

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-5-69-4>

УДК 621.431.74

Половинка Э.М., Слободянюк Н.В.
Национальный университет «Одесская морская академия»**ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ
СУДОВОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ**

Аннотация. В статье приведено экспериментальное исследование, задачей которого являлось получение нагрузочной характеристики для системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля в условиях динамических испытаний (переходные режимы). Выполнение запланированных задач стало возможным, благодаря разработанному аппаратно-программному комплексу с функцией осциллографирования, записью и обработки полученных данных. Разработана электромеханическая система перемещения рейки топливного насоса высокого давления с программным компьютерным управлением. Электромеханическая система предусматривает положение рейки топливного насоса высокого давления во всем диапазоне эксплуатационно-нагрузочной характеристики. Алгоритм перемещения рейки предусматривал пять установившихся положений со ступенчатыми переходами. В ходе экспериментального исследования топливный насос высокого давления произвел 80 циклов впрыскивания. В исследуемом диапазоне положения рейки от 25 мм до 5 мм, что соответствовало 6 и 59 циклам впрыскивания. Выполнено: качественный анализ процессов впрыскивания; получение нагрузочной характеристики путем динамических испытаний, что существенно сократило время испытаний и повысило достоверность данных, исключая влияние временного тренда параметров.

Ключевые слова: среднеоборотный дизель, топливная аппаратура, аппаратно-программные средства безмоторных динамических испытаний, нагрузочная характеристика, переменные режимы.

Polovinka Edward, Slobodianiuk Nikolay
National University «Odessa Maritime Academy»**DYNAMIC TESTS OF THE FUEL SUPPLY SYSTEM
OF A COURSE-MEDIUM-REVERSE DIESEL**

Summary. The object of research in the work are hydrodynamic processes in the high pressure fuel system of the ship's medium-speed engine on variable modes. Variable regimes constitute a significant part of the operational time of a number of types of vessels (tugs, fishing vessels, etc.), and for transport fleets they are characteristic for maneuvering. In the latter case, reliability and environmental safety for sanitary control zones are of particular importance. Studies of fuel supply processes in variable modes are important, since they largely determine all the operating characteristics of a diesel engine and are not well learnt. The article presents an experiment in which the task was to obtain the load characteristics and the study of transients in the fuel equipment of the ship's medium-speed diesel engine under dynamic testing conditions. In the course of the study, a developed hardware and software complex was used to ensure the implementation of the experiment plan, fixation, processing and oscillography of the data obtained. An electromechanical system has been developed by moving a rail of a high-pressure fuel pump with programmed computer control. The experiment program provides for changing the position of the staff in the whole range covering the operational load characteristic. The discrete displacement included five fixed rake positions with a step transition between them. During testing, the high-pressure fuel pump completed 80 injection cycles over 44 s. The transition time between the individual fixed positions of the slats was 0.44 s. The stabilization period of hydrodynamic processes in the fuel supply system is close to 0.22 s. In the investigated range of rail positions $m_r=25-5$ mm the main parameters of the fuel injection were as follows: $p_{c,n}=474-232$ bar; $p_{i,n}=457-222$ bar; $p_p=445-162$ bar. The study showed the possibility of obtaining load characteristics by dynamic tests, which significantly reduces the test time and increases the reliability of the data, eliminating the influence of the time trend parameters.

Keywords: medium-speed diesel, fuel equipment, hardware-software means of non-motorized dynamic tests, load characteristic, variable modes.

Постановка проблемы. Развитие компьютерных технологий позволяет по-новому решать различные задачи при изучении рабочих процессов во многих видах энергетического оборудования. Такие тенденции имеются и в области судовой энергетики, в частности, двигателей внутреннего сгорания.

В данной статье представлены результаты создания и применения аппаратно-программного комплекса на базе безмоторного стенда для различного рода испытаний систем топливоподачи дизелей.

Анализ основных исследований и публикаций. Ранее установлено [1, с. 52], что начальное давление является основополагающим фактором,

влияющим на формирование скоростной характеристики в системе топливоподачи. Экспериментальные исследования, выполненные в условиях безмоторного стенда [2, с. 2] показали возможность построения скоростной характеристики в формате одного опыта. Полученный результат стал основанием для выполнения аналогичного эксперимента с задачей построения нагрузочной характеристики.

Полученные экспериментальные данные скоростной и нагрузочной характеристики синтезируют процесс топливоподачи на установившихся переменных режимах, соответствующих реальному их протеканию в двигателе с одновременным изменением частоты вращения и перемещением рейки топливного насоса высокого давления.

Марковым В.А. и Полухиным Е.Е. [3, с. 33] при анализе способов снижения токсичности отработавших газов в дизельных двигателях на переходных режимах, основное внимание уделялось изменению угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ). Рассмотрены различные технические решения по управлению значениями УОВТ.

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

Базовые характеристики УОВТ, разработанные некоторыми зарубежными фирмами строились в форме зависимости угла начала впрыскивания $\varphi_{оп}$ от частоты вращения n и крутящего момента M_c . Их формирование выполняется 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.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Обзор работ по влиянию переходных процессов на эксплуатационные параметры систем топливоподачи указывают на то, что существенными факторами является угол опережения впрыскивания и начальное давление топлива.

Вместе с тем, полученные данные не содержат информации о протекании процессов и существенных параметрах впрыскивания топлива.

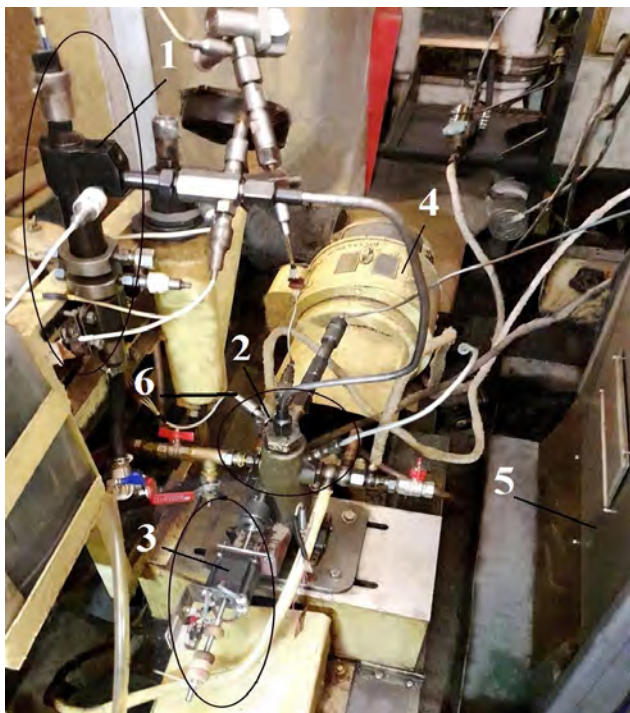


Рис. 1. Система впрыскивания топлива с датчиками на безмоторном стенде:
1 – форсунка; 2 – топливный насос высокого давления (ТНВД); 3 – устройство, управляющее перемещением рейки ТНВД; 4 – электродвигатель; 5 – станция управления электродвигателем; 6 – датчик давления ТНВД

Источник: разработано авторами

Публикуемые в данной работе материалы представляют результаты исследований в указанном направлении.

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

Изложение основного материала. При исследовании процессов впрыскивания топлива в дизелях предметом изучения является гидродинамика и работа механических элементов топливной аппаратуры. При этом традиционно регистрируются давления топлива в различных элементах системы впрыскивания, перемещение деталей и фазовые параметры [4, с. 12].

На кафедре судовых энергетических установок (СЭУ) Национального университета «Одесская морская академия» (НУ «ОМА») выполнены исследования по развитию методики исследований систем впрыскивания, обеспечению их аппаратно-программными средствами и электро-механическими устройствами.

В качестве результатов использования проведенных разработок в настоящей статье рассматриваются исследования неустановившихся режимов системы впрыскивания судового среднеоборотного дизеля, совмещенные с построением нагрузочной характеристики. Испытания проведены в динамическом режиме на безмоторном стенде.

Общий вид стенда с комплектом топливной аппаратуры двигателя ЧН25/34, оборудованным датчиками, приведен на рис. 1.

Расположение датчиков на форсунке показано на рис. 2.

Закон движения рейки в условиях эксперимента задан ступенчатый, в соответствии параметрами нагрузочной характеристики. Алгоритм последовательного перемещения и время нахождения рейки в каждом положении задается в файле программы испытаний. Продолжительность опыта и сочетания точек остановки ограничены не имеют.

В ходе экспериментального исследования регистрировались следующие параметры:

- давление топлива в штуцере топливного насоса p_n ;
- давление топлива на 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.

Программа эксперимента (участки нагрузочной характеристики) и параметры движения рейки ТНВД представлены в табл. 1.

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 на-

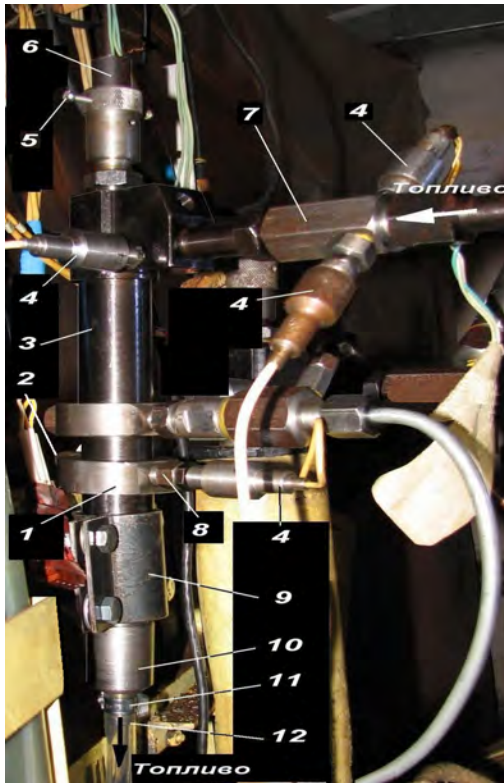


Рис. 2. Установка датчиков на форсунке: 1 – монтажное кольцо; 2 – нажимной болт; 3 – форсунка в сборе; 4 – датчики давления (4 шт.); 5 – винт крепления датчика подъема иглы; 6 – датчик подъема иглы распылителя; 7, 8 – переходники для датчиков давления; 9 – хомут крепления форсунки; 10 – стакан глушителя;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

Источник: разработано авторами

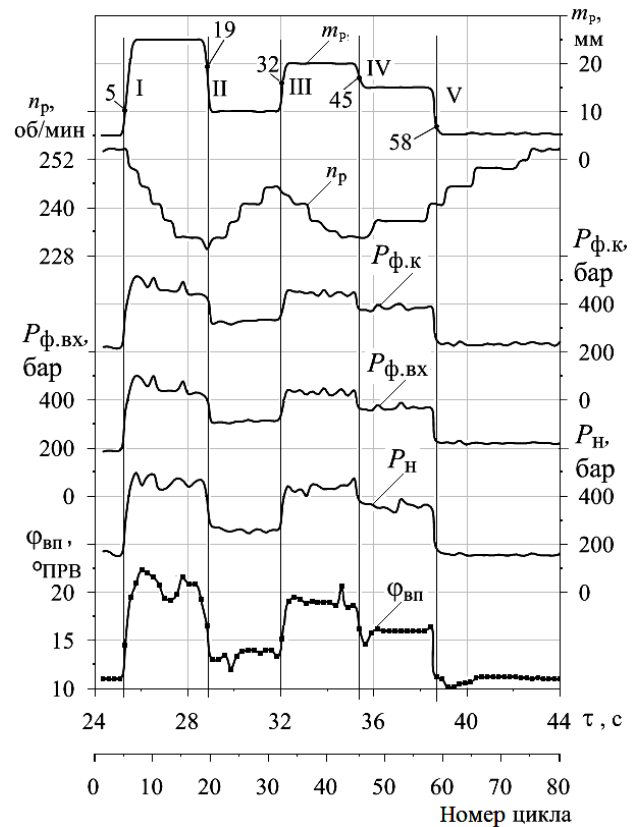


Рис. 3. Параметры топливоподачи на режимах нагрузочной характеристики при динамических испытаниях: участки и положения рейки: I – 5–25 мм; II – 25–10 мм; III – 10–20 мм; IV – 20–15 мм; V – 15–05 мм; 5, 19, 32, 45, 58 – номера циклов при перемещении рейки

Источник: разработано авторами

стройки, 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 осциллограммы построены графики, показанные на рис. 3. Кривые давления p_n , $P_{ф.вх}$, $P_{ф.к}$, угла поворота распределительного вала $\Phi_{вп}$, частота вращения распределительного вала n_p , движения рейки ТНВД m_p построены в зависимости от времени с момента начала записи и номеров циклов. Участки перемещения рейки обозначены номерами I–V.

Как следует из графиков (рис. 3), 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.

Таблица 1

Характеристика перемещения рейки ТНВД при моделировании переходного процесса

Номер участка и выход рейки, m_p , мм	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

Источник: разработано авторами

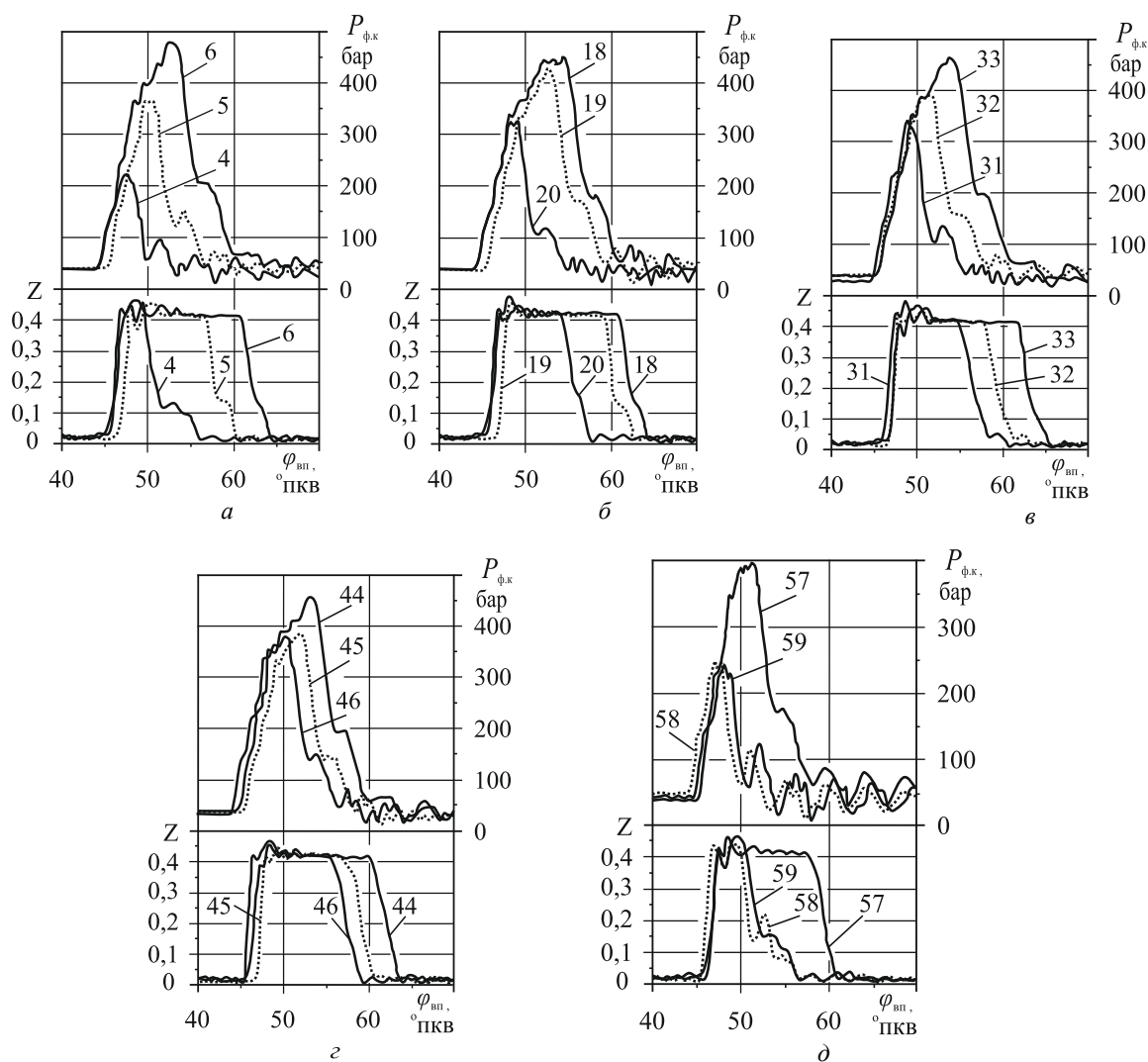


Рис. 4. Совмещенные осциллограммы топливоподачи на участках нагрузочной характеристики: --- циклы 5, 19, 32, 45, 58 – движение рейки; — циклы 4, 6, 18, 20, 31, 33, 44, 46, 57, 58 – рейка стабильна; а – I участок, $m_p=5-25$ мм; б – II участок, $m_p=25-10$ мм; в – III участок, $m_p=10-20$ мм; г – IV участок,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

Источник: разработано авторами

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. 4.

На участке I (рис. 4) представлены совмещенные осциллограммы давления в канале форсунки $p_{ф.к.}$ и перемещения иглы форсунки z последовательных циклов 4, 5, 6. Рейка ТНВД находится в исходном положении, выдвинута на отметку 5 мм, частота вращения распределительного вала n 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 распределительного вала 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	$\Phi_{вп.}$ ПРВ	$p_{нач.}$, бар	Положение рейки, m_p , мм	Частота вращения, n_p , 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

Источник: разработано авторами

Графическое представление полученной нагрузочной характеристики, построенной в соответствии с данными табл. 2, показано на рис. 5, а, б. Её ход отображает рост всех параметров топливоподачи с увеличением выхода рейки m_p .

Визуальный анализ распределения опытных точек на графиках рис. 5 свидетельствует о корректном представлении существующих зависимостей аппроксимируемыми кривыми.

Нагрузочная характеристика системы топливоподачи, полученная в динамическом режиме, представлена на рис. 5 а, б. Численные значения параметров, как указано выше, приведены в табл. 2.

Для $p_{ф.к.}$, $p_{ф.вх.}$, p_n опытные точки сгруппированы в пять областей, соответствующих ступеням перемещения рейки (рис. 5, а). Аналогичные участки значений углов впрыскивания $\Phi_{вп.}$ представлены на рис. 5, б.

При минимальном выходе рейки $m_p=5$ мм давление топлива $p_{ф.к.}$ изменяется от 216 до 222 бар при среднем значении 219 бар. Соответствующая величина $\Phi_{вп.}$ от 10 до 11°ПРВ (в среднем 10,75°ПРВ). При максимальном $m_p=25$ мм диапазон $p_{ф.к.}$ составил 474–516 бар, в среднем 495 бар. Угол впрыскивания $\Phi_{вп.}=19,5$ –22°ПРВ, а среднее значение – 20,64°ПРВ.

График зависимости начального давления $p_{нач.}$ от перемещения рейки представлен на рис. 5, 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. 5, а) показан переход рейки из положения минимальной в положение полной подачи.

Передний фронт кривых одинаков по форме общих участков давления в канале и перемеще-

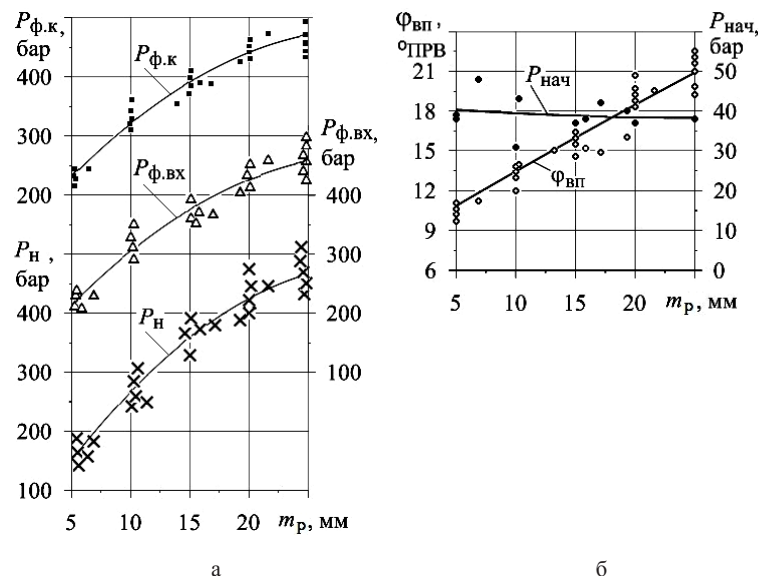


Рис. 5. Зависимость параметров топливоподачи от положения рейки топливного насоса высокого давления в динамическом режиме

Источник: разработано авторами

ния 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.

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. 4, а) 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. 4, б–г). При этом закономерности сохраняются для перемещения рейки, как в большую, так и в меньшую сторону.

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. 5, а, б) используем формулы:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(y_{\text{экс}} - y_{\text{апп}})^2}{n}}, \quad \delta = \frac{\sigma}{y_{\text{ср}}} \cdot 100\%$$

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

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

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

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

n – полный объем выборки.

Список литературы:

1. 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.
2. Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів: пат. на корисну модель u201805581 Україна; заявл. 21.05.2018. URL: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=255858>
3. Марков В.А., Полухин Е.Е. Переходные процессы дизеля с системой регулирования угла опережения впрыскивания топлива. *Известия вузов Машиностроение*. 2008. № 5. С. 33–65.
4. Фомин Ю.Я., Никонов В.Г., Ивановский В.Г. Топливная аппаратура дизелей: справочник. Москва: Машиностроение, 1982. 168 с., ил.

References:

1. Polovynka E.M., Slobodianiuk N.V. (2018). Vlyaniye nachalnykh uslovyi na protsess toplyvopodachy sredneoborotnoho sudovoho dyzelia na peremennykh rezhymakh [Influence of the initial conditions on the process of fuel supply of a medium-speed marine diesel engine on variable conditions]. *American Scientific Journal*, 19, 51–59.
2. Stend dlia doslidzhennia i rehulivannia palyvnoi aparatury dyzeliv: pat. na korysnu model u201805581 Ukrainy; zaivl. 21.05.2018. Available at: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=255858>
3. Markov V.A., Polukhyn E.E. (2008). Perekhodnye protsessy dyzelia s sistemoi rehulyrovanyia uhla operezhenyia vpryskyvaniya toplyva [Transients of a diesel engine with a fuel injection timing control system]. *Yzvestiya vuzov Mashynostroenye*, 5, 33–65.
4. Fomyn Ju.Ja., Nykonov V.Gh., Yvanovskiy V.Gh. (1982). Toplyvnaja apparatura dyzelej [Diesel fuel equipment]. Moskva: Mashynostroenye. (in Russian)

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 $\varphi_{\text{вп}}$ $\delta=3\%$.

Выводы.

1. Созданные программно-аппаратные средства управления режимами, записи и обработки параметров впрыскивания топлива позволили провести стендовые испытания системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля в режиме нагрузочной характеристики, а программа ReikaXP обеспечила реализацию плана эксперимента под управлением персонального компьютера.

2. При испытаниях реализован ступенчатый закон перемещения рейки во всём рабочем диапазоне с заданными периодами нахождения в каждом положении, в результате чего построена нагрузочная характеристика системы впрыскивания с пятью фиксированными положениями топливной рейки насоса высокого давления, что в целом позволило получить основные параметры топливоподачи, которые составили следующие значения: $p_{\text{ф.к}}=474-232$ бар; $p_{\text{ф.вх}}=457-222$ бар; $p_{\text{н}}=445-162$ бар в охватываемом эксплуатационном диапазоне положений рейки ($m_p=25-5$ мм).

3. Анализ характеристик движения рейки ТНВД дает возможность решить задачу определения параметров переходных процессов топливоподачи. Учитывая, что время перехода рейки не превышало 0,44 с., а при том, что время изменения процесса впрыскивания (настройки) было не более 0,22 с., можно полагать, что процесс топливоподачи в реальных условиях переходных режимов следует положениям рейки ТНВД.