

УДК 621.431.74

Половинка Э.М., Слободянюк Н.В.  
НУ «ОМА»

## ПРОЦЕСС ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА В СУДОВОМ СРЕДНЕОБОРОТНОМ ДИЗЕЛЕ НА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

**Постановка проблемы в общем виде.** Значительная часть времени эксплуатация двигателей внутреннего сгорания происходит в условиях изменяющихся режимов вследствие воздействия переменных нагрузок природного происхождения, таких как движение судна по большой волне или в ледовых условиях. Другим источником являются изменения, вносимые персоналом в эксплуатационный режим работы, например, маневрирование судна при входе в порт, прохождение каналов, движение с тралом. Наибольшей величиной и частотой изменения режимов работы главных двигателей обладают портовые буксиры.

В качестве примера можно привести запись параметров главного двигателя в процессе маневрирования при входе в порт, представленные на рис.1 [1].

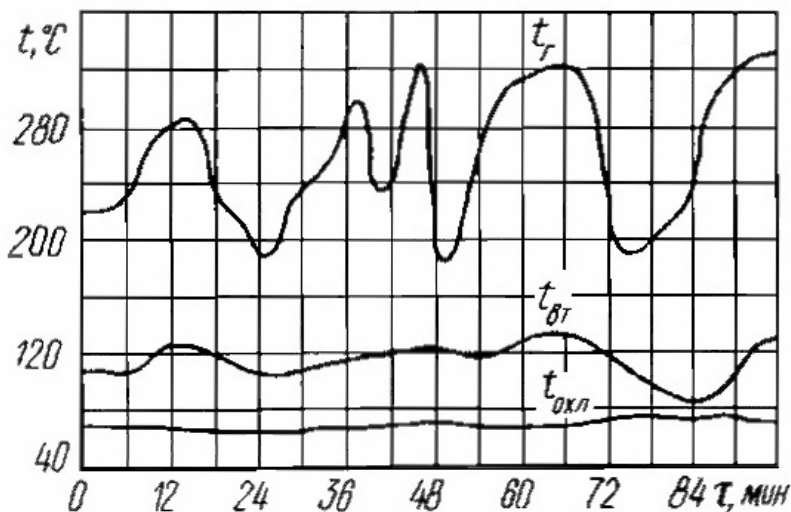


Рис.1. Изменения режимов работы двигателя при маневрировании судна  
 $t_f$  – температура выпускных газов;  $t_{вт}$  – втулки цилиндров;  $t_{охл}$  – охлаждающей цилиндр воды

Интенсивные изменения режимов работы главных двигателей оказывает существенное отрицательное влияние на протекающие рабочие процессы в цилиндрах, вспомогательных механизмах и агрегатах.

Одним из основных факторов, определяющих ухудшение рабочего процесса двигателей на переменных режимах, является изменение процесса впрыскивания топлива. Это наиболее характерно для пусковых режимов. Примером может служить запись подъёма иглы форсунки и график изменения давления топлива при пуске высокооборотных двигателей на рис.2.

Из осциллограммы видно, что подача топлива вялая, растянутая по времени при малом давлении топлива, неполном подъёме иглы и дробном характере её движения. Ухудшение качества распыливания наряду с низкими параметрами воздушного заряда приводит к повышенному расходу топлива, интенсивному износу деталей двигателя и повышенной эмиссии вредных компонентов в составе отработавших газов.

**Целью исследования** стало совершенствование рабочих процессов дизелей на переменных режимах.

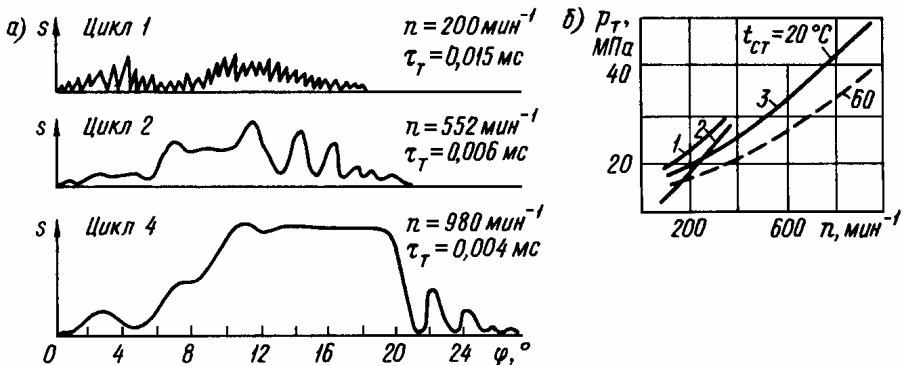


Рис.2. Подъём иглы форсунки и давление топлива при пуске двигателей:  
а) дизель 8ЧН13/14; б) 1 – ДН23/30, 2 – Ч15/18, 3 – Ч 13/14

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. Для проведения такого эксперимента предпочтительно использовать безмоторный стенд. В этом случае возникает возможность свободного задания

регулируемых параметров, что трудно обеспечить при моторных испытаниях.

**Изложение основного материала исследования** начато с подготовки опытного применения топливной аппаратуры среднеоборотного судового дизеля ЧН 25/34. Основные параметры топливного насоса высокого давления (ТНВД) следующие: диаметр плунжера 16 мм, ход 16 мм; форсунка закрытого типа с распылителем 9х0,35 мм. Привод распределительного вала стэнда осуществлялся электродвигателем постоянного тока, что обеспечивало бесступенчатое регулирование частоты вращения.

Общий вид системы топливоподачи с датчиками на безмоторном стэнде представлен на рис.3.

В эксперименте записывались следующие параметры:

- 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 распылителя  $z$ ;
- определялась частота вращения распределительного вала  $n_p$ ;
- фиксировался угол поворота распределительного вала  $\varphi$ ;
- измерялось и время  $\tau$ .

Выход рейки ТНВД в эксперименте составлял 15 мм.

Осциллографирование, обработка данных и оформление результатов выполнено с помощью программно-аппаратного комплекса на базе тензометрического усилителя, разработанного в НУ"ОМА" на кафедре СЭУ. Запись процессов выполнена на персональный компьютер. Обработка осциллограмм проведена специализированным пакетом, входящим в состав комплекса.

Программой эксперимента предусмотрено 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.

Эксперимент проведен в следующей последовательности. Предварительно задан режим пусковой частоты вращения установкой напряжения электродвигателя. Затем стэнд был остановлен и после начала записи осциллограммы запущен с установленным ранее напряжением. После выхода на пусковую частоту и стабилизации режима двигатель отключался и происходил выбег системы до остановки.

Запись осциллограммы велась непрерывно вплоть до остановки стенда.

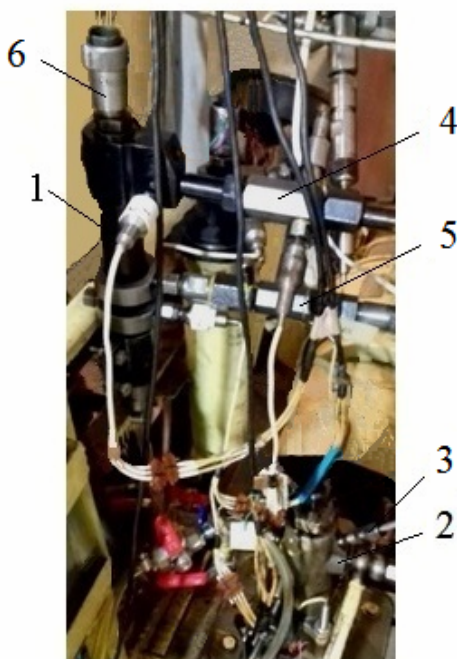


Рис.3. Общий вид стенда системы топливоподачи с датчиками:  
1 – форсунка; 2 – ТНВД; 3 – датчик давления в насосе  $p_{пн}$ ; 4 – датчик давление на входе в форсунку  $p_{ф.вх}$ ; 5 – датчик давления в канале форсунки  $p_{ф.к}$ ; 6 – датчик хода иглы форсунки  $z$ .

При обработке полученных осциллограмм определены величины давлений и фазы топливоподачи. Распределение данных отнесено к текущему времени опыта ( $\tau$  с начала записи) и номеру цикла (с момента первого впрыскивания). Испытания проведены при давлении затяжки пружины форсунки близком к нулевому. По этой причине запись линии подъёма иглы превышает конструктивную величину  $z_{max} = 0,45$  мм поскольку возможен неконтролируемый отрыв штанги пружины от хвостовика иглы и соответствующее перемещение штока датчика подъёма иглы.

Общая картина эксперимента представлена на рис.4 в форме зависимости максимального давления  $p_{ф.вх}$  от времени и номера цикла.

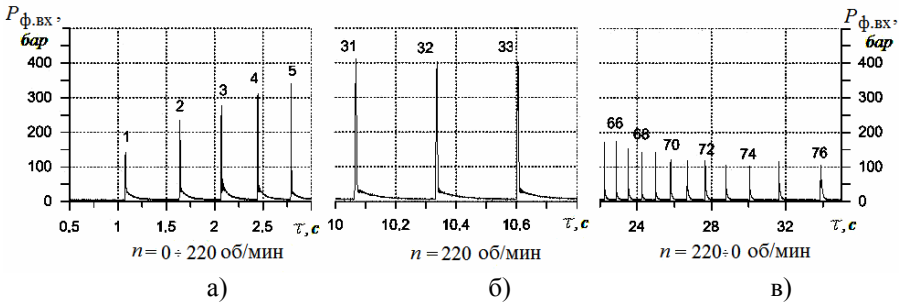


Рис.4 Изменение давления  $p_{ф.вх}$  в течение эксперимента:  
 а – разгон; б – зона стабильных оборотов; в – выбег

Как следует из графика, продолжительность опыта составила 36 сек, количество циклов в течение записи равно 76.

Для анализа полученных данных необходимо учесть текущее значение частоты вращения (средней скорости вращения в течение цикла впрыскивания). Такие данные приведены на тахограмме рис.5, полученной обработкой исходной записи на участках подачи топлива.

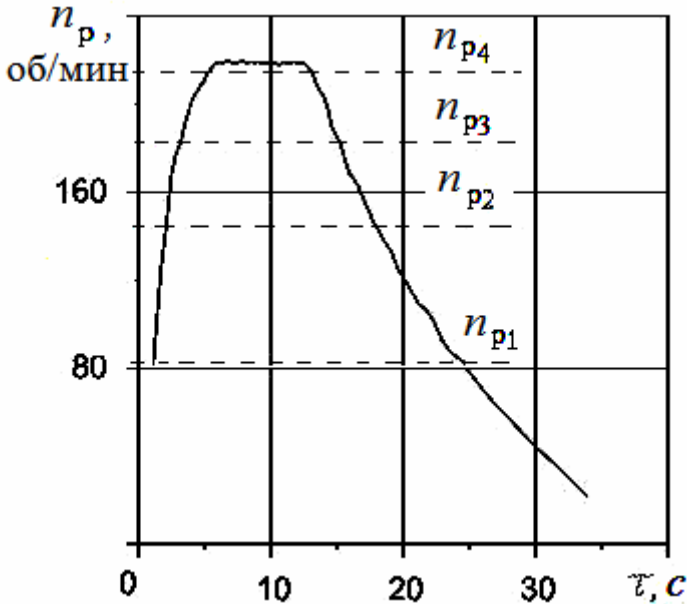


Рис.5. Тахограмма эксперимента

Из сопоставления рис.4,5 следует, что на участке разгона (циклы 1-16) скорость вращения увеличилась с 82 до 220 об/мин. За этот период  $p_{ф.вх}$  возросло от 143 до 394 бар. При стабильной частоте вращения, составившей  $n_p = 220$  об/мин, давление поддерживалось на уровне 405 бар.

Участок выбега представляет интерес с точки зрения изменения параметров впрыскивания топлива при падении оборотов. Такой режим, естественно, не характерен для работы двигателя, но позволяет детальнее исследовать переходные процессы в топливной аппаратуре.

Тахограмма выбега на рис.5 характерна плавным снижением  $n_p$  и приходится на время  $\tau = 13-34$  с. Запись давления на рис.4в относится к последним 10 с, когда скорость вращения уменьшилась с 93 до 22 об/мин, а  $p_{ф.вх}$  – в диапазоне 170 – 105 бар.

Для анализа процесса топливоподачи на участке разгона (рис.5) выбраны осциллограммы с тремя значениями  $n_p = 145, 182, 219$  об/мин (рис.6).

На рис.6а показана разметка осциллограмм для определения условного угла начала впрыскивания  $\varphi_n$  и угла впрыскивания  $\varphi_{вп}$ .

На рис.6б и 6в совмещенные осциллограммы шестого и шестнадцатого циклов на участке разгона.

Для оценки информативности осциллограмм, записанных в различных точках системы впрыскивания, проведем сравнение кривых  $p_n, p_{ф.вх}, p_{ф.к}$ . Рассмотрим режим с  $n_p = 182$  об/мин (рис.6б). В первую очередь, сопоставим максимальные величины. Минимальное значение имеет  $p_{ф.к}$ , которое на 43 бар ниже  $p_{ф.вх}$  и на 36 бар меньше  $p_n$ .

Что касается характера кривых, то можно отметить, что максимумы расположены по ходу волны давления в системе в последовательности  $p_n, p_{ф.вх}, p_{ф.к}$ . Сдвиг в указанном порядке составляет  $\Delta\varphi = 0,5$  и  $0,4^\circ$  ПРВ.

Форма осциллограмм существенных отличий не имеет. Колебания на заднем фронте более интенсивны у ТНВД.

Осциллограммы двух других циклов при разгоне представлены на рис. 6а и 6в. Характер кривых давления такой же, как и рассмотренный выше, отличие, естественно, в максимальных величинах.

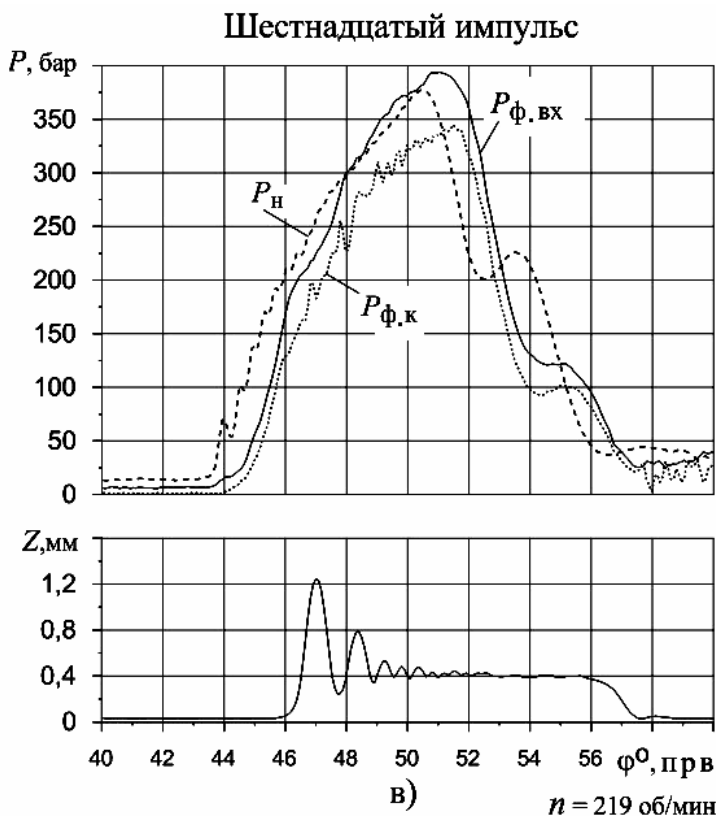


Рис.6. Совмещённые осциллограммы впрыскивания на участке разгона.

Проведенный анализ позволяет для сопоставления процесса впрыскивания при различной частоте вращения использовать выборочные участки системы впрыскивания. Для этого выбраны  $p_n$ ,  $p_{ф.к}$ , графики которых приведены на рис.7. Там же показаны кривые  $\varphi_{вп}$ . Опытные точки нанесены только для разгона. Данные, по которым построены графики, приведены в табл.1.

Полученные зависимости достаточно хорошо аппроксимируются кривыми рис.7, что свидетельствует о стабильности измерений.

Диапазон изменения давлений при изменении частоты вращения как при разгоне, так выбеге практически одинаков. Для  $p_n$  это 135 – 370 бар и 361 – 134 бар. Для  $p_{ф.к}$ : 114 – 328 бар и 328 – 113 бар.

Практически совпадают и значения углов впрыскивания.

Таблица 1. Параметры топливоподачи

п/н, цикла	$n_p$ , об/мин	$\tau$ , с	$p_{ф.вх.}$ , бар	$p_{ф.к.}$ , бар	$p_{н.}$ , бар	$\Phi_{вп}^{\circ}$ , ПРВ	Участки
1	82	01,07	143	114	135	5,8	разгон
68	84	24,23	143	114	135	7,1	выбег
3	145	02,07	279	236	259	7,3	разгон
56	146	17,80	282	239	265	7,5	выбег
6	182	03,12	345	295	304	10,0	разгон
49	181	15,20	363	301	332	9,9	выбег
14	215	05,46	392	343	322	11,3	разгон
41	216	12,76	389	328	361	11,5	выбег

Для оценки влияния характера изменения частоты вращения (повышения или снижения) даны совмещённые осциллограммы при  $n_p = 215$  об/мин (рис.8). Кривые давления топлива  $p_{ф.вх.}$  и подъёма иглы практически совпадают. Т.о. направление переходного режима не влияет на развитие процесса топливоподачи.

Соответствующие совмещённые осциллограммы с близкими значениями оборотов распределительного вала  $n_p$  приведены на рис.8.

В заключение рассмотрим особенности протекания впрыскивания при минимальной частоте вращения разгона и выбега. Соответствующие значения  $n_p$  составляют 82 и 22 об/мин (рис.9). В этом случае частота вращения является определяющим фактором, приводящим к существенному изменению топливоподачи.

В качестве общей оценки можно отметить, что при  $n_p = 82$  об/мин (рис. 9а) наблюдается стабильное впрыскивание, а на 22 об/мин (рис.9б) впрыскивание дробное. Кроме того, отличаются и максимальные давления, составившие в первом случае 110 – 150 бар, а при дробной работе колебания происходят в диапазоне 30 – 100 бар. В то же время после окончания стабильного впрыскивания давление составляет 10 – 40 бар, колебательный же процесс заканчивается на уровне 55 – 70 бар.

Значительно меньше при дробной подаче угол впрыскивания, составивший  $2,8^{\circ}$ ПРВ против  $5,8^{\circ}$ ПРВ для стабильного впрыскивания.



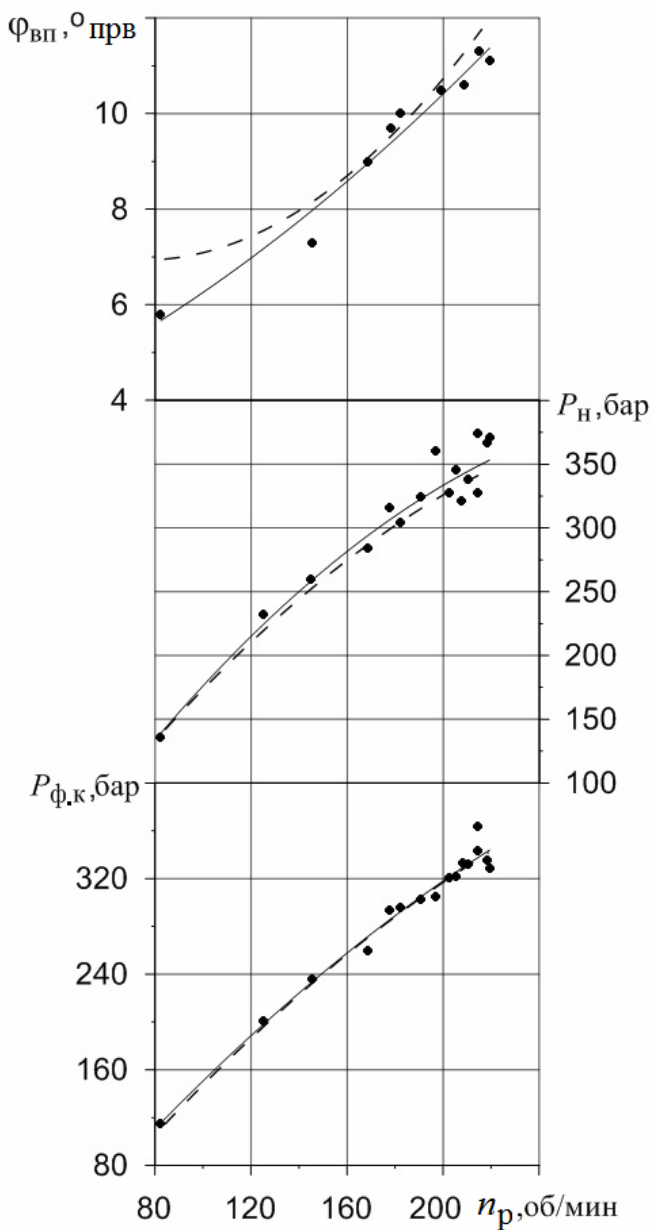


Рис.7. Зависимость параметров топливоподдачи от частоты вращения на переменных режимах: (—) разгон, (---) выбег (обозначения в тексте)

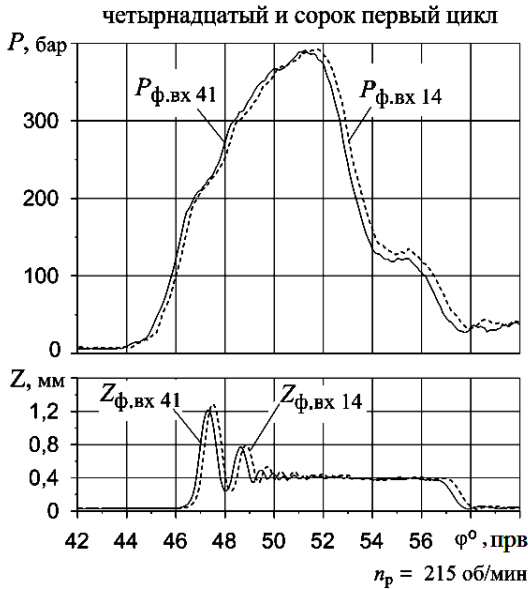


Рис.8. Совмещённые осциллограммы циклов разгона и выбега с близкими значениями оборотов распределительного вала  $n_p$

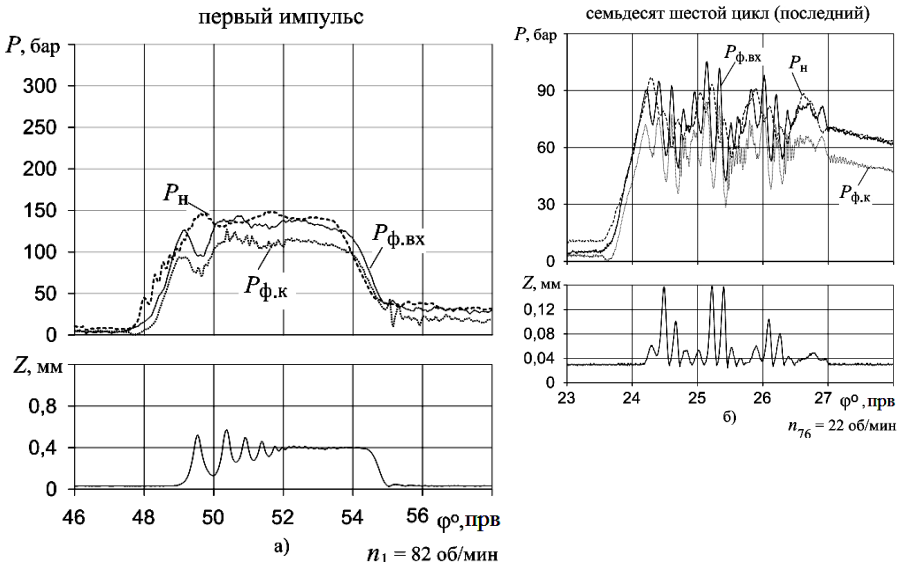


Рис.9 Процессы впрыскивания на крайних режимах эксперимента

а) 1 – цикл; б) 76 – цикл

### **Выводы**

Предложенная и реализованная методика исследования процесса впрыскивания при компактном изменении частоты вращения в условиях одного опыта обеспечивает выполнение эксперимента на переменных режимах в любом необходимом диапазоне частоты вращения.

Направление изменения частоты вращения не влияет на развитие процесса впрыскивания.

Основным фактором, определяющим характеристики топливоподачи на переменных режимах, является частота вращения. В частности, в условиях эксперимента для диапазона 0 – 220 – 0 об/мин составило 5,8 – 11,5 – 2,8°ПРВ.

### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

Костин А.К. Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник / А. К. Костин, Б. П. Пугачев, Ю.Ю. Кочинев; Под общ. ред. А. К. Костин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989.- 284 с.: ил.