

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПУСКОВЫХ СВОЙСТВ СУДОВОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

В.А. Рыжов, д.т.н., заслуженный конструктор РФ,  
зав. кафедрой ДВС Коломенского института  
(филиала) Московского политехнического университета

Представлены результаты исследований пусковых свойств судового дизель-генератора переменного тока с гидромеханической и аккумуляторной системами топливоподачи при запуске двигателя сжатым воздухом. Выявлены основные факторы, влияющие на расход пускового воздуха, время пуска и выхода двигателя на заданный скоростной режим при пуске двигателя из холодного и горячего состояний. Показано, что использование аккумуляторной системы топливоподачи обеспечивает улучшение пусковых свойств двигателя и качество переходного процесса при выходе на заданный скоростной режим.

К важнейшим показателям судовых дизель-генераторов относятся время запуска из различных тепловых состояний, время разгона до заданной частоты вращения, а при пусках сжатым воздухом с подачей его в цилиндры — количество запусков с одной закачки баллонов. В качестве объекта исследований был выбран дизель 8ЧН26/26 специального назначения с генератором переменного тока производства ОАО «Коломенский завод».

Исследования проводились в целях определения оптимальных параметров систем подачи топлива и регулирования, обеспечивающих минимальное время пуска из горячего и холодного исходных состояний дизеля. Сравнительные испытания двигателя были проведены с двумя вариантами систем топливоподачи: гидромеханической и аккумуляторной, спроектированной и изготовленной ОАО «Коломенский завод».

В связи с большим объемом испытаний и в целях сокращения текстовых описаний результатов в статье использованы следующие обозначения:

ГМСТ — гидромеханическая система топливоподачи;

ЭГСТ — электрогидравлическая (аккумуляторная) система топливоподачи;

ГПК — главный пусковой клапан;

$n$  — частота вращения;

$t_{пв}$  — время прокручивания дизеля до начала подачи топлива;

$t_y$  — время впрыска (длительность управляющего импульса);

$t_{п}$  — общее время пуска;

$t_0$  — время опережения впрыска топлива;

$t_{разг}$  — время разгона двигателя на топливе при пуске;

$t_{пр}$  — время до достижения необходимого давления впрыска;

$p_a$  — давление впрыска;

$p_{a з}$  — заданное давление впрыска;

$p_{a \min}$  — минимальное давление впрыска, обеспечивающее устойчивое воспламенение топлива;

$p_{\max}$  — максимальное давление сгорания в цилиндрах;

$p_{\text{возд}}$  — давление воздуха в пусковых баллонах;

$G_{в.р}$  — средний расход воздуха на пуске;

$\Theta_0$  — угол опережения впрыска.

Параметры  $t_y$ ,  $t_{пр}$ ,  $p_a$ ,  $p_{a з}$  и  $p_{a \min}$  относятся к аккумуляторной системе подачи топлива. Их значения в ходе испытаний изменялись в целях минимизации времени пуска, поскольку возможности гибкого управления параметрами топливоподачи и законами регулирования в ЭГСТ позволяют это сделать. Настройки гидромеханической системы питания при пуске не изменялись из-за ограничений, связанных с обеспечением штатных режимов работы под нагрузкой.

За критерий теплового состояния дизеля принята температура масла в картере. Согласно требованиям ТУ минимальная температура масла, при которой разрешается запуск двигателя, составляет 8 °С («холодный» двигатель). Минимальная температура масла, при которой разрешен прием нагрузки, 45 °С (двигатель «горячий»).

В результате исследования пусковых свойств горячего дизеля установлено следующее.

Время до начала работы регулятора частоты вращения не зависит от параметров ЭГСТ (рис. 1–2). Оно определяется инерционностью движущихся частей дизеля и величиной механических потерь. Величина  $t_{пв}$  (рис. 1) для прогретого дизеля составляет 0,45 с.

При варьировании  $t_0$  в выбранном диапазоне от 5 до 12 мс устойчивое воспламенение топлива в цилиндрах наблюдается при достижении  $p_{a \min} = 10$  МПа.

Экспериментально установлено, что увеличение  $p_{a з} > 10$  МПа не сокращает  $t_{п}$  и его составляющих.

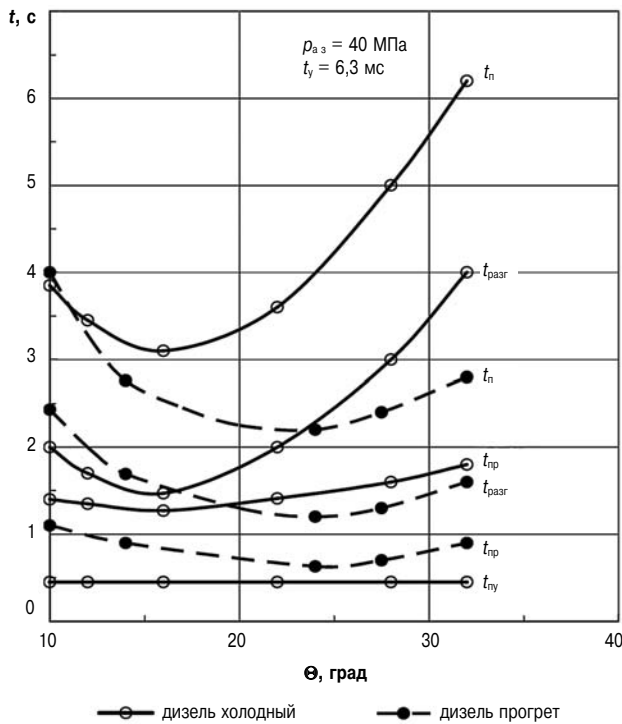


Рис. 1. Зависимость времени пуска и его составляющих от угла опережения впрыска топлива (система ЭГСТ)

Это можно объяснить тем, что время, за которое достигается  $p_a = 10$  МПа, определяется только инерцией движущихся частей и механическими потерями дизеля. Некоторое увеличение цикловых подач при  $p_a = 10$  МПа и при большем значении  $p_{a3}$ , очевидно не обеспечивает более полного сгорания топлива в цилиндрах.

При варьировании  $\Theta_0$  в выбранном диапазоне от 10 до 32 град величина  $p_{a \min}$ , при которой наблюдается начало устойчивого воспламенения, изменяется в зависимости от установленного угла опережения впрыскивания, поэтому изменение величины  $\Theta_0$  ведет к изменению  $t_{пр}$ .

Если при задании  $\Theta_0 = 10^\circ$  устойчивое воспламенение наблюдается с  $p_{a \min} = 15$  МПа, то при увеличении  $\Theta_0$  до  $24^\circ$  величина  $p_{a \min}$  снижается до 12,5 МПа. В результате  $t_{пу}$  уменьшается с 1,05 до 0,65 (см. рис. 1). Дальнейшее увеличение  $\Theta_0$  до  $32^\circ$  приводит к повышению  $p_{a \min}$  до 13 МПа.

Таким образом, при варьировании  $\Theta_0$  в выбранном диапазоне от 10 до 32 град, задание  $p_{a3} > 15$  МПа нецелесообразно, поскольку величины  $t_n$ ,  $t_{пр}$  и  $t_{разг}$  не улучшаются при  $p_{a3} > 15$  МПа.

Продолжительность  $t_{разг}$  при неизменном законе регулирования частоты вращения в основном определяется величинами  $\Theta_0$  или  $t_0$ , причем более сильное влияние на  $t_{разг}$  оказывает  $\Theta_0$ . Например, при пусках с заданием  $\Theta_{0 \text{ опт}} = 24^\circ$  или  $t_{0 \text{ опт}} = 10$  мс значение  $t_{разг}$  имеет одну и ту же величину 1,2 с (см. рис. 1, 2). Снижение  $t_0$  на 25 %

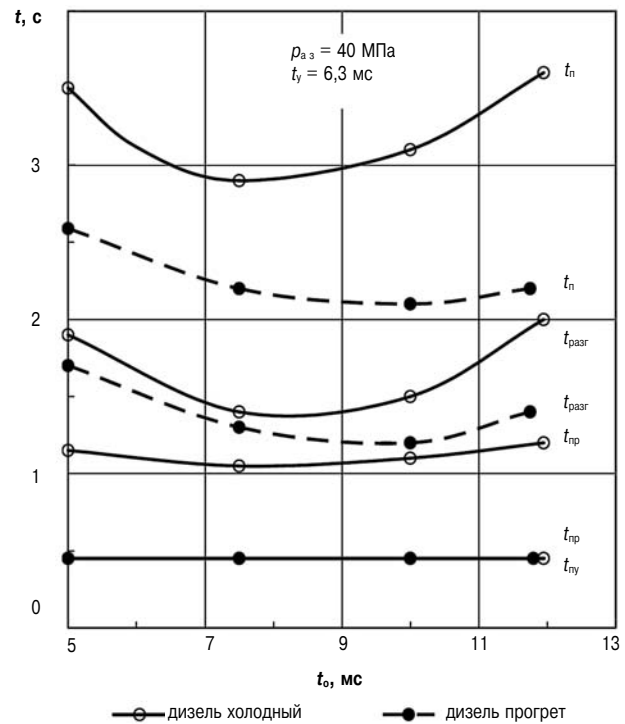


Рис. 2. Зависимость времени пуска и его составляющих от времени опережения впрыска топлива (система ЭГСТ)

ведет к увеличению  $t_{разг}$  на 10 %. Это соотношение основано на том, что заданное значение опережения впрыскивания устанавливается при  $n = \text{const}$ . В этом случае  $\Theta_0$  устанавливается пересчетом по  $t_0$ , поэтому изменение  $t_0$  на 25 % ведет к пропорциональному изменению  $\Theta_0$  на 25 %.

Изменение  $\Theta_0$  или  $t_0$  и связанное с этим перераспределение топлива в камере сгорания, а также взаимное влияние других факторов на рабочий процесс дизеля, приводит к тому, что при варьировании  $\Theta_0$  в зонах от 10 до 32 град и от 5 до 10 мс наблюдаются оптимальные значения  $t_{пр}$  (только при  $\Theta_0 = \text{var}$ ),  $t_{разг}$ , а соответственно, и  $t_n$ . Наименьшее значение  $t_n$  обеспечивается заданием  $t_0 = 10$  мс и составляет от 2,0 до 2,2 с (см. рис. 2). При переходе на варьирование  $\Theta_0$  увеличивается  $t_{пр}$ , а следовательно, и  $t_n$ . Оптимальное значение  $t_n$  в этом случае обеспечивается заданием  $\Theta_0 = 24$  град и составляет от 2,2 до 2,5 с.

Поскольку такие составляющие продолжительности процесса пуска  $t_n$ , как  $t_{пр}$  и  $t_{разг}$  имеют более сильную зависимость от  $\Theta_0$ , чем от  $t_0$ , то именно поэтому  $t_n$  оказывается в большей зависимости от  $\Theta_0$ . Изменение  $\Theta_0$  в меньшую от оптимума сторону на 25 % ведет к увеличению  $t_n$  на 20 %, а уменьшение  $t_0$  в ту же сторону на 25 % ведет к увеличению  $t_n$  на 10 %.

Обычно при пусках горячего дизеля  $p_{a3} > p_{a\min}$  на (50–10) %. Это соотношение устанавливается примерно за время от 0,8 до 1,0 с момента начала разгона. Поскольку ТНВД работают на аккумуляторы и основную часть  $t_{п}$  рейка ТНВД находится на упоре, то закон изменения положения рейки в процессе пуска на  $t_{п}$  не влияет. При пусках с заданием  $\Theta_0$  или  $t_0$  значение  $p_{\max}$  не выходит за пределы 5 МПа.

Изменение длительности управляющего импульса ( $t_{y\max}$ ) от максимально возможной, равной от 6,3 до 5 мс, на  $t_{п}$  не влияет. Дальнейшее снижение  $t_{y\max}$  с 5 до 2 мс приводит к увеличению  $t_{п}$  на 3,2 с.

Запуск дизеля при  $t_{y\max} = 1,25$  мс осуществить невозможно (рис. 3).

Изменение начального давления воздуха в пусковых баллонах ( $p_{\text{возд}}$ ) в диапазоне от 1,8 до 4,5 МПа заметного влияния на  $t_{п}$  не оказывает. Наименьшее значение  $p_{\text{возд}}$ , при котором возможен запуск горячего дизеля, составляет 1,5 МПа. Осциллограмма процесса пуска с заданием  $t_0 = 10$  мс представлена на рис. 4.

Максимальное число пусков с одной закачки баллонов при оптимальной настройке системы с заданием  $t_0 = 10$  мс составляет 16, при среднем значении расхода воздуха на пуск  $G_{в\text{ ср}} = 0,705$  кг.

ГМСТ обеспечивает 22 пуска с одной закачки баллонов при  $G_{в\text{ ср}} = 0,623$  кг. При этом  $t_{п}$  составляет от 2,2 до 2,7 с. Меньший расход  $G_{в\text{ ср}}$  с ГМСТ объясняется тем, что начало разгона дизеля обеспечивается через 0,6 с с момента вклю-

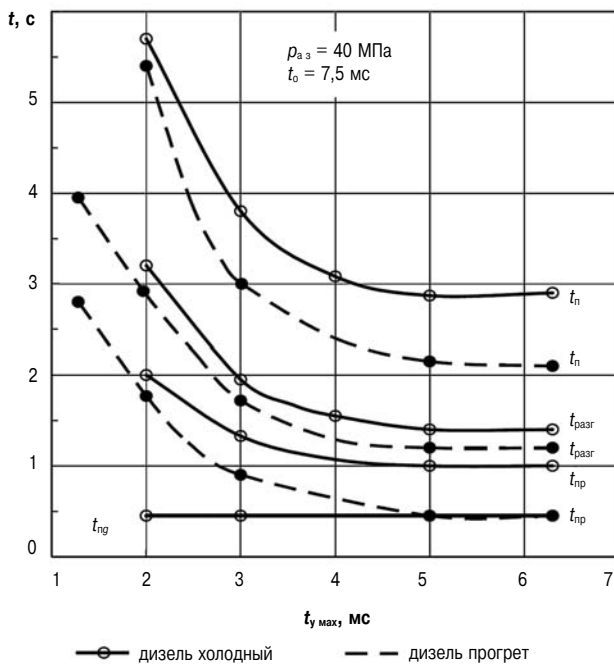


Рис. 3. Зависимость времени пуска дизеля и его составляющих от ограничения длительности управляющего импульса (система ЭГСТ)

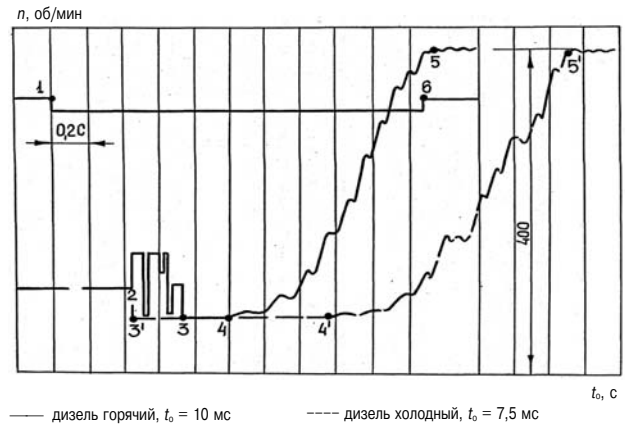


Рис. 4. Осциллограммы пусков дизеля с заданием  $t_0$

чения ГПК. Начало разгона дизеля с ЭГСТ происходит только с момента достижения  $p_{a\min}$  и составляет 0,9 с.

Меньшее время пуска дизеля с ЭГСТ обеспечивается сокращением времени разгона двигателя. Если  $t_{\text{разг}}$  дизеля с оптимальной настройкой ЭГСТ составляет 1,2 с, то  $t_{\text{разг}}$  дизеля с ГМСТ соответствует 1,6 (см. рис. 2).

Таким образом,  $t_{п}$  дизеля с ЭГСТ может быть существенно улучшено за счет сокращения  $t_{пр}$ , если перед началом пуска обеспечить  $p_a$ , соответствующее  $p_{a\min}$  или ускорить его достижение в процессе пуска. ЭГСТ позволяет достигать заданной частоты вращения при пуске без заброса. Величина заброса частоты вращения при разгоне дизеля из горячего состояния с ГМСТ составляет 20 %.

В результате исследования пусковых свойств холодного дизеля установлено следующее.

Поскольку время  $t_{п}$  определяется временем разгона дизеля до 35 об/мин, то оно не зависит от параметров ЭГСТ и определяется инерцией движущихся частей и величиной механических потерь дизеля. Величина  $t_{пр}$  для холодного дизеля составляет 0,47 с (см. рис. 1, 2).

При варьировании  $t_0$  в диапазоне от 5 до 13 мс и  $\Theta_0$  в диапазоне от 10 до 32 град величина  $p_{a\min}$  зависит от настройки системы. Минимальная величина  $t_{пр}$  достигается заданием  $t_0 = 7,5$  мс и составляет 1,03 с, что соответствует достижению  $p_{a\min} = 23$  МПа.

Снижение  $t_0$  на 2,5 мс и увеличение на 5 мс приводит к увеличению  $p_{a\min}$  до 24,5 МПа и  $t_{пр}$  на 0,15 с (рис. 1).

При варьировании  $\Theta_0$  минимальная величина  $t_{пр}$  составляет 1,2 с и обеспечивается заданием  $\Theta_0 = 16$  град, что соответствует достижению  $p_{a\min} = 25$  МПа.

Изменение  $\Theta_0$  на 6 град в любую сторону приводит к увеличению  $p_{a\min}$  до 27 МПа и  $t_{пр}$  до 1,4 с (см. рис. 1).

Таким образом,  $t_{пр}$  определяется продолжительностью нарастания давления до  $p_{a \min}$ . При варьировании  $\Theta_0$  в выбранном диапазоне наибольшая величина  $p_{a \min}$  составляет 27 МПа, поэтому установка  $p_{a 3} > 27$  МПа нецелесообразна. Увеличение  $p_{a 3} > 27$  МПа не сокращает  $t_{п}$  и его составляющих, вероятно, по тем же причинам, что и при пусках горячего дизеля. При варьировании  $t_0$  в выбранном диапазоне аналогичный результат наблюдается с  $p_{a 3} > 24,5$  МПа.

Продолжительность  $t_{разг}$  при неизменном законе регулирования зависит от заданных величин  $\Theta_0$  или  $t_0$ . Минимальная величина  $t_{разг}$  составляет 1,4 с и обеспечивается заданием  $\Theta_0 = 16$  град или  $t_0 = 7,5$  с. Изменение  $\Theta_0$  или  $t_0$  приводит к увеличению  $t_{разг}$  (см. рис. 1, 2).

Изменение  $\Theta_0$  в любую сторону от оптимального на 25 % приводит к увеличению  $t_{разг}$  на 6,25 % (см. рис. 1).

Увеличение  $t_0$  от оптимального значения на 25 % ведет к увеличению  $t_{разг}$  на 5 %. Снижение  $t_0$  на 25 % приводит к увеличению  $t_{разг}$  на 28,6 % (см. рис. 2).

При варьировании  $\Theta_0$  в зоне от 10 до 32 град и  $t_0$  в зоне от 5 до 13 мс наблюдаются оптимальные значения  $t_{пр}$ ,  $t_{разг}$ , а соответственно, и  $t_{п}$  (см. рис. 1, 2).

Наименьшее значение  $t_{п}$  обеспечивается заданием  $t_0 = 7,5$  мс и составляет от 2,8 до 3,0 с (см. рис. 2). При переходе к заданию  $\Theta_0$  увеличивается  $t_{пр}$ , а следовательно, и  $t_{п}$ . Минимальное  $t_{п}$  составляет от 3,0 до 3,2 с и обеспечивается заданием  $\Theta_0 = 16$  град.

Обычно при пусках  $p_{a 3} > p_{a \min}$  на (50–100) %. Характерное значение  $p_{a \min}$  достигается примерно за (1,2 – 1,3) с с момента начала разгона, то есть основную часть  $t_{п}$  рейка ТНВД находится на упоре.

Величина  $p_{max}$  при пусках с заданием  $t_0$  и  $\Theta_0$  не превышает 6 МПа.

Изменение  $t_{y \max}$  в пределах от 5,0 до 6,3 мс на  $t_{п}$  влияния не оказывает. Изменение  $t_{y \max}$  от 5 до 2 мс ведет к увеличению  $t_{п}$  на 100 % (рис. 2). Пуск двигателя с заданием  $t_{y \max} < 2$  мс осуществить не удалось.

Изменение начального давления воздуха в пусковых баллонах в диапазоне от 2,5 до 4,5 МПа заметного влияния на  $t_{п}$  не оказывает.

Наименьшее значение  $p_{возд}$ , при котором возможен пуск холодного дизеля, — 1,8 МПа.

Максимальное число пусков с одной закачки баллонов при оптимальной настройке системы с заданием  $t_0 = 7,5$  мс — 12, что соответствует ТУ на дизель. Средний расход воздуха за пуск  $G_{вср} = 1,18$  кг.

ГМСТ обеспечивает 19 пусков с одной закачки баллонов при  $G_{вср} = 0,741$ . При этом  $t_{п}$  находится в диапазоне от 2,9 до 3,2 с.

Меньший расход  $G_{вср}$  с ГМСТ, как и при пусках горячего дизеля, объясняется более ранним началом разгона дизеля. Меньшее  $t_{п}$  с ЭГСТ обеспечивается меньшим  $t_{разг}$ . Начало разгона дизеля с ГМСТ обеспечивается через (0,6–0,7) с, а с ЭГСТ через (1,42–1,67) с,  $t_{разг}$  дизеля с ГМСТ 2 с;  $t_{разг}$  дизеля с ЭГСТ 1,5 с.

Таким образом,  $t_{п}$  холодного дизеля, так же, как и горячего, можно существенно улучшить за счет сокращения  $t_{пр}$ , ускорив достижение  $p_{a \min}$ .

Осциллограмма процесса пуска холодного дизеля с заданием  $t_0 = 7,5$  мс представлена на рис. 4.

Величина заброса частоты вращения при разгоне холодного дизеля с ГМСТ составляет 30 %. ЭГСТ позволяет достигать заданной частоты вращения без заброса.

Пусковые характеристики со всеми видами нелинейных законов регулирования по всем параметрам аналогичны характеристикам с линейным пропорциональным законом.

При пусках с линейным пропорционально-интегральным законом регулирования заброс по частоте вращения составлял 80 об/мин ( $n = 400$  об/мин).

При пусках с линейным пропорционально-интегро-дифференциальным законом регулирования заброс по частоте вращения составлял около 80 об/мин и отмечался колебательный характер окончания переходного процесса, поэтому основная часть исследований пусковых свойств была проведена с линейным пропорциональным законом регулирования частоты вращения.

Таким образом, при оптимальной настройке ЭГСТ обеспечивает снижение времени пуска дизеля по сравнению с ГМСТ.

Основными параметрами, от которых зависит  $t_{п}$  дизеля с ЭГСТ, являются: опережение подачи топлива, продолжительность и давление впрыскивания.

Время пуска дизеля из холодного и горячего состояний, а также средний расход воздуха могут быть существенно улучшены за счет скорости нарастания  $p_a$  до  $p_{a \min}$ . При пусках дизеля с ЭГСТ из холодного и горячего состояний целесообразнее обеспечивать опережение подачи топлива путем задания постоянного времени опережения.

ЭГСТ позволяет достигать заданной при пусках частоты вращения дизеля без заброса по частоте при линейном пропорциональном, нелинейных пропорционально-интегральном и пропорциональном интегрально-дифференциальном законах регулирования частоты вращения.

ЭГСТ позволяет делать запуск дизеля с меньшими  $q_{ц}$ , чем ГМСТ.

Таким образом, результаты испытаний позволили установить следующее:

➤ время прокрутки дизеля до начала подачи воздуха в цилиндры зависит от параметров масла, определяющих механические потери и инерционности движущихся масс двигателя;

➤ время разгона двигателя на топливе обеспечивается уровнем давления впрыска, которое для холодного двигателя составляет 10 МПа, а для горячего 7,5 МПа;

➤ при использовании экспериментальных систем регулирования частоты минимальное время пуска достигается без заброса по частоте вращения;

➤ вязкостно-температурные характеристики масла оказывают существенное значение на время пуска и затраты энергии на прокручивание двигателя;

➤ законы регулирования частоты вращения на время разгона двигателя влияния не оказывают;

➤ кроме учета вязкостно-температурных ограничений по маслу при моделировании процессов пуска необходимо учитывать угол опережения подачи топлива;

➤ оптимальное время пуска, при прочих ограничениях, достигается заданием постоянного времени опережения, обеспечивающего изменение

угла опережения впрыска от минимально допустимого, при котором достигается максимальная температура воздуха в конце сжатия, до максимального, при достижении заданной частоты вращения;

➤ при пуске холодного двигателя предпочтительнее обеспечить многофазный впрыск с коррекцией по опережению подачи топлива.

---

#### Литература

1. Рыжов В.А. Повышение эффективности дизеля 8ЧН26/26 на режимах работы маневрового тепловоза // Тезисы докладов научной конференции Моск. Гос. открытого университета. Коломна, 1999.

2. Крупский М.Г., Кузин В.Е., Рыжов В.А. Результаты испытаний дизеля 2ЧН26/26 с микроэлектронной аккумуляторной системой подачи топлива // Тезисы докладов научной конференции Моск. Гос. открытого университета. Коломна, 1999.

3. Рыжов В.А. Ткачев В.Т. Резервы уменьшения расхода топлива и масел // Локомотив. — 2013. — № 3. — С. 40–42.

4. Рыжов В.А. Совершенствование характеристик форсированных среднеоборотных двигателей двойного назначения средствами топливоподачи и воздухообеспечения. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2018. 325 с.

5. Раенко М.И., Рыжов В.А. Оценка прочностной надежности крышек цилиндров транспортных дизелей по критерию долговечности // Двигателестроение. — 2012. — № 1. — С. 7–17.