DOI [https://doi.org/10.15589/znp2019.1\(475\).9](https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).9)
УДК 621.431.74

FEATURES OF FUEL INJECTION PROCESS ON HIGH-SPEED CHARACTERISTIC OF THE MIDDLE-VARIABLE DIESEL UNDER VARIABLE MODES

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА НА СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА НА ШВИДКІСНІЙ ХАРАКТЕРИСТИЦІ СЕРЕДНЬООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ В УМОВАХ ЗМІННИХ РЕЖИМІВ

Nikolay V. Slobodianiuk
Nikgavr1234@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2248-0255

М. В. Слободянюк,
аспірант

National University "Odessa Maritime Academy", Odessa
Національний університет «Одесская морская академия», г. Одесса
Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса

Abstract. 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 conditions of 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 makes it possible to clarify the methods for calculating the processes associated with fuel injection. Experimental studies were performed on an engineless stand under various initial conditions with the refinement of the measuring complex. The first option – before starting the high-pressure fuel system was unloading. The second option – the launch of an engine-free stand was made after a short stop. At the same time, residual pressure remains in the system after the first launch variant. The generalized results of the experimental study allowed evaluating the process of fuel supply development during the whole experiment. In the first embodiment, 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 bars was obtained, which is not enough to lift the nozzle needle. The conditions of the first injection are formed in the fifth cycle (stepwise injection phase). In the second variant, with an initial pressure in the fuel system of 27 bars, during acceleration already on the first revolution with a relatively low rotational speed, the pressure value corresponds to the injection conditions and reaches 166 bars. 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 conditions. The peculiarity of the formation of injection parameters during coasting in both variants does not depend on the initial conditions in the fuel system. Taking into account the features of the injection process at a continuously varying speed of rotation will improve the reliability of ship diesel engines during maneuvering and will ensure the improvement of diesel working processes in variable modes.

Key words: injection process; diesel engine; hydrodynamic processes; motor less stand; fuel system; step feed; diesel engine workflow.

Аннотация. В статье 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. При первом варианте перед запуском топливная система высокого давления разгружалась. При втором варианте 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 течение всего эксперимента. При этом в первом варианте существенной особенностью является отсутствие заметного повышения давления в форсунке при первых трех циклах впрыскивания в процессе разгона, несмотря на достаточно высокую частоту вращения распределительного вала. Только в четвертом цикле получен рост давления до 40 бар, которого недостаточно для подъема 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 является специфической особенностью работы дизельного двигателя на переменных режимах. Особенности формирования параметров впрыскивания при выбеге в обоих вариантах не зависят от начальных условий в топливной системе. Учет особенностей процесса впрыскивания при непрерывно меняющейся частоте вращения позволит повысить надежность 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.

Анотація. У статті наведено результати експериментального дослідження особливостей процесу подачі палива на швидкісній характеристиці середньооборотного суднового дизельного двигуна в умовах змінних режимів. Вивчення гідродинамічних процесів для зазначених характеристик розширює можливості вдосконалення роботи дизеля, а також дає можливість уточнити методи розрахунку процесів, пов'язаних з подачею палива. Експериментальні дослідження виконані на безмоторному стенді за різних початкових умов з доведенням вимірювального комплексу. За першого варіанта перед запуском паливна система високого тиску розвантажувалася. За другого варіанта запуск безмоторного стенда проводився після короткочасної зупинки. При цьому в системі зберігається залишковий тиск після першого варіанта запуску. Узагальнені результати проведенного експериментального дослідження дали змогу оцінити процес розвитку подачі палива протягом усього експерименту. При цьому в першому варіанті суттєвою особливістю є відсутність помітного підвищення тиску у форсунці за перших трьох циклів впорскування в процесі розгону, незважаючи на досить високу частоту обертання розподільного вала. 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 оберті за відносно невисокої частоти обертання величина тиску відповідає умовам впорскування й досягає 166 бар. Таким чином, початковий тиск у паливній системі при розгоні здійснює істотний вплив на розвиток характеристики впорскування, що є специфічною особливістю роботи дизельного двигуна на змінних режимах. Особливості формування параметрів впорскування при вибігу в обох варіантах не залежать від початкових умов у паливній системі. Врахування особливостей процесу впорскування за безперервно змінної частоти обертання дасть змогу підвищити надійність роботи судових дизелів під час маневрування й забезпечить удосконалення робочих процесів дизелів на змінних режимах.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

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). 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 цилиндров; $t_{\text{ОХЛ}}$ — температура воды, охлаждающей цилиндр

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

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Результаты исследований работы топливopодающей аппаратуры на различных режимах рассмотрены в источниках [2; 3].

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 об./мин). При всех значениях частоты вращения вала насоса игла форсунки 7–8 раз поднимается, не достигая максимальной высоты (рис. 2).

Рис. 2. Зависимость перемещения иглы форсунки $H_{и}$ и нагнетательного клапана $H_{к}$ от угла поворота вала насоса φ : $n_b = 200 \text{ мин}^{-1}$

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

Полученные результаты не в полной мере описывают гидродинамические процессы топливopодачи. Публикуемые в работе материалы представляют результаты детальных исследований процессов топливopодачи. Полученные данные позволяют улучшить динамические характеристики дизелей и в перспективе оптимизировать рабочий процесс.

ВЫДЕЛЕНИЕ НЕ РЕШЕННЫХ РАНЕЕ ЧАСТЕЙ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ

В сфере экспериментального исследования топливopодающей аппаратуры на переменных режимах в дизельных двигателях остаются недостаточно раскрытыми особенности развития параметров впрыскивания при непрерывно изменяющейся частоте вращения.

Такая эксплуатационная характеристика присуща пусковым и неустановившимся режимам. Изучение гидродинамических процессов для указанных харак-

теристик расширяет возможности усовершенствования работы дизеля, а также позволяет уточнить методы расчета процессов топливopодачи.

Цель исследования. Целью статьи является получение и оценивание параметров топливopодачи на скоростной характеристике среднеоборотного дизеля в условиях переменных режимов.

Для достижения цели были поставлены такие задачи:

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

МЕТОДЫ, ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели исследования использован метод экспериментально-теоретического уровня, а именно эксперимент. Этот метод исследования позволяет собрать экспериментальные данные и систематизировать их, проанализировать зависимости, а также сформулировать выводы.

Объектом исследования являются процессы топливopодачи среднеоборотного дизеля на переменных режимах.

Предметом исследования являются гидродинамические процессы в узлах механизма топливopодачи (системы высокого давления) судового среднеоборотного дизеля на переменных режимах.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

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

Работа была проведена на кафедре судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия» (Украина) и представлена в виде патента Украины на изобретение а201806815 [5] и полезной модели 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 такие 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;

– наличие многоканального программно-аппаратного комплекса (тензостанция), который 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.

Как основной вариант на безмоторном стенде исследовалась система впрыскивания топливной аппаратуры судового среднеоборотного дизеля ЧН25/34 с основными параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1. Параметры топливной аппаратуры дизеля ЧН25/34

Топливный насос высокого давления	
Диаметр плунжера топливного насоса d_n , мм	16
Ход плунжера топливного насоса h_n , мм	16
Топливная форсунка (закрытого типа)	
Давление начала впрыскивания p_0 , бар	210
Диаметр иглы форсунки d_u , мм	6
Ход иглы форсунки z_{max} , мм	0,45
Топливопровод	
Наружный диаметр D_r , мм	10
Внутренний диаметр d_r , мм	3
Длина топливопровода высокого давления L_r , мм	955

В ходе эксперимента тензостанция принимала, обрабатывала и записывала на персональный компьютер такие 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 ;
- частота вращения распределительного вала n_p ;
- угол поворота распределительного вала (ПРВ) φ ;

– время с момента начала записи осциллограмм t .

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

Давление затяжки форсуночной пружины $p_0 = 70$ бар.

Программой эксперимента обеспечивались 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, а после начала записи осциллограммы тензостанцией он был запущен с ранее установленным напряжением. После выхода на пусковую частоту и стабилизации режима электродвигатель отключался, происходил выбег системы до остановки. Запись осциллограмм тензостанцией велась непрерывно вплоть до остановки стенда.

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

- 1) перед запуском топливная система (ТС) высокого давления разгружалась;
- 2) запуск безмоторного стенда производился после кратковременной остановки, при этом в системе сохраняется остаточное давление после первого варианта запуска.

Результаты обработки двух вариантов начальных условий экспериментальных значений представлены на рис. 3, 4 в виде зависимости $p_{ф.вх.макс} = f(t)$ максимального давления форсунки входа 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, а с начальным давлением – 44 с и 117 циклов.

Рис. 3. Динамика давления $p_{ф.вх.}$ в разгруженной топливной системе: а) разгон $n_p = 0 \dots 245$ об./мин.; б) выбег $n_p = 245 \dots 0$ об./мин.

Рис. 4. Динамика давления $p_{ф.вх.}$ в топливной системе с начальным давлением:
а) разгон $n_p = 0 \dots 245$ об./мин.; б) выбег $n_p = 245 \dots 0$ об./мин.

Количество циклов в первом эксперименте при разгоне составила 26, во втором – 20. При выбеге количество циклов в первом и втором экспериментах одинаково и составляет 29.

Следует отметить, что процессы в ТС при разгоне в обоих экспериментах (рис. 3а, 4а) заметно отличаются, тогда как 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, представленных на рис. 5, выполняем оценивание 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, являются такими: время разгона составило 6,16 с и 26 циклов впрыскивания; при условии, что в топливной системе имеется начальное давление, время разгона составило 5,5 с и 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 условиях в ТС высокого давления оказалось одинаковым и составило 10,71 с.

Тахометрические параметры фаз эксперимента от начальных условий сведены в табл. 2, из которой следует, что давление $p_{ф.вх.}$ на фазе разгона при разгруженной топливной системе в течение первых четырех и пятого циклов в диапазоне $n_p = 173 \dots 229$ об./мин. 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 $n_p = 102$ об./мин.

Фазы выбега в обоих вариантах начальных условий идентичны.

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

На рис. 6а и 6б видно, что при разгруженной ТС 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 ТС пятый цикл разгона является ступенчатым. При этом продолжительность впрыскивания значительно меньше, чем в последующем шестом цикле, а начало впрыскивания смещено по углу поворота в сторону запаздывания.

Параметры топливоподачи, полученные в течение всего эксперимента, представлены в виде графиков зависимостей параметров топливоподачи от частоты вращения на переменных режимах при различных начальных условиях (рис. 8, 9, табл. 3, 4).

Результаты проведенного экспериментального исследования, обобщенные в рис. 8 и 9, а также табл. 3

Таблица 2. Тахометрические параметры эксперимента

Фаза эксперимента	Начальные условия			
	ТС разгружена		ТС с начальным давлением	
	номер циклов	n_p , об./мин.	номер циклов	n_p , 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

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)

Рис. 7. Перемещение иглы форсунки при разгоне: а) при разгруженной топливной системе; б) топливная система с начальным давлением

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 $\varphi_{вп.}$ 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)

и 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.

В эксперименте с начальным давлением в ТС 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 указаны текущая частота вращения n_p (средняя за период

Таблица 3. Параметры топливоподачи в разгруженной топливной системе

Номер цикла	n_p , об./мин.	τ , с	$p_{ф.вх.}$, бар	$p_{ф.к.}$, бар	p_n , бар	$\phi_{вп}$, °, ПРВ	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 с начальным давлением в топливной системе

Номер цикла	n_p , об./мин.	τ , с	$p_{ф.вх.}$, бар	$p_{ф.к.}$, бар	p_n , бар	$\phi_{вп}$, °, ПРВ	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

впрыскивания), время τ (от начала процесса), значения давления $p_{ф.вх.}$, $p_{ф.к.}$, p_n и угол впрыскивания $\phi_{вп}$.

Следует отметить, что по характеристикам топливоподачи продолжительность впрыскивания в пятом и шестом циклах для разгона при разгруженной топливной системе составляет $\phi_{вп} = 4,5^\circ$ ПРВ при $n_p = 221$ об./мин. (ступенчатое впрыскивание) и $\phi_{вп} = 16,2^\circ$ ПРВ при $n_p = 229$ об./мин. (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 $\phi_{вп} = 10,9^\circ$ ПРВ при $n_p = 102$ об./мин., 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 об./мин.

Характер движения иглы и угол впрыскивания определяются сложным ходом волновых процессов в топливной системе.

Наиболее существенным их влияние является при малых давлениях топлива и частоте вращения.

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 об./мин. (120-й и 121-й циклы). В топливной системе с начальным давлением условия дробного впрыскивания формировались при 62...54 об./мин. (113-й и 114-й циклы).

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

Рис. 10. Совмещенные осциллограммы впрыскивания на участке выбега: а) топливная система разгружена: — — 120-й цикл, ... — 121-й цикл; б) топливная система с начальным давлением: — — 113-й цикл, ... — 114-й цикл

Таблица 5. Дробное впрыскивание при выбеге

Характеристики впрыскиваний	Начальные условия	
	ТС разгружена, 121-й цикл	ТС с начальным давлением, 114-й цикл
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

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

Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты, описанные в статье, можем обсудить, построив матрицу на основе SWOT-

анализа, выделяя сильные и слабые стороны полученных результатов (табл. 6).

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментального исследования особенностей процесса топливоподачи на скоростной характеристике дизельного двигателя в условиях переменных режимов, выполненные на безмоторном

Таблица 6. SWOT-матрица обсуждения полученных результатов

Внутренняя среда	
Сильные стороны	Слабые стороны
Получение значений гидродинамических процессов впрыскивания последовательных циклов в топливной системе высокого давления на переменных режимах.	Отсутствие специального программного обеспечения, необходимого для проведения визуального анализа исследуемых гидродинамических процессов в топливной системе высокого давления
Внешняя среда	
Возможности	Угрозы
Автоматическое управление и адаптация топливной системы высокого давления к работе на переменных режимах при создании новых управляющих систем топливоподачи.	При увеличении количества измерительных датчиков на топливной системе высокого давления во время технической эксплуатации потребуются дополнительный контроль со стороны обслуживающего персонала.

стенде, показали, что при разгоне в разгруженной топливной системе особенностью формирования параметров первого цикла впрыскивания стала его 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.

Таким образом, начальное давление в топливной системе при разгоне оказывает существенное влия-

ние на развитие характеристики впрыскивания, что является специфической особенностью работы дизельного двигателя на переменных режимах.

Особенности формирования параметров впрыскивания при выбеге в обоих вариантах не зависят от начальных условий в топливной системе.

Учет особенностей процесса впрыскивания при непрерывно меняющейся частоте вращения позволит повысить надежность работы судовых дизелей при маневрировании и обеспечит совершенствование рабочих процессов дизелей на переменных режимах.

REFERENCES

- [1] Kostin, A. K. (Ed.), Pugachev, B. P., & Kochinev, Yu. Yu. (1989). *Rabota dizeley v usloviyakh ekspluatatsii: spravochnik* [Operation of diesel engines under operating conditions: a reference book]. Leningrad: Mashinostroyeniye [Engineering] [in Russian].
- [2] Patrahaltsev, N. N., Sinitsyn, A. K., & Soloviev, D. E. (2003). Ispytaniya i diagnostirovaniye dizeley s ispol'zovaniye neustanovivshikhsya rezhimov [Tests and diagnosis of diesel engines using transient modes]. *Vestnik RUDN* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia], 1, 132–134 [in Russian].
- [3] Patrahaltsev, N. N., Kharitonov, V. V., & Fomin, A. V. (2004). Vliyaniye perekhodnogo protsessa v toplivnoy apparature dizelya na yego puskovyye kharakteristiki [Influence of the transient in the diesel fuel equipment on its starting characteristics]. *Vestnik RUDN* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia], 1 (8), 17–22 [in Russian].
- [4] Slavutsky, V. M., Kurapin, A. V., & Slavutsky, V. V. (2014). Ob intensifikatsii protsessa podachi topliva v dizele na rezhime puska [On the intensification of the process of supplying fuel in a diesel engine at start-up mode]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 18 (145), 26–30 [in Russian].
- [5] Polovynka, E. M., Kyrilenko, O. M., & Slobodianiuk, N. V. (2019). *Stend dlya doslidzhennya i rehulyuvannya palyvnoyi aparatury dizelev: pat. Ukrainy: MPK (2006) F02M 65/00. № a201806815; zayava. 15.06.2018; kvalifikatsiyna ekspertyza 14.01.2019.* [Stand for research and regulation of diesel fuel equipment: Pat. Ukraine: IPC (2006) F02M 65/00. No. a201806815; statement. 15.06.2018; qualification examination 14.01.2019] [in Ukrainian].
- [6] Polovynka, E. M., Kyrilenko, O. M., & Slobodianiuk, N. V. (2019). *Stend dlya doslidzhennya i rehulyuvannya palyvnoyi aparatury dizelev: patent na korysnu model, Ukrainy: MPK (2006) F02M 65/00. № u201805581; zayava. 21.05.2018; opubl. 25.02.2019, Byul. № 4.* [Stand for research and regulation of diesel fuel equipment: utility model patent, Ukraine: IPC (2006) F02M 65/00. № u201805581; statement. 21.05.2018; publ. 02/25/2019. Bul. № 4] [in Ukrainian].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Костин А.К., Пугачев Б.П., Кочинев Ю.Ю. Работа дизелей в условиях эксплуатации : справочник. Ленинград : Машиностроение, 1989.
- [2] Патрахальцев Н.Н., Синицын А.К., Соловьев Д.Е. Испытания и диагностирование дизелей с использованием неустановившихся режимов. *Вестник РУДН*. 2003. № 1. С. 132–134.
- [3] Патрахальцев Н.Н., Харитонов В.В., Фомин А.В. Влияние переходного процесса в топливной аппаратуре дизеля на его пусковые характеристики. *Вестник РУДН*. 2004. № 1 (8). С. 17–22.
- [4] Славутский В.М., Курапин А.В., Славутский В.В. Об интенсификации процесса подачи топлива в дизеле на режиме пуска. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2014. № 18 (145). С. 26–30.
- [5] Половинка Е.М., Кириленко О.М., Слободянюк Н.В. Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів : пат. Україна : МПК (2006) F02M 65/00. № a201806815; заява. 15.06.2018; кваліфікаційна експертиза 14.01.2019.
- [6] Половинка Е.М., Кириленко О.М., Слободянюк Н.В. Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів : пат. на корисну модель, Україна : МПК (2006) F02M 65/00. № u201805581; заява. 21.05.2018; опубл. 25.02.2019. Бюл. № 4.