

УДК 621.431.74

СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ СУДОВОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ НА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

Половинка Э.М., Слободянюк Н.В.

Национальный университет «Одесская морская академия»

В статье представлены результаты экспериментального исследования скоростных характеристик системы впрыскивания судового среднеоборотного дизеля при различных начальных условиях. Показано, что начальные параметры заметно влияют на процесс разгона, не сказываясь на выбеге. Возможно формирование условий ступенчатого и дробного впрыскивания. Проведено экспериментальное исследование скоростных характеристик системы топливоподачи на переменных режимах при различных начальных условиях.

Ключевые слова: процесс впрыскивания, ступенчатая подача, среднеоборотный дизель, переменные режимы.

Постановка проблемы. Как указывалось в работе авторов [1, с. 141], переменные режимы являются неблагоприятными условиям работы двигателей.

Пуск двигателя, прогрев на холостых оборотах, увеличение и уменьшение мощности сопровождается нестабильной работой всех систем двигателя. Нестабильность работы топливной системы приводит к неодинаковой дозировке порции топлива по цилиндрам, перегрузке одних и недогрузке других цилиндров. А неодинаковые углы начала впрыскивания топлива по цилиндрам обуславливают разные значения максимального давления сгорания и температуры выпускных газов на эксплуатационных режимах.

На пусковых режимах при малых частотах вращения коленчатого вала и большой цикловой подачи в топливной системе высокого давления происходят сложные гидродинамические явления, вызывающие неустойчивую работу форсунки. Давление топлива перед форсункой незначительно превышает давление начала впрыскивания, в результате игла после первого подъема совершает колебательные движения. Таким образом решение данной проблемы является актуальным и своевременным.

Анализ основных исследований и публикаций. Славуцким В.М. [2, с. 26] исследовалось перемещение нагнетательного клапана и иглы форсунки высокооборотного дизеля на пусковых оборотах вращения вала топливного насоса на 100, 150 и 200 об/мин. При всех значениях частоты вращения вала насоса игла форсунки 7-8 раз поднимается, не достигая максимальной высоты (рис. 1).

При этом нагнетательная магистраль разгружалась в период посадки клапана, что приводило к нарушению процесса впрыскивания в следующем цикле.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В области исследования переменных режимов топливоподачи в дизелях остаются недостаточно раскрытыми особенности формирования параметров впрыскивания при непрерывном измерении частоты вращения. Последнее характерно для пусков и переходных режимов в условиях изменения нагрузки дизеля. Раскрытие гидродинамических процессов в этих условиях расширит возможности совершенствования работы дизелей на указанных режимах, а также

уточнит методы расчёта впрыскивания и связанных с топливоподачей рабочих процессов.

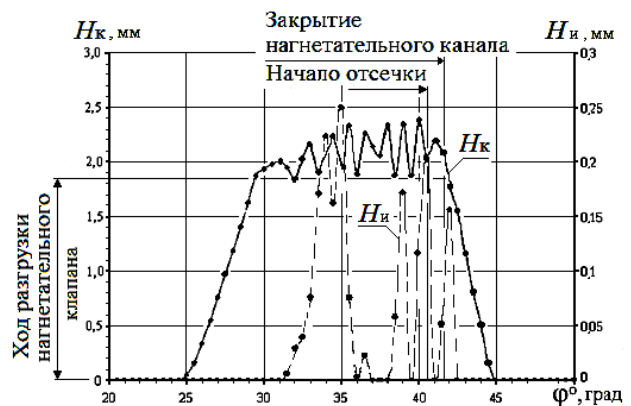


Рис. 1. Зависимость перемещения иглы форсунки H_n и нагнетательного клапана H_k от угла поворота вала насоса φ : $n_n = 200 \text{ мин}^{-1}$

Источник: [2]

Цель статьи. Целью проведенных исследований является решение актуальной научно-практической задачи по улучшению пусковых качеств и динамических характеристик среднеоборотных дизелей.

Изложение основного материала. На кафедре Судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия» процессы топливоподачи дизельной топливной аппаратурой на неустановившихся и частичных режимах исследуются на безмоторном стенде [1, с. 143]. В качестве основного варианта комплектации системы впрыскивания используется топливная аппаратура судового среднеоборотного дизеля ЧН 25/34 с основными параметрами, представленными в табл. 1.

В ходе эксперимента системой приема и обработки информации записывались на персональный компьютер следующие показатели:

- давление топлива в штуцере топливного насоса p_n ;
- давление топлива в штуцере форсунки $p_{ф.вх}$;
- давление в топливном канале форсунки $p_{ф.к}$;
- ход иглы форсунки z ;
- определялась частота вращения распределительного вала n_p ;
- фиксировался угол поворота распределительного вала (ПРВ) φ ;

– измерялось время с момента начала записи осциллограмм τ .

Таблица 1
Параметры топливной аппаратуры

Параметры	Показатели
диаметр плунжера топливного насоса d_n , мм	16
ход плунжера топливного насоса h_n , мм	16
давление начала впрыскивания p_o , бар	210
диаметр иглы форсунки d_u , мм	6
ход иглы форсунки z_{max} , мм	0,45
наружный D_T и внутренний d_T диаметр, длина L_T топливопровода высокого давления, мм	10; 3; 955

Источник: [3]

Выход рейки топливного насоса высокого давления в эксперименте составлял $m = 15$ мм. Давление затяжки форсуночной пружины $p_o = 70$ бар.

В ходе продолжения исследований [1, с. 142] проведен эксперимент с закрытой форсункой и двумя вариантами начальных условий. В первом варианте система высокого давления разгружалась перед опытом, т.е. начальное давление было нулевым. Во втором варианте – запуск производился после кратковременной остановки стенда. При этом в системе сохраняется остаточное давление, а его величина зависела условий в системе в момент остановки и утечек за время стоянки.

Алгоритм управления экспериментальной установкой был прежним. Предварительно устанавливалась максимальная частота вращения для разгона, задавая напряжение питания элек-

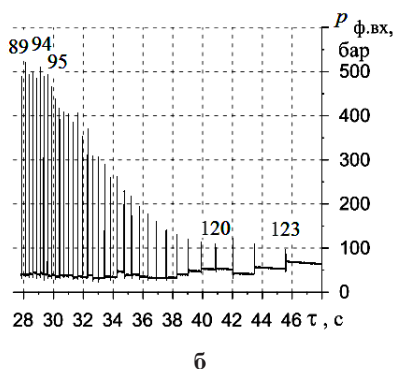
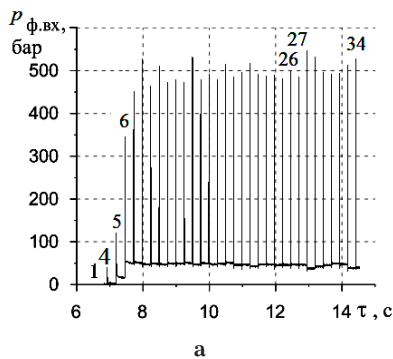


Рис. 2. Изменение давления $p_{ф.вх}$ в течении эксперимента при начальном давлении топлива равно нулю:

- а – разгон $n_p = 0-245$ об/мин;
б – выбег $n_p = 245-0$ об/мин.

Источник: разработано авторами

тродвигателя на стенде. После остановки путём выключения питания и остановки стенда запускалась запись процесса и подавалось полное напряжения на электродвигатель (режим разгона). Осуществлялась выдержка на максимальной частоте (установившийся режим), питание отключалось, с падением частоты вращения стенд останавливался (режим выбега).

В результате обработки экспериментальных осциллограмм получено два графика (рис. 2, 3) зависимости максимального давления $p_{ф.вх}$ от времени с момента начала записи и номера цикла (с начала вращения распредвала). На рисунках время указано на оси абсцисс, а номер цикла приведен на поле графика.

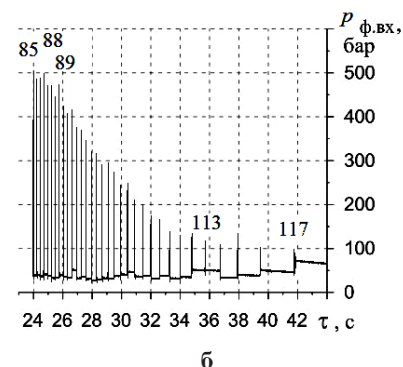
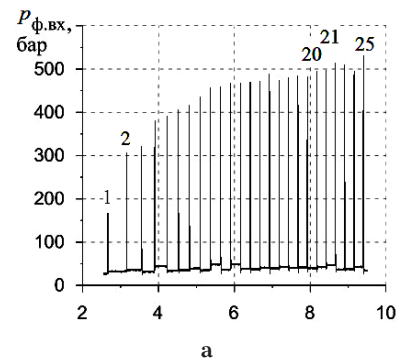


Рис. 3. Изменение давления $p_{ф.вх}$ в течении эксперимента при начальном давлении топлива:

- а – разгон $n_p = 0-245$ об/мин;
б – выбег $n_p = 245-0$ об/мин.

Источник: разработано авторами

Как следует из графиков рис. 2, 3, продолжительность первого эксперимента составила 48 с и 123 цикла, второго 44 с и 117 циклов. Количество циклов в первом эксперименте при разгоне составила 26, во втором 20. При выбеге количество циклов в первом и во втором эксперименте одинаково по 29.

Процессы, происходящие в топливной системе при разгоне в обоих экспериментах (рис. 2а, 3а) заметно отличаются, в то время как при выбеге они близки как по времени, так и по характеру изменения давления (рис. 2б, 3б).

Для оценки динамики переходных процессов важно учитывать изменение текущей частоты вращения. Такая оценка представлена тахограммами (рис. 4), где приведены значения частоты вращения за период впрыскивания.

Смещение кривых на рис. 4 определяется различием во времени между началом записи и запуском стенда. Кроме того, возможно некоторая

разница во времени выдержки при стабильной (установившейся) частоте вращения.

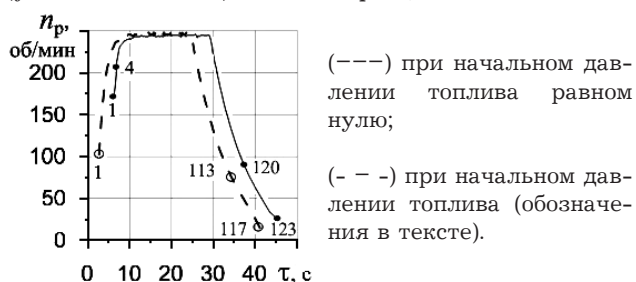


Рис. 4. Тахограммы экспериментов

Источник: разработано авторами

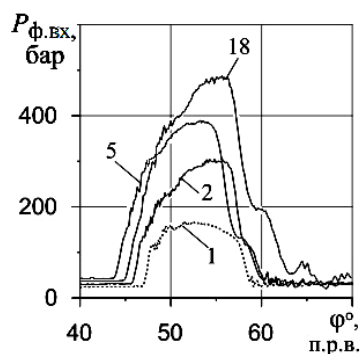
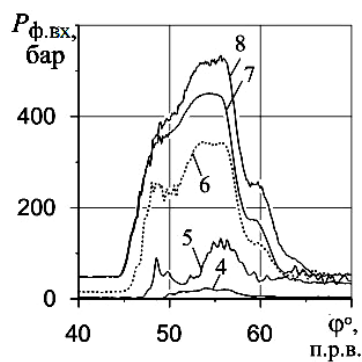


Рис. 5. Осциллограммы $p_{ф.вх}$ при разгоне:

а – при разгруженной топливной системе;

б – с начальным давлением;

(- - -) цикл первого стабильного впрыскивания (обозначения в тексте)

Источник: разработано авторами

Тахограммы обоих экспериментов не имеют существенных отличий. Время разгона в первом эксперименте с 1 по 26 циклов составило 6,16 с. Во втором эксперименте с 1 по 20 циклов 5,5 с.

Время выбега в первом эксперименте от 95 цикла до 120 цикла (последний цикл устойчивого впрыскивания) составило 11,53 с. Во втором эксперименте с 89 цикла по 113 (последний цикл устойчивого впрыскивания) цикл – 10,71 с.

Тахометрические параметры циклов по фазам эксперимента (разгона и выбега) сведены в табл. 2.

Исследование давления рф.вх выполним, используя характеристики эксперимента, приведенные в табл. 2. При начальном давлении топлива равном нулю в течение первых пяти циклов в диапазоне $n_p = 173-229$ об/мин давление $p_{ф.вх}$ последовательно возрастает, достигая уровня открытия иглы форсунки.

Осциллограммы $p_{ф.вх}$ обоих вариантов начальных условий при разгоне показаны на рис. 5.

Во втором эксперименте (рис. 5б) условия первого впрыскивания во время разгона создаются уже на первом обороте вала при $n_p = 102$ об/мин.

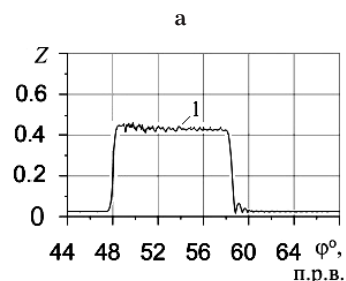
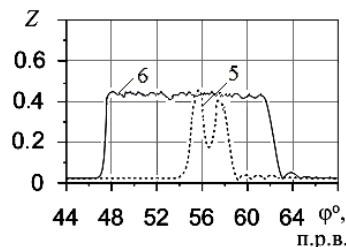


Рис. 6. Перемещение иглы форсунки в первых циклах разгона (пуска):

а – при начальном давлении топлива равном нулю;

б – при остаточном начальном давлении топлива

Источник: разработано авторами

Таблица 2

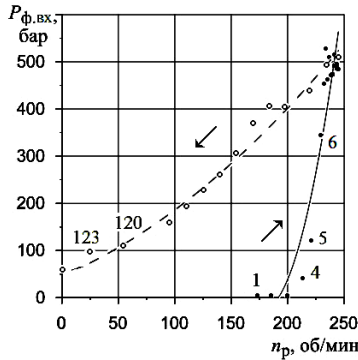
Тахометрические параметры эксперимента

Фаза эксперимента	Условия опыта			
	при разгруженной системе		с начальным давлением	
	№ циклов	нр, об/мин	№ циклов	нр, об/мин
разгон	-	-	-	-
циклы на участке разгона, при которых условия впрыскивания не сформировались	1 – 4	173-213	-	-
ступенчатое впрыскивание	5	221	-	-
первое стабильное впрыскивание	6	229	1	102
последний цикл впрыскивания на участке разгона	26	243	20	243
выбег	-	-	-	-
первый цикл на участке выбега	95	240	89	239
последний цикл на участке выбега	120	56	113	62
участок дробного впрыскивания	121- 123	46 – 25	114 – 117	54 – 8

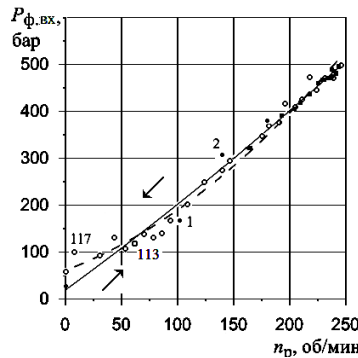
Источник: разработано авторами

При сравнении пятого и первого цикла (рис. 5а, 5б) видно, что в первом случае наблюдается существенный колебательный процесс. Во втором случае давление изменяется плавно. При дальнейшем увеличении частоты вращения различия становятся незначительными.

Описанные закономерности на рис. 5 подтверждаются кривыми хода иглы форсунки (рис. 6) в соответствующих циклах.



а



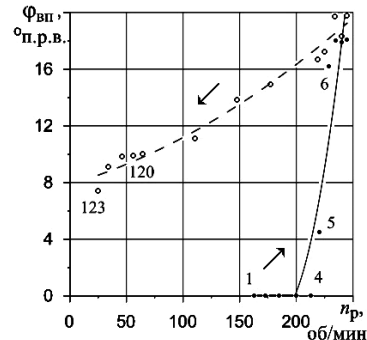
б

Рис. 7. Зависимость параметров топливоподачи от частоты вращения на переменных режимах при различных начальных условиях:
а – топливная система разгружена; б – в топливной системе остаточное давление; (— · —) разгон; (° - -) выбег (обозначения в тексте)

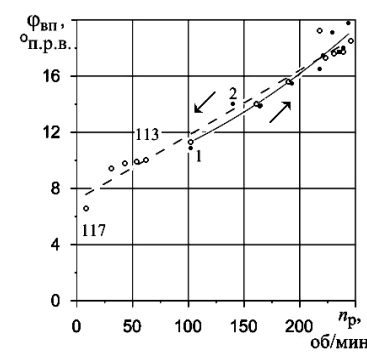
Источник: разработано авторами

Действительно, пятый цикл разгона первого эксперимента (рис. 6а) является ступенчатым. При этом продолжительность впрыскивания значительно меньше, чем в последующем шестом цикле, а начало смещено по углу поворота в сторону запаздывания.

Параметры топливоподачи, полученные в течение всего эксперимента, представлены в графической (рис. 7, 8) и табличной (табл. 3, 4)



а



б

Рис. 8. Зависимость параметров топливоподачи от частоты вращения на переменных режимах при различных начальных условиях:
а – топливная система разгружена; б – в топливной системе начальное давление; (— · —) разгон; (° - -) выбег (обозначения в тексте)

Источник: разработано авторами

Таблица 3

Параметры топливоподачи при начальном давлении в топливной системе равном нулю (первый эксперимент)

п/н, цикла	n_p , об/мин	τ , с	$p_{ф.вх.}$, бар	$p_{ф.к.}$, бар	$p_{н.}$, бар	$\phi_{вп}$ °, п.р.в.	участок
1	173	6,28	1-2	1-2	3	0	разгон
2	185	6,57	2	1-2	5	0	разгон
3	200	6,83	2	1-2	7	0	разгон
4	213	6,91	40	20	55	0	разгон
5	221	7,19	121	125	118	4,5 ступенчатое впрыскивание	разгон
6	229	7,46	344	345	381	16,2	первое стабильное впрыскивание
26	243	12,45	500	501	532	18	разгон
95	240	29,34	490	485	529	18,2	выбег
120	56	40,87	111	105	128	9,9	выбег
121	46	42,04	119	109	116	9,8 дробное впрыскивание	выбег
123	25	45,53	100	95	99	7,4 дробное впрыскивание	выбег
-	0	50,83	55	63	58	0	остановка распределительного вала

Источник: разработано авторами

форме. В таблице для каждого цикла указана текущая частота вращения (средняя за период впрыскивания) n_p , время τ (от начала процесса), давления $p_{ф.вх}$, $p_{ф.к}$, p_n и угол впрыскивания $\varphi_{вп}$.

Данные, изложенные в таблицах и графиках, позволяют проследить развитие процесса топливоподачи в течение всего эксперимента.

Для давления топлива $p_{ф.вх}$ (рис. 7а) существенной особенностью является отсутствие за-

метного повышения в первых трёх циклах в процессе разгона, несмотря на достаточно высокую частоту вращения. Только в четвёртом цикле начинается рост давления до 40 бар, которого недостаточно для подъёма иглы форсунки. Условия первого впрыска формируются в пятом цикле.

Во втором эксперименте с остаточным начальным давлением топлива 27 бар при разгоне уже на первом обороте при относительно невы-

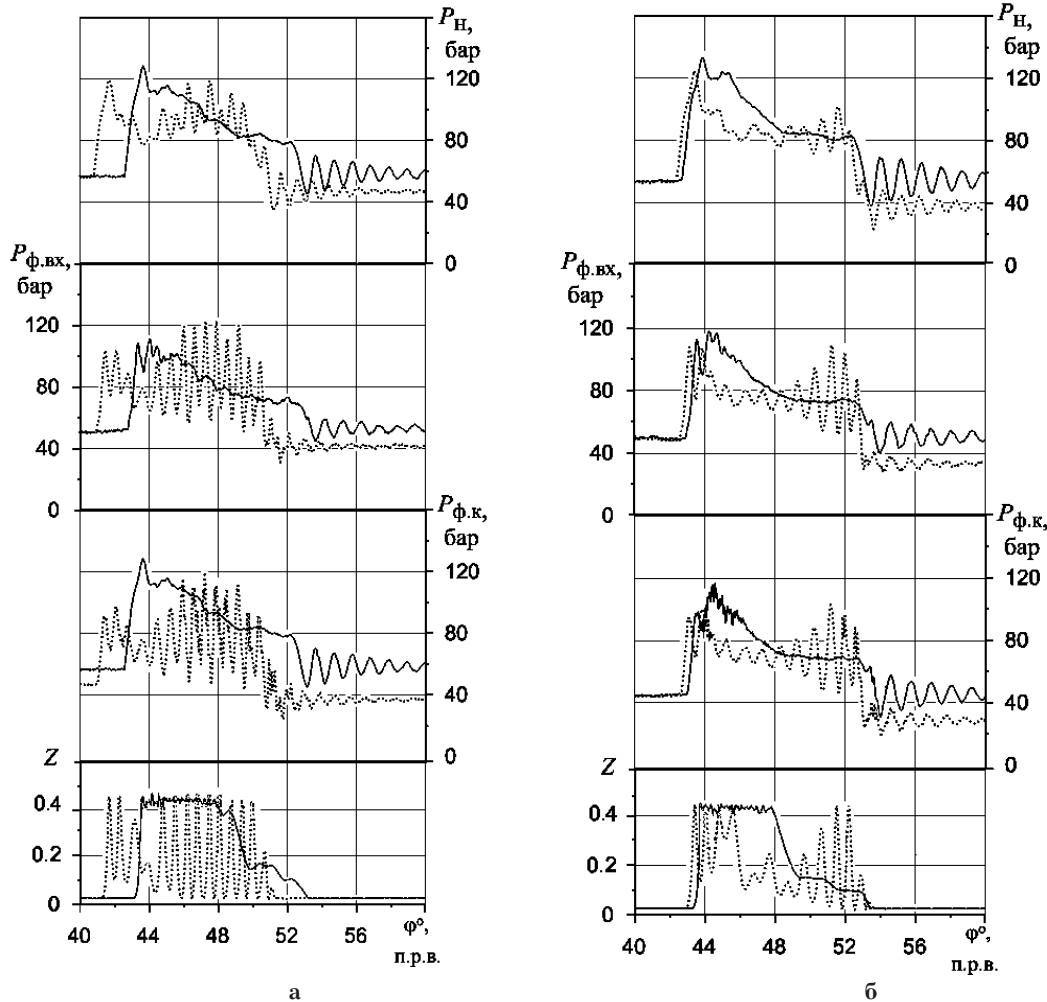


Рис. 9. Совмещённые осциллограммы впрыскивания на участке выбега:

а – эксперимент при начальном давлении равном нулю: (—) 120 цикл, (· · ·) 121;
 б – эксперимент при начальном давлении топлива: (—) 113 цикл, (· · ·) 114 цикл

Источник: разработано авторами

Таблица 4

Параметры топливоподачи при начальном давлении в топливной системе (второй эксперимент)

п/н, цикла	n_p , об/мин	τ , с	$p_{ф.вх}$, бар	$p_{ф.к}$, бар	p_n , бар	$\varphi_{вп}$, °, п.р.в.	участок
-	0	0	27	27	28	0	остаточное давление в ТС
1	102	2,66	166	163	188	10,8	первое впрыскивание
2	140	3,16	307	301	329	14	разгон
20	243	8,17	493	486	529	17,9	разгон
89	239	24,97	471	463	510	17,7	выбег
113	62	35,68	118	110	131	10,0	выбег
114	54	36,7	107	100	123	9,9 дробное впрыскивание	выбег
117	8	41,76	98	88	79	6,6 дробное впрыскивание	выбег
-	0	47,32	58	54	62	0	остановка распределительного вала

Источник: разработано авторами

сокой частоте вращения давление соответствует стабильному впрыскиванию и достигает (рис. 7б) $p_{ф.вх} = 166$ бар.

Характер изменения давления $p_{ф.вх}$ на выбеге во втором эксперименте близок к разгону. К тому же изменения давления $p_{ф.вх}$ при выбеге в обоих экспериментах подобны по конфигурации, что соответствует отмеченному ранее соотношению количества циклов и времени процесса.

Дополняя приведенную выше информацию по характеристикам топливоподачи данными, представленными в табл. 3 и анализируя рис. 7, укажем продолжительность впрыскивания в пятом и шестом циклах для разгона. Это $\varphi_{вп} = 4,5^\circ$ ПРВ при $n_p = 221$ об/мин (ступенчатое впрыскивание – пятый цикл) и $\varphi_{вп} = 16,2^\circ$ ПРВ и $n_p = 229$ об/мин (шестой цикл). Последняя величина близка к установившемуся значению.

Во втором эксперименте при первом же обороте игла поднимается на $\varphi_{вп} = 10,9^\circ$ ПРВ при $n_p = 102$ об/мин.

При дальнейшем увеличении оборотов, углы поворота распределительного вала увеличиваются до номинальных.

При снижении частоты вращения в период выбега дробное впрыскивание формируется в обоих опытах. Это происходит при изменении частоты вращения в диапазоне 56–46 и 62–54 об/мин.

Характер движения иглы и соответственно, угол впрыскивания определяется сложным ходом волновых процессов в топливной системе. Наиболее существенно их влияние при малых давлениях топлива и частоте вращения. В этих условиях наблюдается дробное впрыскивание. Факты дробного впрыскивания наглядно представлены на рис. 9.

При выбеге снижении частоты вращения формирует условия дробного впрыскивания при переходе с 120 к 121 и с 113 к 114 циклам соответственно первого и второго экспериментов.

Изменение частоты вращения составило 56–46 и 62–54 об/мин соответственно. Параметры колебаний для указанных циклов сведены в табл. 5.

Таблица 5

Характеристика колебаний иглы форсунки (дробное впрыскивание)

Параметры колебания	Номер цикла	
	121	114
количество подъемов иглы форсунки	13	12
частота колебания подъема иглы форсунки, Гц	430	368
количество пиков давления $p_{ф.вх}$	14	11
частота колебания давления $p_{ф.вх}$, Гц	445	425
давление $p_{ф.вх}$ max/min, бар	120/45	109/52

Источник: разработано авторами

Выводы. Проведено исследование процессов топливоподачи в условиях переменной частоты вращения при различных исходных параметрах.

Существенное влияние на развитие характеристик впрыскивания при разгоне оказывает начальное давление в системе.

В разгруженном состоянии в процессе увеличения частоты вращения (при разгоне) требуется несколько циклов (в эксперименте четыре оборота) для подготовки условий первой подачи. При этом первый цикл характерен ступенчатым перемещением иглы форсунки.

При наличии в системе даже невысокого начального давления (в опытах 27 бар) устойчивое впрыскивание наблюдается уже на первом обороте распределительного вала.

Характер изменения параметров топливоподачи при снижении частоты вращения (выбеге) не зависит от начальных условий эксперимента. В обоих опытах два последних цикла реализованы в режиме дробной работы форсунки.

Список литературы:

1. Половинка Э.М. Процесс впрыскивания топлива в судовом среднеоборотном дизеле на переменных режимах / Э.М. Половинка, Н.В. Слободянюк. – Одесса: Судовые энергетические установки. – 2016. – Вып. 36. – С. 141–151.
2. Славуцкий В.М. Об интенсификации процесса подачи топлива в дизеле на режиме пуска: сборник научных статей / В.М. Славуцкий, А.В. Курапин, В.В. Славуцкий. – Волгоград: Известия Волгоградского государственного технического университета, – 2014. Вып. 18(145). – С. 26–30.
3. Техническая документация дизеля 6ЧН25/34. Техническое описание дизеля 6ЧН25/34. – Первомайский машиностроительный завод, – 2011. – С. 53.

Половинка Е.М., Слободянюк М.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

ШВИДКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ПАЛИВА СУДОВОГО СЕРЕДНЬООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ НА ЗМІННИХ РЕЖИМАХ

Анотація

У статті представлені результати експериментального дослідження швидкісних характеристик системи упорскування судового середньооборотного дизеля при різних початкових умовах. Показано, що початкові параметри помітно впливають на процес розгону, що не позначаються на вибігу. Можливе формування умов ступеневої і дрібногo впорскування. Проведено експериментальне дослідження швидкісних характеристик системи подачі палива на змінних режимах при різних початкових умовах.

Ключові слова: процес впорскування, ступінчата подача, середньооборотний дизель, змінні режими.

Polovinka E.M., Slobodianiuk N.V.
National University «Odessa Maritime Academy»

VELOCITY CHARACTERISTICS OF MARINE MEDIUM-REVERSE DIESEL FUEL-HANDLING SYSTEM AT VARYING DUTIES

Summary

The article presents the results of the experimental research of high-speed characteristics of marine medium-reverse diesel injection system at various initial conditions. It is shown that the initial parameters significantly affect the process of acceleration without affecting the run-down. It can form conditions of stepped and fractional injection. An experimental study of high-speed characteristics of the fuel system on the variable modes for different initial conditions.

Keywords: the process of fuel injection, stepped feed, medium-reverse diesel, varying duties.