varphi_{оп}$ высокооборотных дизелей: *а* – форсированный дизель с неразделенной камерой сгорания; *б, в* – дизели с предкамерным смесеобразованием и распределительным топливным насосом высокого давления (ТНВД); *г* – форсированный дизель с рядным ТНВД; *д* – вихрекамерный дизель

Для интенсификации процесса топливоподачи и рабочего процесса высокооборотного дизеля [9] перед пуском повышено начальное давление в системе впрыскивания топлива. Осциллограммы двух первых циклов с предварительным повышением давления топлива до $P_{нач1}=8$ МПа представлена на рис. 3. При этом во втором цикле сохраняется остаточное давление на уровне $P_{нач2}=3$ МПа. В обоих последовательных циклах возрастает среднее индикаторное давление, то есть повышается интенсивность разгона и пусковые характеристики улучшаются.

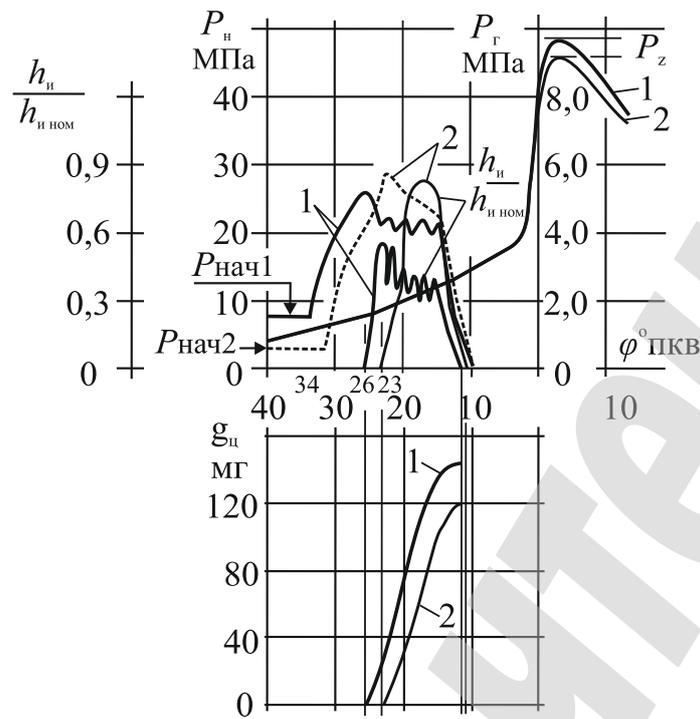


Рис. 3. Осциллограмма первых двух циклов пуска дизеля Д240 (Беларусь) после создания повышенного начального давления перед первым циклом впрыскивания

В результате испытаний высокооборотного дизеля Д240 (4Ч11/12,5) при низких температурах окружающего воздуха получено [10] значение УОВТ, обеспечивающее минимальное время пуска (рис. 4).

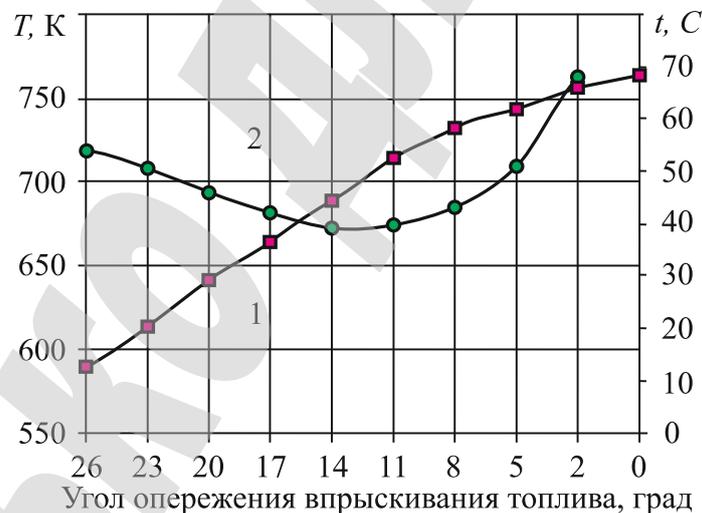


Рис. 4. Зависимость температуры в цилиндре дизеля на такте сжатия и продолжительность пуска холодного двигателя от угла опережения впрыска топлива (температура окружающего воздуха 0 °С): 1 – температура в цилиндре двигателя; 2 – продолжительность пуска

В работе [11] группа авторов рассматривает способ повышения остаточного (начального) давления в системе топливоподачи путём перепуска части топлива из линии высокого давления на дополнительном ходе плунжера.

При исследовании динамических характеристик системы управления качеством электроэнергии в работе [12] предложена следующая зависимость цикловой подачи топлива в переходном режиме:

$$g_{ук}^h = g_{ук} + \alpha_c \cdot V_n \cdot (P_{ок-1} - P_{ок}),$$

где $g_{ук}$ – цикловая подача топлива k -ого цикла установившегося режима;

α_c – коэффициент сжимаемости топлива;

V_n – объем нагнетательного трубопровода;

$P_{ок-1}, P_{ок}$ – остаточные давления в $(k-1)$ и k -ом циклах. При этом принято, что они безынерционно следуют положению рейки топливного насоса и частоте вращения.

Интересно отметить результаты исследований по совершенствованию динамических качеств дизеля 6ЧН15/18 (Россия) [13]. При условии повышения начального давления в системе впрыскивания получено сокращение времени разгона двигателя на 44 %.

Представленный обзор работ по исследованию переходных режимов дизелей характеризует значительное влияние на их развитие параметров топливоподачи. Так, установлено, что существенными факторами являются угол опережения впрыскивания и начальное давление топлива.

Вместе с тем, полученные данные не содержат информации о протекании процессов и существенных параметрах впрыскивания топлива. Публикуемые в данной работе материалы представляют результаты исследований в указанном направлении.

5. Методы исследования

Исследовалась топливная система высокого давления судового среднеоборотного дизеля 6ЧН25/34 (Украина). Состав системы традиционен:

– форсунка закрытого типа с распылителем 9x0,35 мм;

– золотниковый ТНВД, диаметр и ход плунжера, которого составляет 16 мм;

– топливный трубопровод высокого давления длиной 0,9 м с диаметром 9 мм и 3 мм (наружный и внутренний, соответственно).

Исследование проводилось на безмоторном стенде [5], который обеспечивает бесступенчатое изменение частоты вращения, другие режимные и регулировочные параметры.

В процессе подготовки экспериментальных исследований на кафедре судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия» (Украина) создана уникальная измерительная система для регистрации процессов в системах топливоподачи дизелей. В качестве измерительных преобразователей использованы тензометрические, индуктивные и фотодатчики, также разработанные на кафедре судовых энергетических установок.

Измерительная система (программно-аппаратный комплекс), объединённая общим названием «тензостанция» (ТС), включает в себя следующие функциональные блоки, представленные на рис. 5:

– персональный компьютер (ПК);

– измерительная установка типа LTR-U-1 (Россия);

- блок коммутации и усилителей;
- комплект программного обеспечения.



Рис. 5. Функциональная схема тензостанции

Для обеспечения работы измерительной установки LTR-U-1, входящей в состав тензостанции, был разработан блок коммутации и усилителей. Данный блок предназначен для обеспечения питания и усиления сигналов от тензодатчиков, включенных по полумостовой схеме и датчиков общего назначения (датчики вращения, фото датчик и т. д.).

ТС обеспечивает регистрацию следующих параметров процесса впрыскивания и рабочих устройств стенда:

- давления топлива;
- перемещения рабочих элементов и углов поворота вращающихся деталей;
- различного рода сигналов в диапазоне ± 10 В.

Управление работой ТС обеспечивается посредством совместной работы двух программ:

- LTRServer, организующей прием данных и передачу команд ПК к измерительной установке LTR-U-1 через интерфейс USB;
- пакета LGraph, адаптированного к условиям использования в составе ТС, позволяющего визуально настраивать некоторые параметры ТС, а также отображать на экране процессы настройки, приема и записи данных.

Общий вид безмоторного стенда с системой топливоподачи, снабжённой датчиками измерительной системы, приведен на фотографиях рис. 6.



Рис. 6. Система впрыскивания топлива с датчиками на безмоторном стенде: 1 – форсунка; 2 – топливный насос высокого давления (ТНВД); 3 – устройство, управляющее перемещением рейкой ТНВД; 4 – электродвигатель; 5 – станция управления электродвигателем

Кроме того для безмоторного стенда разработан программно-аппаратный комплекс управления положением рейки ТНВД. Функциональная схема комплекса приведена на рис. 7.



Рис. 7. Функциональная схема работы программно-аппаратного комплекса управления положением рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД)

Комплекс работает под управлением программы ReikaXP2, установленной на ПК. Интерфейс программы позволяет задавать параметры циклограммы (закона движения) рейки вручную либо загрузкой из файла исходных данных, а

также проверить работоспособность системы в пошаговом режиме движения рейки на малой и большой скорости.

Закон движения рейки в условиях эксперимента ступенчатый. Алгоритм последовательного перемещения и время нахождения рейки в каждом положении задаётся в файле программы испытаний. Продолжительность опыта и сочетания точек остановки ограничений не имеют.

Исполнительным устройством системы управления движением рейки является линейный шаговый двигатель (актуатор) типа SM57HT56-2804TL (Китай). Актуатор представляет собой сочетание шагового двигателя и винтовой передачи, выполненное в едином блоке. Поворот ротора двигателя на определенный угол приводит к пропорциональному линейному движению винта.

Основные характеристики актуатора:

- шаг (угол поворота) $1,8^\circ$ (в режиме полного шага);
- шаг винта 8 мм;
- максимальная скорость движения вала актуатора 0,4 м/с (без нагрузки).

Общий вид устройства управления рейкой ТНВД на безмоторном стенде представлен на рис. 8, топливная форсунка с измерительными датчиками на рис. 9, а измерительный комплекс на рис. 10.



Рис. 8. Устройство управления рейкой топливного насоса высокого давления (ТНВД): 1 – диски ограничителя движения; 2 – шаговый двигатель; 3 – вал актуатора; 4 – механизм центровки; 5 – ТНВД; 6 – датчик давления в штуцере ТНВД; 7 – узел крепления штока; 8 – шток индуктивного датчика; 9 – индуктивный датчик движения рейки ТНВД

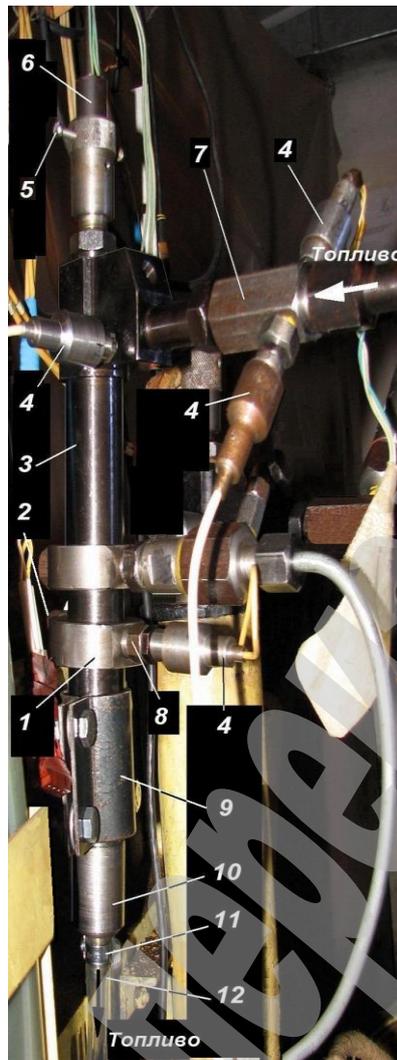


Рис. 9. Установка датчиков на форсунке: 1 – монтажное кольцо; 2 – нажимной болт; 3 – форсунка в сборе; 4 – датчики давления (4 шт.); 5 – винт крепления датчика подъёма иглы; 6 – датчик подъёма иглы распылителя; 7, 8 – переходники для датчиков давления; 9 – хомут крепления форсунки; 10 – стакан глушителя; 11 – хомут; 12 – сливная трубка

Микросистема сбора данных m-DAQ10 (Украина) с интерфейсом USB 1.1 содержит 8 каналов аналогового-цифрового преобразования, 2 канала цифро-аналогового преобразования. Один из каналов дискретного может использоваться как вход счетчика, а другой – как вход внешнего запуска аналогового-цифрового преобразователя или синхронизации. На контактах внешнего разъема присутствуют также напряжения питания +5 В и ± 15 В.



Рис. 10. Общий вид измерительного комплекса безмоторного стенда:
 1 – микросистема сбора данных m-DAQ10; 2 – системный блок персонального компьютера; 3 – модуль управления перемещением рейки (актуатором);
 4 – «тензостанция» система (ТС)

Программное обеспечение к m-DAQ10 содержит драйвер динамически подключаемой библиотеки (DLL) и примеры работы с ней, расширение файлов LLB для среды графического программирования LabVIEW и ряд виртуальных приборов – «осциллограф», «анализатор спектра», «частотомер» и «вольтметр».

6. Результаты исследований

В ходе экспериментального исследования регистрировались следующие параметры:

- давление топлива в штуцере топливного насоса p_n ;
- давление топлива в входе в форсунку $p_{ф.вх}$;
- давление в топливном канале форсунки $p_{ф.к}$;
- ход иглы распылителя (форсунки) z ;
- определялась частота вращения распределительного вала n_p ;
- фиксировался угол поворота распределительного вала φ ;
- измерялось время t ;
- перемещение рейки ТНВД m_p ;
- затяжка иглы форсунки при испытаниях составила 70 бар.

Движение рейки ТНВД задавалась в файле исходных данных для управляющей программы ReikaXP2.exe. После запуска ReikaXP2.exe на экране монитора появится изображение (рабочее окно). В рабочем окне выделено четыре области рис. 11:

- первая область основная – темно-серого цвета. В ней расположены три кнопки ПУСК, ВЫХОД, ПОМОЩЬ и остальные три области;
- вторая область – циклограмма движения рейки;
- третья область – рейка;
- четвертая область – информационная строка.

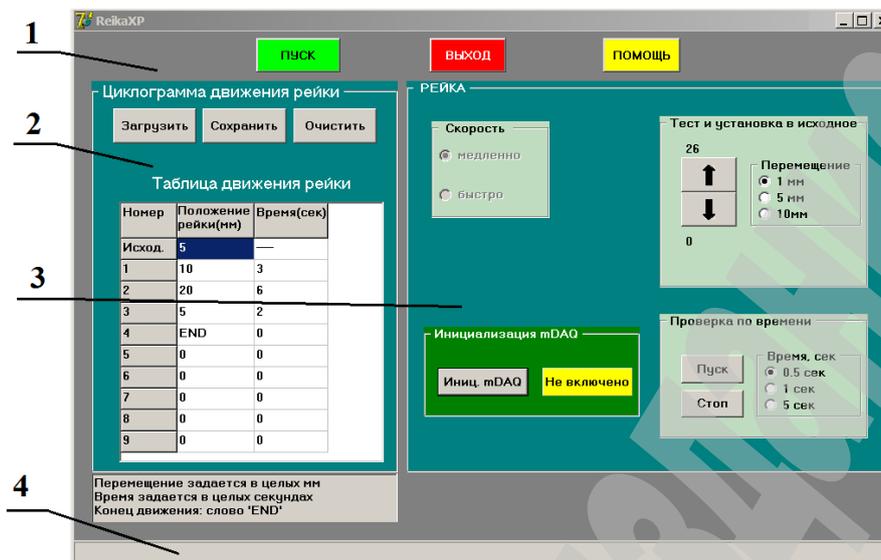


Рис. 11. Окно управляющей программы ReikaXP2.exe:

1 – основная область; 2 – область циклограммы движения рейки; 3 – область рейки; 4 – область информационной строки

Программа эксперимента и результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика перемещения рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД) при моделировании переходного процесса

Участок и положение рейки	Пройденное расстояние рейкой, мм	Время перемещения рейки, с	Скорость рейки, мм/с	Номер цикла в конце перемещения рейки
I – 5–25	20	0,44	45,49	5
II – 25–10	15	0,309	48,54	19
III – 10–20	10	0,2259	44,27	32
IV – 20–15	5	0,1085	46,08	45
V – 15–05	10	0,2264	44,17	58

Испытания проведены в следующей последовательности. После запуска стенда устанавливалась частота вращения распределительного вала n_p равная 250 об/мин. При стабилизации частоты вращения запускалась программа *LGraph*, которая отображала на экране процессы настройки, приема и записи данных параметров топливоподачи. Одновременно активировался модуль управления перемещением рейки ТНВД ReikaXP. По окончании программы эксперимента (остановке ReikaXP) при фиксированном конечном выходе рейки m_p и стабилизации частоты вращения прекращалась запись параметров системы топливоподачи.

В результате обработки осциллограмм построены графики, показанные на рис. 12. Кривые давления p_n , $p_{ф.вх}$, $p_{ф.к}$, угла поворота распределительного вала $\varphi_{вп}$, частота вращения распределительного вала n_p , движения рейки ТНВД m_p построены в зависимости от времени с момента начала записи и номера циклов. Участки перемещения рейки обозначены номерами I–V.

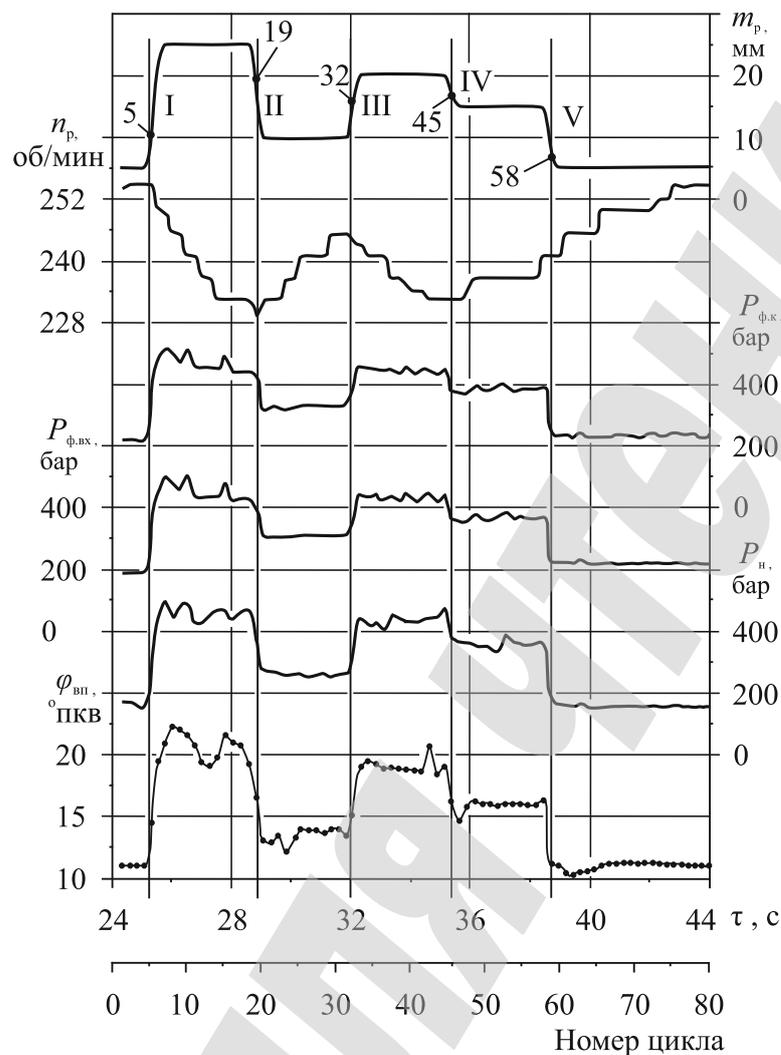


Рис. 12. Параметры топливоподачи на режимах нагрузочной характеристики при динамических испытаниях: участки и положения рейки: I – 5–25 мм; II – 25–10 мм; III – 10–20 мм; IV – 20–15 мм; V – 15–05 мм; 5, 19, 32, 45, 58 – номера циклов при перемещении рейки

Как следует из графиков (рис. 12), продолжительность эксперимента составила 44 с, 80 циклов впрыскивания и пять участков движения рейки ТНВД. На каждом участке движения рейки ТНВД был один цикл впрыскивания, происходящий в условиях перемещения рейки. Характеристика перемещения рейки ТНВД по участкам представлена в табл. 1.

Стоит обратить внимание на то, что скорость перемещения рейки на различных участках несколько отличается. Различие это сравнительно невелико, составляет максимум 4,37 мм/с и не превышает 10 %. Вероятной причиной различия скоростей движения рейки является разница сопротивления её перемещению в момент начала хода. Последнее связано с фазой работы ТНВД. При высоком давлении топлива сопротивление повороту плунжера, естественно, возрастает, что снижает скорость движения рейки.

Осциллограммы последовательных циклов впрыскивания во время движения рейки по участкам и положениям рейки ТНВД представлены на рис. 13.

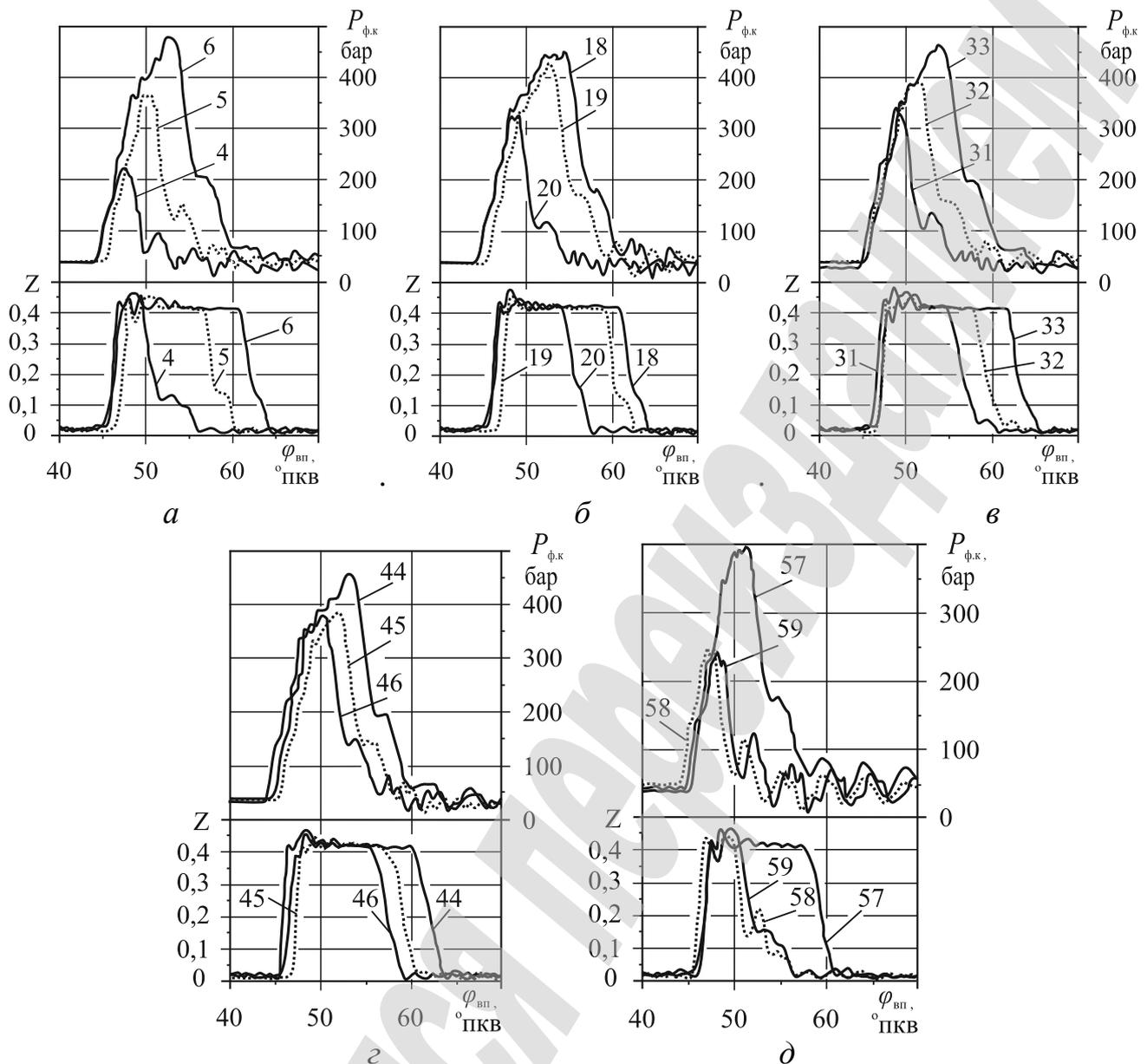


Рис. 13. Совмещенные осциллограммы топливоподачи на участках нагрузочной характеристики: - - - циклы 5, 19, 32, 45, 58 – движение рейки; — циклы 4, 6, 18, 20, 31, 33, 44, 46, 57, 58 – рейка стабильна; *а* – I участок, $m_p=5-25$ мм; *б* – II участок, $m_p=25-10$ мм; *в* – III участок, $m_p=10-20$ мм; *г* – IV участок, $m_p=20-15$ мм; *д* – V участок, $m_p=15-5$ мм

На участке I (рис. 13) представлены совмещенные осциллограммы давления в канале форсунки $p_{ф.к}$ и угла впрыскивания $\varphi_{вп}$ последовательных циклов 4, 5, 6. Рейка ТНВД находится в исходном положении, выдвинута на отметку 5 мм, частота вращения распределительного вала n_p номинальная 250 об/мин. Давление форсунки канала $p_{ф.к}$ последнего четвертого цикла впрыскивания установившегося режима перед страгиванием рейки составило 216 бар, а угол впрыскивания $\varphi_{вп}=10,0$ ПРВ.

Переходной режим на первом участке движения характеризуется следующими параметрами: рейка смещена на отметку 25 мм, при этом пройдено расстояние 20 мм за 0,44 с со скоростью 45,5 мм/с.

На время движения приходится пятый цикл впрыскивания. Его параметры: давление $p_{ф.к}=364$ бар, $\varphi_{вп}=14,0$ ПРВ. Первое же после остановки рейки впрыскивание (шестой по общей нумерации циклов) имело сразу параметры установившегося режима: $p_{ф.к}=474$ бар и $\varphi_{вп}=19,5$ ПРВ.

Как указано выше, на рассмотренном (первом) участке время перемещения рейки в диапазоне $m_p=5-25$ мм составило 0,44 с при скорости 45,5 мм/с. Этот промежуток соответствует полному рабочему диапазону. Частота вращения распределителя была близка к номинальной. Принимая положение промежуточного во время движения рейки (пятого) цикла впрыскивания близким к середине диапазона, получим время формирования очередного цикла впрыскивания не более 0,22 с. Характеристики промежуточного цикла также занимают среднее положение.

Такой же порядок временных параметров имеют и другие участки нагрузочной характеристики. Следовательно, в условиях эксперимента параметры топливоподачи изменялись одновременно с перемещением рейки.

Параметры впрыскивания топлива на I–V участках движения рейки сведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры нагрузочной характеристики при динамических испытаниях

Участок переходного режима	Номер цикла	p_n , бар	$p_{ф.вх}$, бар	$p_{ф.к}$, бар	$\varphi_{вп}^\circ$, ПРВ	$p_{нач}$, бар	Положение рейки, m_p , мм	Частота вращения, n , об/мин
I	4	152	190	216	10,0	33,3	5	255
	5	284	349	364	14,0	35,9	10,3	255
	6	445	457	474	19,5	33,7	25	250
II	18	469	427	441	19,3	37,6	25	232
	19	388	403	425	16,0	34,8	19,3	230
	20	271	304	316	13	32,4	10	232
III	31	259	314	334	13,3	22,7	10	245
	32	377	375	387	15,2	33,2	15,9	244
	33	442	444	459	19,1	37,8	20	243
IV	44	475	442	450	18,6	36,5	20	233
	45	379	364	376	14,9	37,2	17,1	233
	46	367	361	376	14,6	30,7	15	233
V	57	356	369	390	16,4	31,5	15	241
	58	183	228	251	11,2	45,7	6,9	241
	59	162	222	232	10,6	35,7	5	241

Графическое представление полученной нагрузочной характеристики, построенной в соответствии с данными табл. 2, показано на рис. 14, а, б. Её ход отображает рост всех параметров топливоподачи с увеличением выхода рейки m_p .

Визуальный анализ распределение опытных точек на графиках рис. 14 свидетельствует о корректном представлении существующих зависимостей аппроксимирующими кривыми. Для статистической оценки достоверности экспериментальных данных целесообразно использовать среднеквадратические отклонения параметров в абсолютных и относительных величинах, отнесенных к аппроксимирующим значениям, представленным соответствующей кривой.

Для оценки отклонения экспериментальных значений параметров топливоподачи от аппроксимирующей кривой при различных положениях рейки ТНВД (рис. 14, а, б) используем формулы:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (y_{\text{экс}} - y_{\text{апр}})^2}{n}},$$

$$\delta = \frac{\sigma}{y_{\text{ср}}} \cdot 100 \%,$$

где σ , δ – абсолютное и относительное среднее квадратичное отклонение;

$y_{\text{экс}}$ – экспериментальные значения параметров процесса топливоподачи соответствующего участка;

$y_{\text{апр}}$ – координата аппроксимирующей кривой на соответствующем участке;

$y_{\text{ср}}$ – среднее значение параметров процесса на соответствующем участке;

n – полный объем выборки.

В результате получены следующие величины: для $p_{\text{ф.вх}}$ $\delta=2,7 \%$; для $p_{\text{ф.к}}$ $\delta=2,6 \%$; для $p_{\text{н}}$ $\delta=2,9 \%$; для $\varphi_{\text{вп}}$ $\delta=3 \%$.

Нагрузочная характеристика системы топливоподачи, полученная в динамическом режиме, представлена на рис. 14, а, б. Численные значения параметров, как указано выше, приведены в табл. 2.

Для $p_{\text{ф.к}}$, $p_{\text{ф.вх}}$, $p_{\text{н}}$ опытные точки сгруппированы в пяти областях, соответствующих ступеням перемещения рейки (рис. 14, а). Аналогичные участки значений углов впрыскивания $\varphi_{\text{вп}}$ представлены на рис. 14, б.

При минимальном выходе рейки $m_p=5$ мм давление топлива $p_{\text{ф.к}}$ изменяется от 216 до 222 бар при среднем значении 219 бар. Соответствующая величина $\varphi_{\text{вп}}$ от 10 до 11°ПРВ (в среднем 10,75°ПРВ). При максимальном $m_p=25$ мм диапазон $p_{\text{ф.к}}$ составил 474–516 бар, в среднем 470 бар. Угол впрыскивания $\varphi_{\text{вп}}=19,5\text{--}22$ °ПРВ, а среднее значение – 20,64°ПРВ.

График зависимости начального давления $p_{\text{нач}}$ от перемещения рейки представлен на рис. 14, б. Его средняя величина для всех значений представляется практически горизонтальной прямой, соответствующей 40 бар, при относительно широком диапазоне изменения отдельных величин: от 22,7 до 45,7 бар.

На первом участке записи (рис. 13, а) показан переход рейки из положения минимальной в положение полной подачи.

Передний фронт кривых одинаков по форме общих участков давления в канале и перемещения иглы форсунки. Некоторое смещение по углу поворота носит нерегулярный характер и может быть отнесено к неточности представления этого параметра. Одновременно такое смещение улучшает возможности сопоставления кривых.

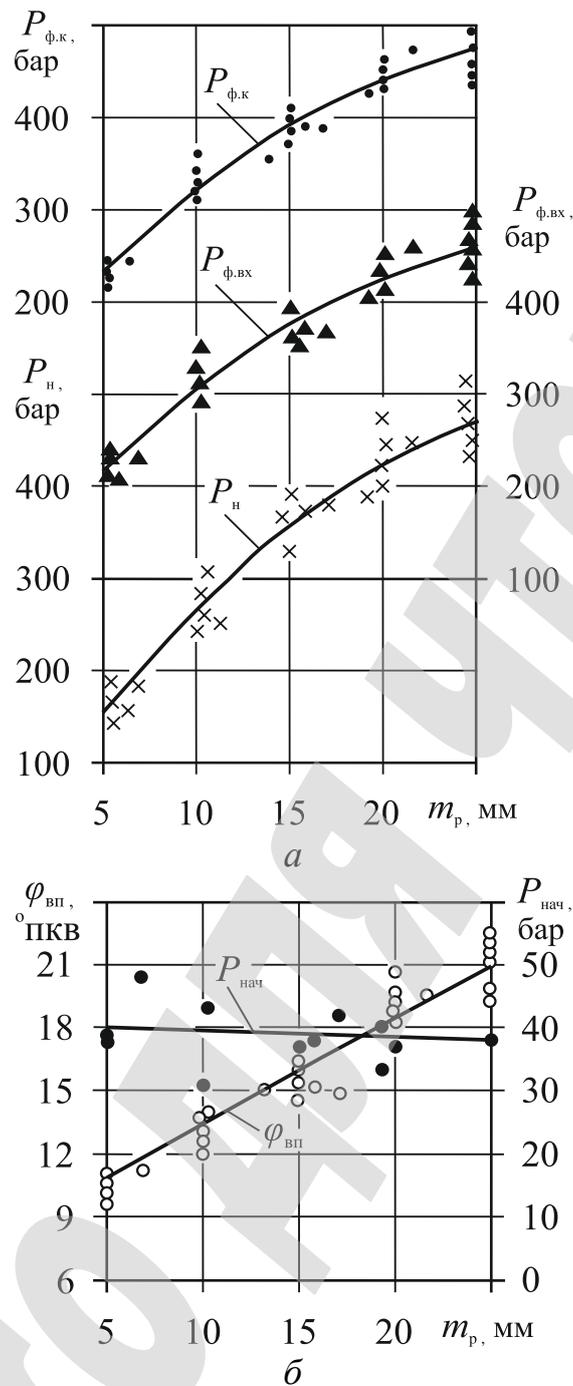


Рис. 14. Зависимость параметров топливоподачи от положения рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД) в динамическом режиме:

a – для $p_{ф.к}$, $p_{ф.вх}$, p_n ; *б* – для $p_{нач}$, $\varphi_{вп}$

Участок снижения давления (задний фронт кривых) содержит на всех трёх осциллограммах кратковременное снижение скорости падения давления. В этом отношении можно говорить о подобии процессов. Более того, на осциллограммах 5, 6 (рис. 13, *a*) на этих участках развивается колебательный процесс.

Характер осциллограмм перемещения иглы форсунки соответствует изменению давления топлива в форсунке.

Во всех трёх случаях давления достаточно для чёткого подъёма иглы. Посадка происходит по-разному. При выходе рейки на $m_p = 25$ мм посадка, как и

подъём, чёткая. Для исходного значения $m_p=5$ мм и промежуточного значения ход иглы повторяет характер изменения давления топлива и происходит с задержкой в средней части движения иглы.

Проведенный анализ характерен и для других участков записи процессов впрыскивания (рис. 13, б–г). При этом закономерности сохраняются для перемещении рейки как в большую, так и в меньшую сторону.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Разработанный метод динамических испытаний систем впрыскивания с целью построения их характеристик имеет следующие особенности. Данный метод позволяет оперативно, в минимальные сроки, строить зависимость параметров топливоподачи от определяющих эксплуатационных факторов. К ним относятся частота вращения и положения органа управления величиной цикловой подачи – выхода рейки топливного насоса высокого давления. В частности, запись нагрузочной характеристики с пятью фиксированными режимами для судового среднеоборотного дизеля произведена в течение 44 с. Одновременно исследованы переменные режимы, имеющие большое значение в работе дизелей различного назначения.

Безмоторные стендовые испытания в динамическом режиме можно использовать для получения нагрузочной характеристики систем впрыскивания топлива дизелей, что существенно сокращает время опытов и повышает достоверность результатов.

Weaknesses. Недостатком предложенной методики является необходимость внедрения разработанного в данном исследовании аппаратно-программного обеспечения и электромеханического комплекса для автоматического управления и реализации режимов испытаний.

Opportunities. Перспективы и возможности использования результатов исследования определяются областью применения оборудования, в котором осуществляются процессы впрыскивания топлива. Таким оборудованием являются дизели различного назначения. Они широко используются в различных отраслях производства и транспорта во всех странах мира. Этому и соответствует возможный объём применения результатов исследования. Оценка возможной прибыли на данном этапе затруднительна из-за неопределенности значительного количества определяющих факторов.

Threats. Проведение испытаний (исследования) наладка узлов (элементов) топливной системы проводится в лабораторных условиях с дальнейшей установкой на двигатель. При эксплуатации контроль за техническим состоянием требует дополнительного сбора информации о гидродинамических процессах, а это приведет к установке дополнительных датчиков.

Полные аналоги данного объекта не известны. Ближайшие аналоги решают указанные задачи в статических условиях путём отдельных испытаний на режимах нагрузочных характеристик и на переходных режимах. Предложенный метод сокращает затраты и повышает достоверность полученных данных.

8. Выводы

1. Для проведения стендовых динамических испытаний системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля в режиме нагрузочной характеристики созданы программно-аппаратные средства управления режимами, записи и обработки параметров впрыскивания топлива. Программа ReikaXP обеспечила реализацию плана эксперимента под управлением персонального компьютера. При испытаниях реализован ступенчатый закон перемещения рейки во всём рабочем диапазоне с заданными периодами нахождения в каждом положении. Движение рейки в соответствии с программой испытаний обеспечено электро-механическим комплексом, созданным для проведения опытов.

В результате эксперимента построена нагрузочная характеристика системы впрыскивания с пятью фиксированными положениями топливной рейки насоса высокого давления. В исследованном диапазоне положений рейки, охватывающем все эксплуатационные режимы $m_p=25-5$ мм, основные параметры топливоподачи имели следующие значения: $p_{ф.к}=474-232$ бар; $p_{ф.вх}=457-222$ бар; $p_n=445-162$ бар.

2. Решение задачи определения параметров переходных процессов обеспечено анализом характеристик движения рейки ТНВД и процессов топливоподачи. Время перехода рейки не превышало 0,44 с, а для изменения (настройки) процесса впрыскивания было не более 0,22 с. Можно полагать, что процесс топливоподачи в реальных условиях переходных режимов следует положениям рейки ТНВД.

Литература

1. Половинка Э. М., Слободянюк Н. В. Процесс впрыскивания топлива в судовом среднеоборотном дизеле на переменных режимах // Судовые энергетические установки. 2016. № 36. С. 141–151.

2. Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships. Chapter 3 – Requirements for control of emissions from ships. Regulation 13 – Nitrogen oxides (NO_x) / MARPOL. URL: http://www.marpoltraining.com/MMSKOREAN/MARPOL/Annex_VI/r13.htm

3. Нгуен Х. Х. Оценка эмиссии отработавших газов дизелей эксплуатирующийся судов смешанного (река-море) плавания // Технические науки в России и за рубежом: материалы Междунар. науч. конф. (Москва, май 2011 г.). М.: Ваш полиграфический партнер, 2011. С. 103–110.

4. Половинка Э. М., Слободянюк Н. В. Влияние начальных условий на процесс топливоподачи среднеоборотного судового дизеля на переменных режимах // American Scientific Journal. 2018. № 19. С. 51–59.

5. Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів: пат. України u201805581; заявл. 21.05.2018. URL: <http://base.uipv.org/searchInvStat/showclaimdetails.php?IdClaim=308776&resId=1>

6. ГОСТ 15888-90. Аппаратура дизелей топливная. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 14 с.

7. Обозов А. А., Субботенко Д. И., Тараканов В. В. Оптимизация процессов в топливной аппаратуре дизеля с целью улучшения его экономических и экологических характеристик // Вестник Брянского Государственного технического университета. 2014. № 2 (42). С. 45–51.

8. Марков В. А., Полухин Е. Е. Переходные процессы дизеля с системой регулирования угла опережения впрыскивания топлива // Известия вузов. Машиностроение. 2008. № 5. С. 33–65.

9. Патрахальцев Н. Н., Харитонов В. В., Фомин А. В. Влияние переходного процесса в топливной аппаратуре дизеля на его пусковые характеристики // Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования. 2004. № 1 (8). С. 17–22.

10. Мулдашев М. А., Бролиев М. К., Мухтаров М. У. Влияние внешних факторов на пуск и эффективность работы дизельного двигателя // Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана. 2010. № 4 (21). С. 106–108.

11. Скоростное форсирование топливного насоса в системах топливоподачи малых дизелей / Салыкин Е. А. и т. д. // ВолгГТУ. 2014. № 18 (145). С. 19–21.

12. Слепушкина Ж. Ю. Автоматическое управление качеством электроэнергии // Вестник СевГТН. 2000. № 23. С. 103–110.

13. Эммиль М. В., Бисенбаев С. С. Повышение динамических качеств дизеля 6ЧН 15/18 регулированием начального давления топлива // Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования. 2004. № 2 (9). С. 11–15.