

Н.В. Слободянюк

ПРОЦЕСС ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА НА СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

Представлены результаты экспериментального исследования особенностей процесса топливоподачи на скоростной характеристике среднеоборотного судового дизельного двигателя в условиях переменных режимов. Изучение гидродинамических процессов для указанных характеристик расширяет возможности совершенствования работы дизеля, а также дает возможность уточнить методы расчета процессов, связанных с топливоподачей. Экспериментальные исследования выполнены на безмоторном стенде при различных начальных условиях с доводкой измерительного комплекса. Первый вариант – перед запуском топливная система высокого давления разгружалась. Вторым вариантом – запуск безмоторного стенда производился после кратковременной остановки; при этом в системе сохраняется остаточное давление после первого варианта запуска. Обобщенные результаты проведенного экспериментального исследования позволили оценить процесс развития топливоподачи в течении всего эксперимента. При этом в первом варианте существенной особенностью является отсутствие заметного повышения давления в форсунке при первых трёх циклах впрыскивания в процессе разгона, несмотря на достаточно высокую частоту вращения распределительного вала. Только в четвёртом цикле получен рост давления до 40 бар, которого недостаточно для подъёма иглы форсунки. Условия первого впрыска формируются в пятом цикле (фаза ступенчатого впрыскивания). Во втором варианте с начальным давлением в топливной системе 27 бар при разгоне уже на первом обороте при относительно невысокой частоте вращения величина давления соответствует условиям впрыскивания и достигает 166 бар. Таким образом, начальное давление в топливной системе при разгоне оказывает существенное влияние на развитие характеристики впрыскивания, что и является специфической особенностью работы дизельного двигателя на переменных режимах. Особенностью формирования параметров впрыскивания при выбеге является то, что параметры процесса в обоих вариантах не зависят от начальных условий в топливной системе. Учет особенностей процесса впрыскивания при непрерывно меняющейся частоте вращения позволит повысить надёжность работы судовых дизелей при маневрировании и обеспечит совершенствование рабочих процессов дизелей на переменных режимах.

Ключевые слова: процесс впрыскивания; дизельный двигатель; гидродинамические процессы; безмоторный стенд; топливная система; ступенчатая подача; рабочий процесс дизеля.

Введение

Дизельные двигатели являются основой энергетики судов различного назначения. Особенностью эксплуатации дизелей является то, что значительную часть времени они работают на переменных режимах в условиях изменяющихся нагрузок природного и эксплуатационного происхождения (например: движение судна по волне, в ледовых условиях, маневрирование и т.д.). В качестве примера можно привести запись параметров судового главного двигателя в процессе маневрирования при входе в порт, представленную на рис. 1 [1].

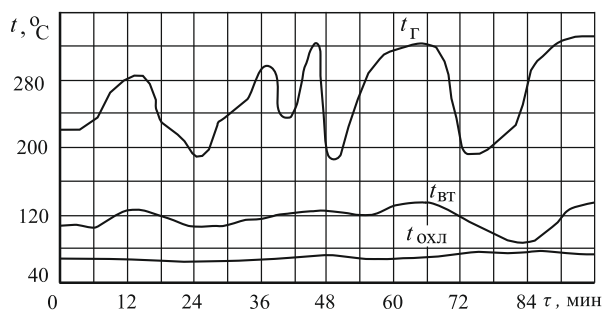


Рис. 1. Изменения режимов работы двигателя при маневрировании судна:

t_{Γ} – температура выпускных газов; $t_{\text{ВТ}}$ – температура втулки цилиндра; $t_{\text{ОХЛ}}$ – температура охлаждающей воды

Основным фактором, влияющим на рабочий процесс двигателя на переменных режимах, является нестабильность процесса впрыскивания топлива. Этот фактор составляет особенность работы дизельного двигателя в режиме пуска и маневрирования.

Выделение нерешенных ранее частей проблемы

В области экспериментального исследования топливоподающей аппаратуры на переменных режимах в дизельных двигателях остаются недостаточно раскрытыми особенности эволюции параметров впрыскивания при непрерывно изменяющейся частоте вращения вала двигателя.

Данная эксплуатационная характеристика актуальна для пусковых и неустановившихся режимов. Изучение гидродинамических процессов для указанных характеристик расширяет возможности совершенствования работы дизеля, а также дает возможность уточнить методы расчета процессов топливоподачи.

Объект исследования

Объектом исследования в данной работе является процесс топливоподачи среднеоборотного дизеля на переменных режимах.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является получение и оценка параметров топливоподачи на скоростной характеристике среднеоборотного дизеля в условиях переменных режимов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- разработка методики экспериментального исследования скоростной характеристики системы впрыскивания в условиях динамических испытаний;
- сборка и доводка измерительного комплекса;
- экспериментальное исследование процессов впрыскивания топлива в системе топливоподачи судового среднеоборотного двигателя в указанных условиях.

Анализ последних исследований

Результаты исследований работы топливоподающей аппаратуры на различных режимах рассмотрены в работах [2-4].

Так, например, в работе [4] приведены результаты экспериментальных исследований перемещения нагнетательного клапана и иглы форсунки высокооборотного дизеля на пусковых оборотах (вращения вала топливного насоса на 100, 150 и 200 мин⁻¹). При всех значениях частоты вращения вала насоса игла форсунки 7-8 раз поднимается, не достигая максимальной высоты (рис.2).

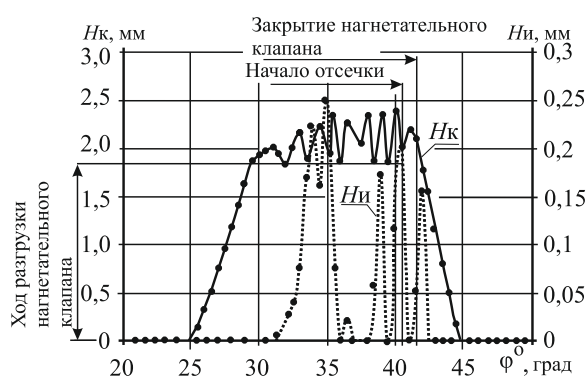


Рис. 2. Зависимости перемещения иглы форсунки H_n и нагнетательного клапана H_k от угла поворота вала насоса φ° : $n_v = 200 \text{ мин}^{-1}$

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

Полученные в [4] результаты не в полной мере описывают гидродинамические процессы топливоподачи. Публикуемые в нашей работе материалы представляют результаты детальных исследований процессов топливоподачи. Полученные данные

позволяют улучшить динамические характеристики дизелей и, в перспективе, оптимизировать рабочий процесс.

Изложение основного материала

Одним из подходов к решению поставленной задачи было создание и установка измерительной системы на безмоторном стенде для регистрации процессов в топливоподающей аппаратуре дизельных двигателей в условиях переменной частоты вращения.

Работа по оборудованию нового стенда была проведена на кафедре Судовых энергетических установок Национального университета "Одесская морская академия" (Украина) и представлена в виде патентов Украины на изобретение а201806815 [5] и на полезную модель u201805581 [6].

В качестве начального этапа исследований особенностей процессов впрыскивания на малых и переменных режимах целесообразно выполнить испытания с изменением частоты вращения при неизменных регулировочных параметрах системы впрыскивания.

Безмоторный стенд имеет следующие возможности:

- плавное регулирование и свободное изменение частоты вращения распределительного вала, во всем диапазоне рабочих частот исследуемой топливной аппаратуры, с возможностью исследования переходных режимов в установленном частотном диапазоне;

- многоканальный программно-аппаратный комплекс (тензостанция) существенно расширяет метрологические возможности благодаря свободному назначению необходимых масштабов фиксирования и высокой разрешающей способности цифрового представления информации в неограниченном объеме с возможностью непрерывной записи регистрируемых процессов на установившихся и переменных режимах.

Таблица 1. Параметры топливной аппаратуры дизеля ЧН25/34

| Топливный насос высокого давления | |
|---|------|
| диаметр плунжера топливного насоса $d_{п, мм}$ | 16 |
| ход плунжера топливного насоса $h_{п, мм}$ | 16 |
| Топливная форсунка (закрытого типа) | |
| давление начала впрыскивания $p_o, \text{ бар}$ | 210 |
| диаметр иглы форсунки $d_{и, мм}$ | 6 |
| ход иглы форсунки $z_{max, мм}$ | 0,45 |
| Топливопровод высокого давления | |
| наружный диаметр $D_T, мм$ | 10 |
| внутренний $d_T, мм$ | 3 |
| длина $L_T, мм$ | 955 |

В качестве основного варианта на безмоторном стенде исследовалась система впрыскивания топливной аппаратуры судового среднеоборотного дизеля ЧН25/34 с основными параметрами, представленными в табл.1.

В ходе эксперимента тензостанция принимала, обрабатывала и записывала 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 .

Кроме того – определялась частота вращения распределительного вала n_p ;

- фиксировался угол поворота распределительного вала (ПРВ) φ ;
- измерялось время с момента начала записи осциллограмм τ .

Выход рейки топливного насоса высокого давления в эксперименте составлял $m = 15$ мм.

Давление затяжки форсуночной пружины $p_o=70$ бар.

Программой эксперимента обеспечивалось последовательное повышение и снижение частоты

вращения от остановки и до пускового значения.

Кроме того, после набора установленной скорости вращения выдерживался промежуток времени, достаточный для стабилизации процесса впрыскивания.

В процессе проведения эксперимента предварительно был задан режим пусковой частоты путем установки необходимого напряжения на электродвигатель. Затем стенд был остановлен, и после начала записи осциллограммы тензостанцией, вновь запущен с ранее установленным напряжением. После выхода на пусковую частоту и стабилизации режима электродвигатель отключался, и происходил выбег системы до остановки. Запись осциллограмм тензостанцией велась непрерывно вплоть до остановки стенда.

Эксперимент проводился в соответствии и поставленными задачами при различных начальных условиях:

- первый вариант – перед запуском топливная система (ТС) высокого давления разгружалась;
- второй вариант – запуск безмоторного стенда производился после кратковременной остановки. При этом в системе сохраняется остаточное давление после первого варианта запуска.

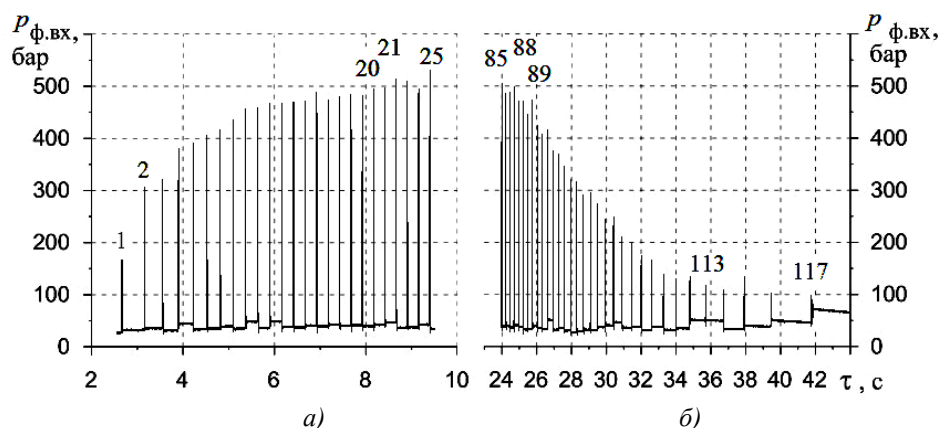


Рис. 3. Динамика давления $p_{ф.вх}$ в разгруженной топливной системе:
а – разгон, $n_p = 0 - 245 \text{ мин}^{-1}$; б – выбег, $n_p = 245 - 0 \text{ мин}^{-1}$

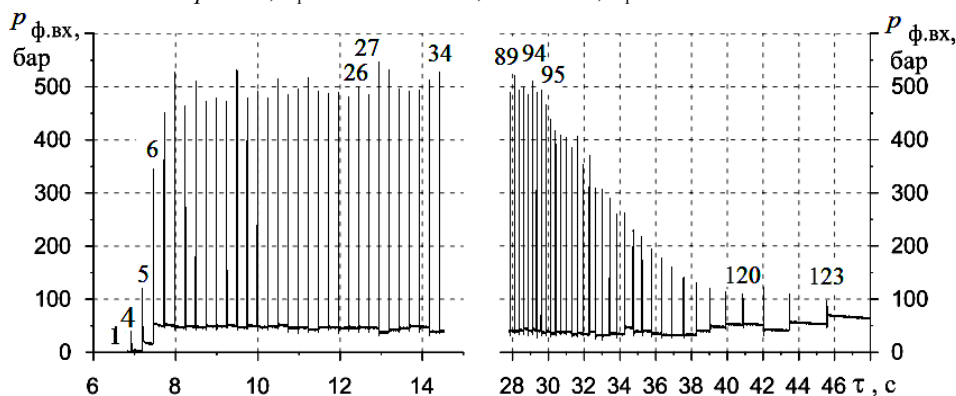


Рис. 4. Динамика давления $p_{ф.вх}$ в топливной системе с начальным давлением:
а – разгон, $n_p = 0 - 245 \text{ мин}^{-1}$; б – выбег, $n_p = 245 - 0 \text{ мин}^{-1}$

Результаты исследований

Результаты обработки двух вариантов начальных условий для экспериментальных значений представлены на рис.3, 4 в виде зависимости $p_{ф.вх.макс}=f(\tau)$ максимального давления на входе в форсунку от времени.

На рисунках время указано на оси абсцисс, а номер цикла приведен на поле графика.

Из рис.3, 4 следует, что продолжительность эксперимента при разгруженной топливной системе составила 48 с и 123 цикла, при начальном давлении она составила 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.

Следует отметить, что процессы в топливной системе при разгоне в обоих экспериментах (рис.3а, 4а) заметно отличаются; в то время при выбеге они близки как по времени, так и по характеру изменения давления (рис.3б, 4б).

Используя тахограммы $n_p=f(\tau)$ экспериментальных значений при различных начальных условиях, представленные на рис.5, выполняем оценку динамики переходных процессов при изменении текущей частоты вращения за период впрыскивания.

На рис.5 тахограммы при различных начальных условиях в топливной системе высокого давления имеют смещение, вызванное различием во времени между началом записи и запуском стенда, а также разницей во времени выдержки при установившейся частоте вращения. Графические кривые при наложении не имеют существенных отличий. Характеристики участков разгона при условии, что ТС разгружена, время разгона составило 6,16 с или 26 циклов впрыскивания. При условии, что в топливной системе имелось начальное давле-

ние, время разгона составило 5,5 с или 20 циклов впрыскивания.

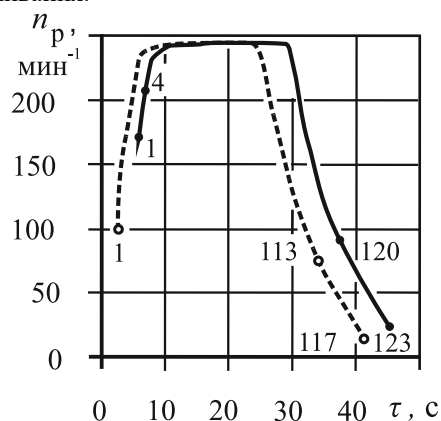


Рис. 5. Тахограммы экспериментов: (—) при разгруженной топливной системе; (- - -) топливная система с начальным давлением (обозначения в тексте)

Время выбега в обоих вариантах начальных условий в топливной системе высокого давления оказалась одинаковой и составила 10,71 с.

Тахометрические параметры фаз эксперимента в зависимости от начальных условий сведены в табл.2.

Из табл.2 следует, что $p_{ф.вх}$ на фазе разгона при разгруженной топливной системе в течение первых четырех и пятого циклов в диапазоне $n_p = 173-229$ мин⁻¹ давление $p_{ф.вх}$ последовательно возрастает, достигая уровня открытия иглы форсунки.

В эксперименте с начальным давлением условия первого впрыскивания на фазе разгона создаются уже на первом обороте вала при $n_p = 102$ мин⁻¹.

Фазы выбега в обоих вариантах начальных условий идентичны.

Осциллограммы $p_{ф.вх}$ для этих вариантов начальных условий при разгоне показаны на рис.6.

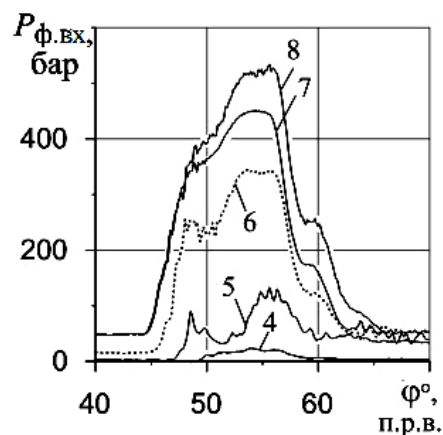
Таблица 2. Тахометрические параметры эксперимента

| Фаза эксперимента | Начальные условия | | | |
|--|-------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | ТС разгружена | | ТС с начальным давлением | |
| | № циклов | n_p , мин ⁻¹ | № циклов | n_p , мин ⁻¹ |
| 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 |

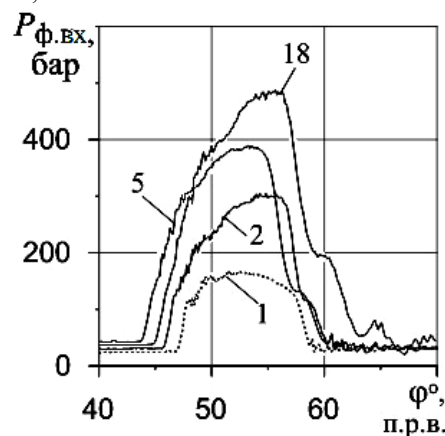
На рис.6а, 6б видно, что при разгруженной топливной системе наблюдаются существенные колебательные процессы. В топливной системе с начальным давлением колебательные процессы протекают более плавно. При дальнейшем увеличении частоты вращения различия становятся незначительными.

Описанные осциллограммы (рис.6) подтверждаются кривыми хода иглы форсунки (рис.7) в соответствующих циклах.

Из рис.7 следует, что при разгруженной топ-



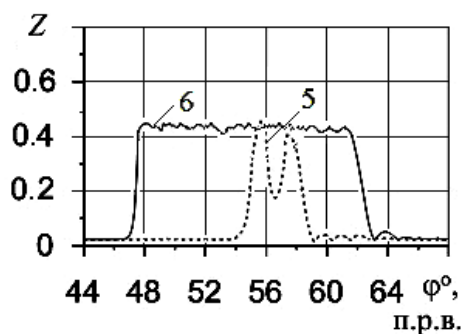
а)



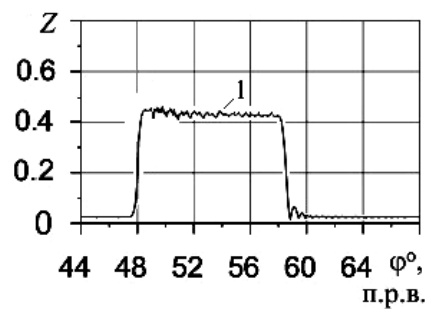
б)

Рис. 6. Осциллограммы $p_{ф.вх}$ при разгоне:

а – при разгруженной топливной системе; б – топливная система с начальным давлением: (---) цикл первого стабильного впрыскивания (обозначения в тексте)



а)



б)

Рис. 7. Перемещение иглы форсунки при разгоне:

а – при разгруженной топливной системе; б – топливная система с начальным давлением

Результаты проведенного экспериментального исследования, обобщенные в рис.8, 9 и табл.3, 4, позволили оценить процесс развития топливоподачи в течение всего эксперимента. При этом существенной особенностью является отсутствие заметного повышения давления $p_{ф.вх}$ (рис.8а) в первых трех циклах впрыскивания в процессе разгона, несмотря на достаточно высокую частоту вращения распределительного вала. Только в четвертом цикле начинается рост давления до 40 бар, которого

недостаточно для подъема иглы форсунки. Условия первого впрыска формируются в пятом цикле (фаза ступенчатого впрыскивания).

В эксперименте с начальным давлением в топливной системе ($p_{нач}=27$ бар) при разгоне уже на первом обороте при относительно невысокой частоте вращения величина давления соответствует параметру впрыскивания и достигает (рис.8б) $p_{ф.вх}=166$ бар.

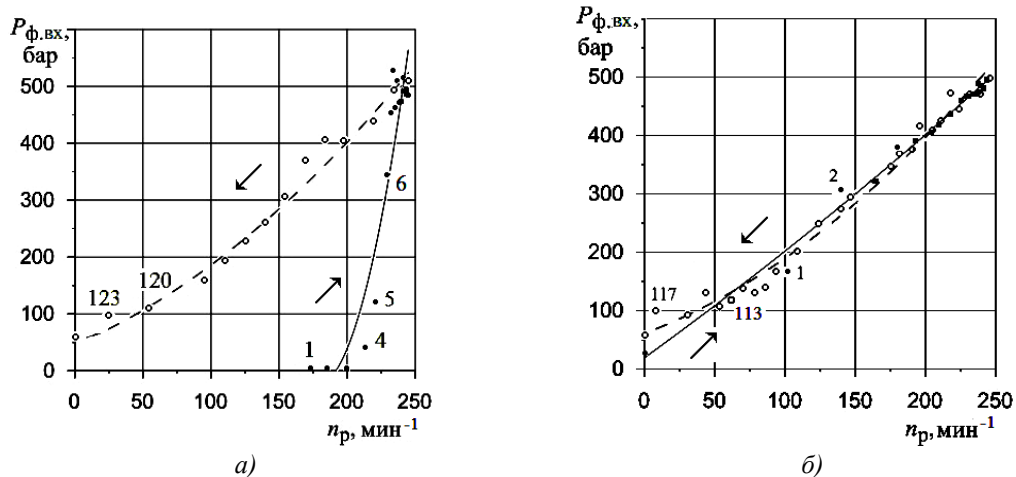


Рис. 8. Зависимость $p_{ф.вх}$ от частоты вращения на переменных режимах при различных начальных условиях: а – топливная система разгружена; б – топливная система с начальным давлением; (—•—) разгон; (- - -) выбег (обозначения в тексте)

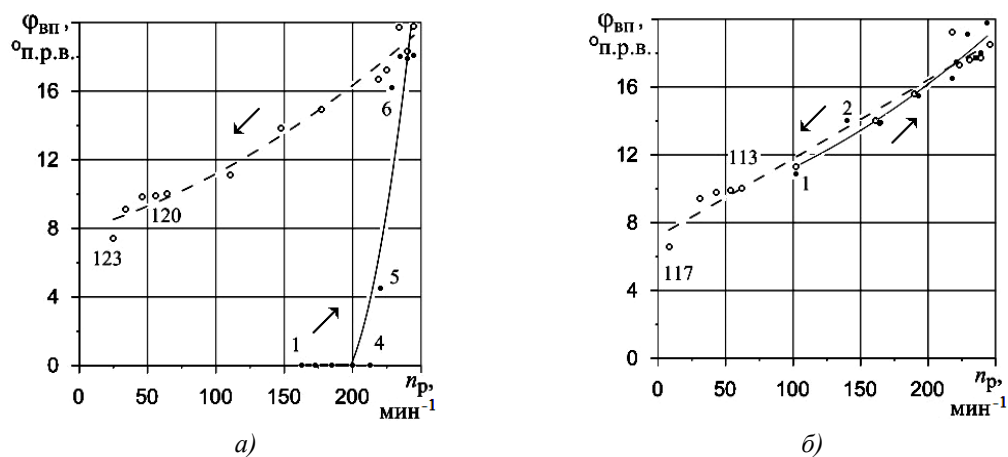


Рис. 9. Зависимость $\varphi_{вп}^{\circ}$ от частоты вращения на переменных режимах при различных начальных условиях: а – топливная система разгружена; б – топливная система с начальным давлением; (—•—) разгон; (-°- -) выбег (обозначения в тексте)

В эксперименте с начальным давлением в топливной системе характеристика кривой давления $p_{ф.вх}$ на выбеге близка к характеристике разгона. При этом изменения давления $p_{ф.вх}$ при выбеге в обоих экспериментах подобны по конфигурации, что соответствует отмеченному ранее соотношению количества циклов и времени процесса.

В табл.3, 4 для каждого цикла впрыскивания указана текущая частота вращения (средняя за период впрыскивания) n_p , продолжительность времени τ (от начала процесса), давления $p_{ф.вх}$, $p_{ф.к}$, p_n и угол впрыскивания $\varphi_{вп}$.

Следует отметить, что по характеристикам топливоподачи продолжительность впрыскивания в пятом и шестом циклах для разгона при разгруженной топливной системе составляет $\varphi_{вп}=4,5^{\circ}$ ПРВ при $n_p=221$ мин⁻¹ (ступенчатое впрыскивание) и $\varphi_{вп}=16,2^{\circ}$ ПРВ при $n_p=229$ мин⁻¹ (первое стабильное

впрыскивание). Последняя величина близка к установившемуся значению.

В топливной системе с начальным давлением во время разгона при первом же обороте игла поднимается на $\varphi_{вп}=10,9^{\circ}$ ПРВ при $n_p=102$ мин⁻¹. А при дальнейшем увеличении оборотов продолжительность общего угла впрыскивания стремится к установившимся значениям.

При выбеге дробное впрыскивание формируется в обоих вариантах экспериментального исследования. Дробное впрыскивание наблюдается при изменении частоты вращения в диапазоне 56-46 и 62-54 мин⁻¹.

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.

Таблица 3. Параметры топливоподачи в разгруженной топливной системе

| п/н, цикла | n_r , мин ⁻¹ | τ , с | $p_{ф.вх.}$, бар | $p_{ф.к.}$, бар | $p_{н.}$, бар | $\Phi_{вп}^{\circ}$, 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 |

Таблица 4. Параметры топливоподачи в топливной системе с начальным давлением

| п/н, цикла | n_r , мин ⁻¹ | τ , с | $p_{ф.вх.}$, бар | $p_{ф.к.}$, бар | $p_{н.}$, бар | $\Phi_{вп}^{\circ}$, 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 |

В этих условиях наблюдается дробное впрыскивание. Процессы дробного впрыскивания наглядно представлены на рис.10.

В разгруженной топливной системе условия дробного впрыскивания формировались на частоте вращения распределительного вала 56-46 мин⁻¹, 120 и 121 цикл. В топливной системе с начальным давлением условия дробного впрыскивания формировались при 62-54 мин⁻¹, 113 и 114 цикл.

Параметры иглы форсунки в дробных циклах при выбеге в обоих вариантах экспериментов показаны в табл.5.

Как следует из табл.5 особенностью параметров дробного впрыскивания в разгруженной топливной системе и в топливной системе с начальным давлением является их идентичность.

Выводы

Результаты экспериментального исследования особенностей процесса топливоподачи на скоростной характеристике дизельного двигателя в условиях переменных режимов, выполненные на безмоторном стенде, показали, что при разгоне в разгруженной топливной системе особенностью формирования параметров первого цикла впрыскивания стала ступенчатая характеристика перемещения иглы форсунки. Особенностью формирования параметров впрыскивания в топливной системе с начальным давлением (в опытах – 27 бар) является устойчивое впрыскивание, которое наблюдается уже на первом обороте распределительного вала.

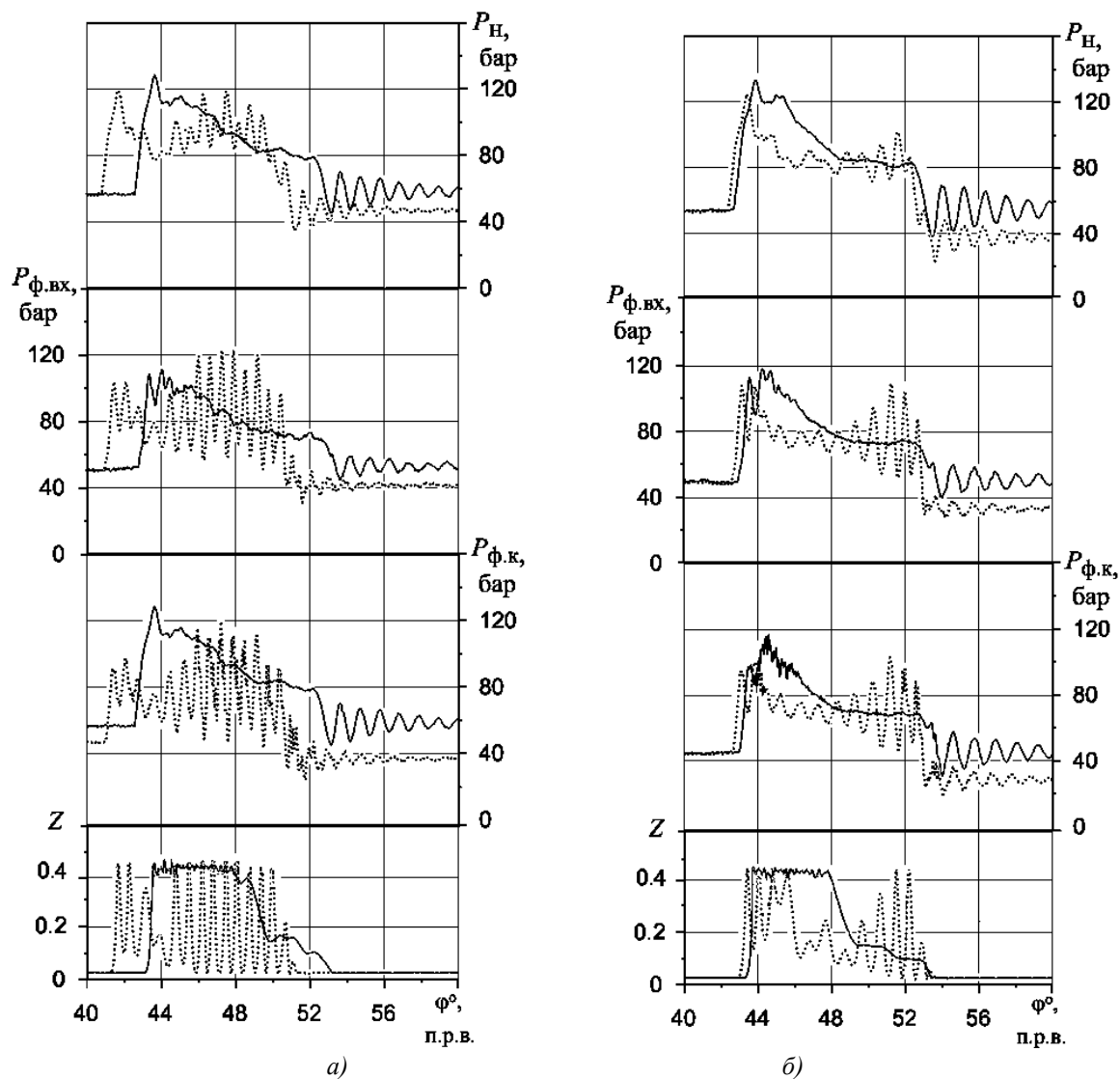


Рис. 10. Совмещённые осциллограммы впрыскивания на участке выбега:
 а – топливная система разгружена: (—) 120 цикл, (•••)121; б – топливная системе с начальным давлением:
 (—) 113 цикл, (•••)114 цикл

Таблица 5. Дробное впрыскивание при выбеге

| Характеристики впрыскиваний | Начальные условия | |
|---|----------------------------|---------------------------------------|
| | ТС разгружена, 121 цикл | ТС с начальным давлением, 114 цикл |
| количество подъемов иглы форсунки | 13 | 12 |
| частота колебания подъема иглы форсунки, Гц | 430 | 368 |
| количество пиков давления $p_{\phi.вх}$ | 14 | 11 |
| частота колебания давления $p_{\phi.вх}$, Гц | 445 | 425 |
| давление $p_{\phi.вх}$ max / min, бар | 120/45 | 109/52 |

Таким образом, начальное давление в топливной системе при разгоне оказывает существенное влияние на развитие характеристики впрыскивания, что и является специфической особенностью работы дизельного двигателя на переменных режимах.

Другой особенностью формирования параметров впрыскивания является то, что при выбеге в обоих вариантах исследуемые параметры не зависят от начальных в топливной системе.

Учет особенностей процесса впрыскивания при непрерывно меняющейся частоте вращения

позволит підвищити надійність роботи судових дизелів при маневруванні і забезпечити соприкращенство робочих процесів дизелів на перемінних режимах.

Список літератури:

1. Костин А. К. Работа дизелей в условиях эксплуатации: справочник / Пугачев Б. П., Кочинев Ю. Ю. за ред. А. К. Костина. – Ленинград : Машиностроение, 1989. – 284 с. 2. Патрахальцев Н.Н. Испытания и диагностирование дизелей с использованием неуставившихся режимов / А. К. Синицын, Д. Е. Соловьев // Вестник РУДН. – 2003. – № 1. – С. 132–134. 3. Патрахальцев Н.Н. Влияние переходного процесса в топливной аппаратуре дизеля на его пусковые характеристики / В. В. Харитонов, А. В. Фомин // Вестник РУДН. – 2004. – № 1(8). – С. 17–22. 4. Славуцкий В.М. Об интенсификации процесса подачи топлива в дизеле на режиме пуска / А. В. Курапин, В. В. Славуцкий // Известия Волгоградского государственного технического университета: сборник научных статей. – 2014. – № 18(145). – С. 26–30. 5. Пат. на полезную модель u201805581 Україна, МПК (2006)F02M 65/00. Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів / Половинка Э. М., Кириленко О. Н., Слободянюк Н. В.; заявитель и патентообладатель Национальный уни-

верситет “Одесская морская академия”. – № 132260 ; заявл. 21.05.2018; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 4.

Bibliography (transliterated):

1. Kostyn, A.K., Pugachev B.P., Kochinev Yu. Yu. (1989), “Operation of diesel engines in operating conditions”, a reference book [“Rabota dyzelei v uslovyakh ekspluatatsyy: spravochnyk”], Mashynostroeniye. Leningrad, 284 p. 2. Patrakhaltsev, N.N., Sinitsin, A.K., Solovov, D.E. (2003) “Testing and diagnosing diesel engines using transient modes”, [“Ysprytaniya y dyahmostyrovanye dyzelei s yspolzovanye neustanovyvshykhsia rezhymov”], Vestnyk RUDN, № 1, pp. 132-134. 3. Patrakhaltsev, N.N., Kharytonov, V.V., Fomyn, A.V. (2004), “The effect of the transient in the diesel fuel equipment on its starting characteristics”, [“Vlyaniye perekhodnoho protsessa v toplivnoi apparature dyzelia na ego puskovyye kharakterystyky”], Vestnyk RUDN, № 1 (8), pp. 17-22. 4. Slavutskiy, V.M., Kurapyn, A.V., Slavutskiy, V.V. (2014), “On the intensification of the fuel supply process in a diesel engine at start-up mode”, [“Ob yntensyfykatsyy protsessa podachy toplyva v dyzele na rezhyme pusk”], Bulletin of the Volgograd State Technical University: a collection of scientific articles, № 18(145), pp. 26-30. 5. Pat. u201805581 Ukraine, IPC (2006)F02M 65/00. Stand for research and regulation of diesel fuel equipment / Polovynka, E.M., Kyrylenko, O.M. and Slobodianiuk, N.V.; applicant and patent holder National University “Odessa Maritime Academy”. – № 132260 ; stated 21.05.2018; published 25.02.2019, Newsletter № 4.

Поступила в редакцію 20.09.2019 г.

Слободянюк Николай Васильевич – аспирант кафедры судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия», Одесса, Украина, e-mail: Nikgavr1234@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2248-0255>.

ПРОЦЕС ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА НА ШВИДКІСНІЙ ХАРАКТЕРИСТИЦІ СЕРЕДНЬОБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ В УМОВАХ ЗМІННИХ РЕЖИМІВ

М.В. Слободянюк

Представлені результати експериментального дослідження особливостей процесу подачі палива на швидкісній характеристиці середньооборотного судового дизельного двигуна в умовах змінних режимів. Вивчення гідродинамічних процесів для зазначених характеристик розширює можливості вдосконалення роботи дизеля, а також дають можливість уточнити методи розрахунку процесів, пов'язаних з паливоподачею. Експериментальні дослідження виконані на безмоторному стенді при різних початкових умовах з першочерговим доведенням вимірювального комплексу. Перший варіант - перед запуском паливна система високого тиску розвантажувалась. Другий варіант - запуск безмоторного стенду проводився після короткочасної зупинки; при цьому в системі зберігається залишковий тиск після першого варіанту запуску. Узагальнені результати проведеного експериментального дослідження дозволили оцінити процес розвитку подачі палива на протязі всього експерименту. При цьому в першому варіанті істотною особливістю є відсутність помітного підвищення тиску у форсунці при перших трьох циклах впорскування в процесі розгону, незважаючи на досить високу частоту обертання розподільного валу. Тільки в четвертому циклі отримано зростання тиску до 40 бар, якого недостатньо для підйому голки форсунки. Умови першого впорскування формуються у п'ятому циклі (фаза ступеневого впорскування). У другому варіанті з початковим тиском у паливній системі 27 бар при розгоні вже на першому обороті при відносно невисокій частоті обертання величина тиску відповідає умовам впорскування і досягає 166 бар. Таким чином, початковий тиск в паливній системі при розгоні робить істотний вплив на розвиток характеристики впорскування, що і є специфічною особливістю роботи дизельного двигуна на змінних режимах. Особливістю формування параметрів впорскування при вибігу в обох варіантах є те, що процес не залежить від початкових умов в паливній системі. Врахування особливостей процесу впорскування при безперервно мінливій частоті обертання дозволить підвищити надійність роботи судових дизелів при маневруванні і забезпечить вдосконалення робочих процесів дизелів на змінних режимах.

Ключові слова: процес впорскування; дизельний двигун; гідродинамічні процеси; безмоторний стенд; паливна система; ступінчаста подача; робочий процес дизеля.

FUEL INJECTION PROCESS AT SPEED CHARACTERISTICS OF MEDIUM-SPEED DIESEL ENGINE AT VARIABLE MODES

N.V. Slobodianiuk

The results of an experimental study of the features of the fuel injection process on the speed response of a medium-speed marine diesel engine under variable conditions are presented. The study of hydrodynamic processes for these characteristics expands the possibilities for improving the operation of a diesel engine, and also allows to clarify the methods for calculating the processes associated with fuel injection. Experimental studies have been performed on an engineless test bench under various

initial conditions with the refinement of the measuring complex. The first option - before starting the high-pressure fuel system was unloaded. The second option - the engineless test bench was started after a short stop. At the same time, the residual pressure remains in the system after the first start option. The generalized results of the experimental study allowed to evaluate the process of fuel supply development during the whole experiment. At the same time, in the first option, the essential feature is the absence of a noticeable increase in pressure in the nozzles during the first three injection cycles in the acceleration process, despite the rather high rotational speed of the camshaft. Only in the fourth cycle, a pressure increase of up to 40 bar was obtained, which is not enough to lift the nozzle needle. The first injection conditions are formed in the fifth cycle (stepwise injection phase). In the second option, with an initial pressure in the fuel system of 27 bar, during acceleration already on the first revolution with a relatively low rotational speed, the pressure value corresponds to the injection conditions and reaches 166 bar. Thus, the initial pressure in the fuel system during acceleration has a significant impact on the development of the injection characteristics, which is a specific feature of the diesel engine operation in variable modes. The peculiarity of the formation of injection parameters during coasting in both options does not depend on the initial conditions in the fuel system. Consideration of the injection process features at a continuously varying rotation speed will improve the reliability of marine diesel engines during maneuvering and will ensure the improvement of diesel engine working processes at variable modes.

Key words: injection process; diesel engine; hydrodynamic processes; engineless test bench; fuel system; skip feed; diesel engine working process.

УДК 621.431.74

DOI: 10.20998/0419-8719.2020.2.06

Е.В. Белоусов, И.В. Грицук, Р.А. Варбанец, А.Е. Самарин

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ В ДВУХТАКТНЫХ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ СУДОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Результаты анализа мировых топливных ресурсов указывают на то, что наиболее распространенными ископаемыми топливами на земле являются твердые топлива. Специалисты считают, что при сохранении нынешних темпов их использования, запасов углей хватит, по крайней мере, еще на 400...450 лет. Низкая цена на этот вид топлива делает их использование привлекательной перспективой для применения в качестве моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания. Попытки создания двигателей, способных работать на твердых топливах, предпринимались на протяжении всего периода существования ДВС, начиная с работ Р.Дизеля по созданию его рационального двигателя. Однако на протяжении всего этого периода основные усилия специалистов были направлены на то, чтобы приспособить существующие типы поршневых двигателей, работающих на жидких или газообразных топливах, под использование угольного топлива в виде мелкодисперсной пыли, непосредственно подаваемой в рабочий цилиндр или впрыскиваемой в камеру сгорания в составе топливо- или водо-угольной суспензии. Первой попыткой разработать двигатель, который специально создавался под использование твердых топлив и позволял бы максимально использовать преимущества их агрегатного состояния, были работы американского инженера Joseph C. Firey, предложившего конструкцию с внутрицилиндровой газификацией твердого топлива. Впоследствии авторами был усовершенствован данный метод путем организации принудительной продувки слоя твердого топлива в процессе подвода теплоты к рабочему телу. Авторами была разработана и реализована численная модель рабочего процесса данного двигателя, с использованием которой выполнен ряд исследований, направленных на поиск новых подходов к организации рабочих процессов в твердотопливных двигателях со слоевым сжиганием. Эти подходы позволяют максимально использовать особенности подготовки воздушного заряда к сгоранию и управляемого процесса подвода теплоты для повышения термодинамической эффективности рабочего цикла. Обсуждению результатов этого исследования посвящена данная статья.

Ключевые слова: судовые малооборотные двухтопливные двигатели; твердое топливо.

Введение

Значительным толчком к развитию мирового торгового флота послужило то, что на границе 80-90-х годов прошлого столетия большинству ведущих мировых производителей судовых двигателей внутреннего сгорания удалось решить проблемы, связанные с переводом их на тяжелые топлива. Это позволило значительно снизить стоимость топливной составляющей в структуре морских перевозок, повысив тем самым их рентабельность. Стремительное развитие флота привело к значительному наращиванию темпов потребления жидких нефте-

продуктов, что породило ряд серьезных проблем. Так, объемы потребления нефтяных топлив судами торгового флота в 2020 году по разным оценкам могут достигнуть 382...405 млн. т, а в долгосрочной перспективе, к 2050 году, эта цифра может возрасти до 402...543 млн. т в год [1]. Такие темпы неминуемо приведут к росту конкуренции за нефтяные ресурсы между их основными потребителями. Развитие технологий переработки нефти за последние годы привело к увеличению выхода светлых нефтепродуктов, в результате чего использование тяжелых остаточных топлив стало уже не таким