УДК 12.06.662.75

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОФОРСИРОВАНИЯ ТОПЛИВА НА ЛОКОМОТИВНЫХ ДИЗЕЛЯХ

Балабин В.Н., Васильев В.Н.

ФГБОУ ВПО РФ «Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)», Москва, e-mail: tu@miit.ru

Представлены результаты применения технологии термофорсирования топлива на локомотивных дизелях. Создан стенд для исследования влияния температуры и способа подогрева топлива на работоспособность штатной топливной аппаратуры тепловозных дизелей. Приведены некоторые результаты испытаний на безмоторном стенде и на локомотивном дизеле.

Ключевые слова: тепловозный двигатель, термофорсирование топлива, безмоторный и моторный стенды

FEATURES OF APPLICATION OF THERMOSPEEDING UP OF FUEL ON LOCOMOTIVE DIESELS

Balabin V.N., Vasilyev V.N.

Federal state educational institution of higher professional education of the Russian Federation «The Moscow state University of railway engineering (MIIT)», Moscow, e-mail: tu@miit.ru

Results of application of technology of thermospeeding up of fuel on locomotive diesels are presented. The stand for research of influence of temperature and a way of heating of fuel on operability of the regular fuel equipment of diesel diesels is created. Some results of tests are given in the motorless stand and in the locomotive diesel.

Keywords: diesel engine, fuel thermospeeding up, motorless and motor stands

Длительное время вопросы улучшения работы двигателей путем подогрева топлива оставались предметами обсуждения и дискуссий. Наиболее ранними являются предложения Е. Ричардсона о подогреве топлива до критических значений температур и давлений и Д. Гроффа – выше температур самовоспламенения. Однако данные предложения не были реализованы.

Исследования в нашей стране ведутся с 30-х годов прошлого века. Наиболее ранние опыты проводились Б.Ф. Коробовым в отделе нефтяных двигателей ЦИАМ на четырехцилиндровом двигателе Брохервуд-Рикардо (Ne = 31,61 кВт). В качестве топлива использовался газойль, температура которого повышалась от постороннего источника до поступления в насос высокого давления.

Подогрев тяжелых топлив, как правило, проводится для снижения их вязкости и обеспечения процессов топливоподачи. Например в двигателях фирмы Фиат (N_e = 2646 кВт при $n_д$ = 125 мин$^{-1}$) вначале топливо нагревают в отстойниках до 70–80 °С и под давлением (0,3–0,5 МПа), во избежание вспенивания, направляют в сепараторы при температуре 90–95 °С. Далее насосами высокого давления при 100–105 °С топливо подается к форсункам.

По мнению специалистов фирмы Зульцер, температуру топлива до топливных насосов высокого давления (ТНВД) можно поднимать до 130 °С, при условии стабилизации давления в магистралях топливоподачи не ниже 0,3–0,4 МПа.

Необходимо также отметить, что подогрев моторных топлив является одним из решений в проблеме создания многотопливного двигателя, интерес к которому сегодня заметно снизился.

Для стабилизации физических параметров дизельных топлив, подогрев может осуществляться двумя путями – на линиях низкого и высокого давлений. При подогреве на линии низкого давления температура топлива, как правило, не превышает 40–50 °С. Это обеспечивает сохранение значений вязкости, сжимаемости и плотности в требуемых при эксплуатации пределах. При более высоких температурах производительность ТНВД падает, и, как следствие, уменьшается мощность двигателя,

По условиям формирования цикловой подачи ТНВД, дальнейшее повышение температуры топлива целесообразно лишь при подводе тепла на линии высокого давления. При этом подогрев можно осуществлять как непосредственно в форсунке, так и в нагнетательном трубопроводе. Преимуществом первого способа является возможность сохранения неизменными длины трубок высокого давления и, следовательно, действительных углов опережения впрыска.

Наиболее распространенными способами подвода тепла к топливу являются использование электроподогревателей и подогрев теплом выхлопных газов ди-

зеля [1]. Наряду с возможностью стабилизации характеристик топливоподачи повышение температуры дизельного топлива свыше 100 °С ставит своей целью улучшение индикаторных показателей и повышение экономичности работы тепловозных дизелей.

Исследование работоспособности топливной аппаратуры тепловозных дизелей при различных способах подогрева топлива

В области высоких температур работоспособность топливовпрыскивающей аппаратуры будет определяться не только изменением физических параметров топлива, но и температурными деформациями деталей форсунки, величиной зазоров в сопрягаемых элементах, возможностью их взаимного перемещения, наличием достаточной толщины пленки топлива между прецизионными поверхностями и другими факторами.

В связи с этим целью экспериментального исследования являлось:

– установление влияния температуры и способа подогрева топлива на работоспособность штатной топливной аппаратуры тепловозных дизелей;

– определение допустимых температур предварительного подогрева топлива на линии высокого давления по условиям работоспособности форсунок.

Методика проведения исследований предусматривала:

– подогрев дизельного топлива непосредственно в форсунке;

– подогрев дизельного топлива в нагнетательном трубопроводе линии высокого давления между ТНВД и форсункой.

Схема стенда представлена на рис. 1 (топливный бак, коллектор низкого давления и привод толкателя ТНВД на схеме не показаны), а общий вид стендовой установки – на рис. 2.

Работа стенда заключается в следующем. ТНВД 1 топливо из бака подается в трубопровод высокого давления 2. На трубопроводе установлен спиральный константановый подогреватель 4, изолированный от металла трубопровода слоем стеклоленты и асбестом. Для уменьшения теплоотдачи в окружающую среду, наружный слой теплоизоляции выполнен из асбестового волокна толщиной 8–10 мм. Регулирование температуры подогревателя осуществлялось реостатом 10. После подогрева до необходимых температур на линии высокого давления топливо подавалось форсункой 6 в теплоизолированный объем емкостью 1,5 см^3, после чего сливалось в мерную емкость 9. Обратный слив топлива форсунки через трубопровод 8 отводился в отдельную емкость. Измерение объемов впрыскиваемого и сливаемого через зазоры топлива производилось после его охлаждения до + 20 °С. Давление впрыска форсунки контролировалось манометром 3, установленным через переходник на трубопроводе высокого давления.

С целью максимального приближения условий работы форсунки на стенде к реальным условиям работы в дизеле, корпус форсунки был оборудован термосифонным теплообменником 5. Температура охлаждающей жидкости в зоне корпуса форсунки поддерживалась постоянной в диапазоне 50–180 °С и в случае необходимости регулировалась герметизированным подогревателем при помощи реостата 11. Контроль температуры охлаждающей жидкости теплообменника осуществлялся ртутным термометром 7.

Основными задачами экспериментального исследования являлись:

- разработка и изготовление безмоторного и моторного стендов для проверки работы штатной топливной аппаратуры при различном уровне термофорсирования;
- выбор места нагрева топлива с проверкой вариантов подогрева топлива непосредственно в форсунке и в трубопроводе высокого давления;
- оценка работоспособности узлов форсунки при работе на нагретом топливе и установление предельных значений повышения температуры топлива.

В результате испытаний установлено:

- влияние температуры подогрева топлива на величину цикловой подачи при постоянном нагнетательном ходе плунжера топливного насоса;
- эффективность работы штатной форсунки тепловозного дизеля типа в условиях высоких температур распыливаемого топлива;
- влияние подогрева на величину обратного слива топлива форсунки;
- эффективность работы штатной форсунки при различных способах подогрева топлива на линии высокого давления;
- перепад температур топлива на входе и выходе из форсунки.

Во всех случаях, как при подогреве топлива в трубопроводе высокого давления и подаче нагретого топлива в форсунку, так и при подогреве топлива непосредственно в форсунке, нагнетательный ход плунжера топливного насоса высокого давления сохранялся постоянным и на один ход обеспечивал подачу в трубопровод высокого давления в количестве 0,885 см^3.

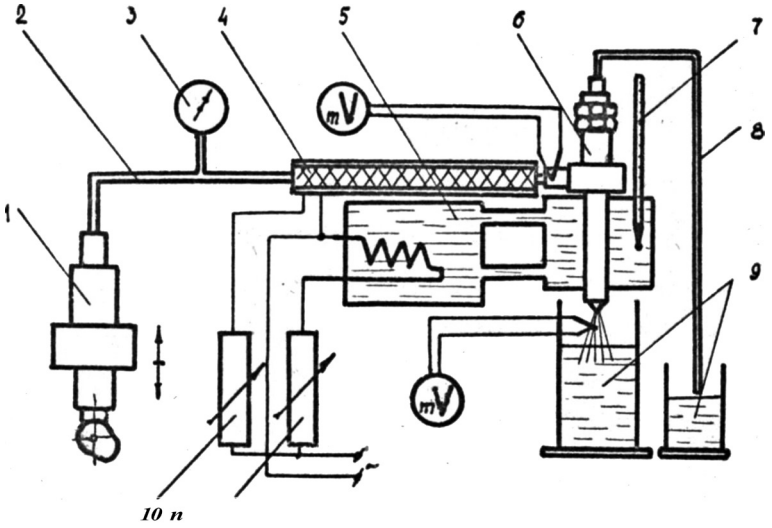

Рис. 1. Схема безмоторного стенда для исследования работоспособности топливной аппаратуры высокого давления в условиях высоких температур: 1 – топливный насос; 2 – линия высокого давления; 3 – манометр; 4 – электроподогреватель топлива; 5 – водяной теплообменник; 6 – форсунка; 7 – термометр; 8 – сливной трубопровод; 9 – мерные емкости; 10, 11 – реостаты

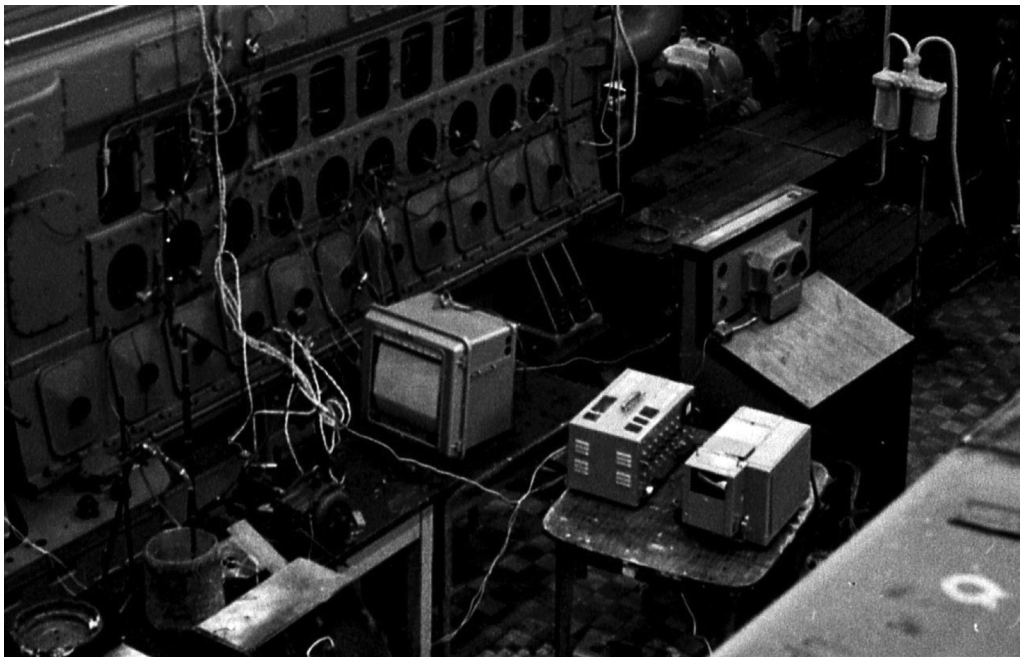

Рис. 2. Общий вид стендовой установки

Среднестатистические данные испытаний десяти форсунок при подогреве топлива в корпусе форсунки представлены в табл. 1.

Установлено, что подогрев топлива возможен до температуры корпуса в зоне щелевого фильтра, равной ~ 170 °С. Дальнейшее повышение температуры приводит к прекращению качественного распыла. При снижении температуры корпуса на 5–7 °С работоспособность форсунки полностью восстанавливалась. Во всем диапазоне изменения температур (+ 50 ÷ + 170 °С) отсечка топлива была резкой и соответствовала нормам.

Отметим, что при достижении температуры $t_{вп}$ = 140 °С в распыливаемом топливе наблюдалось появление паровой, мелкодисперсной фазы. С увеличением температуры подогрева однородность факела улучшилась, возрос угол его раскрытия.

Таблица 1

Усредненные данные испытаний при подогреве топлива непосредственно в форсунке

Температура корпуса форсунки, $t_ф$ °С	Температура топлива при впрыске, $t_{ВП}$ °С	Производительность форсунки, $G_ф$, см^3	Обратный слив, $V_{сл}$ см^3	Подача насосом, $V_Н$, см^3	Давление впрыска, $P_{ВП}$, МПа	Характеристика факела
50	48	27,89	0,61	28,5	21,5	Распыл согласно техническим условиям
60	58	27,68	0,82	28,5	21,5	
70	67	27,35	1,15	28,5	21	
100	96	25,84	2,66	28,5	20	
130	125	24,16	4,34	28,5	19,5	
150	146	23,05	5,45	28,5	19	Мелкодисперсная фракция
160	154	22,42	6,08	28,5	18,5	
170	163	21,63	6,87	28,5	18	
180	172	20,13	1,37	28,5	–	Струйная подача

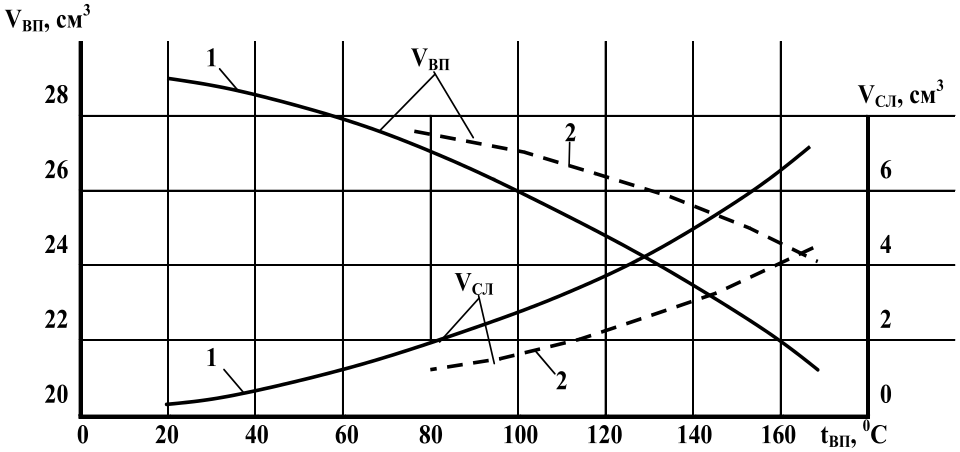

Рис. 3. Производительность VВП и величина обратного слива VСЛ форсунки в зависимости от температуры подаваемого топлива. 1 – подогрев форсунки; 2 – подогрев нагнетательного трубопровода

Одновременно с ростом температуры топлива увеличились утечки топлива через зазоры в сопрягаемых прецизионных деталях. Учитывая характер изменения зависимости $V_{сл} = f(t_t)$, показанной на рис. 3, при достижении температуры распыливаемого топлива $t_{вп} = 150$ °С определяющим фактором в увеличении утечек следует считать тепловое расширение деталей форсунки, а при температурах более 150 °С вязкость топлива практически остается неизменной. Причиной прекращения нормальной работоспособности форсунок при достижении температуры корпуса форсунки $t_a = 170$ °С являлось зависание иглы распылителя.

Изменение условий подвода тепла к топливу, а именно – подогрев в нагнетательном трубопроводе, оказал положительное влияние на характеристики работы форсунки. В указанном диапазоне температур величина обратного слива уменьшилась в среднем на 35 %. Установлена возможность повышения температуры подаваемого в форсунку топлива до 350 °С. Температура распыливаемого топлива в этом случае составила 170 °С. Дальнейшее (свыше 350 °С) повышение температуры топлива в трубопроводе приводит к зависанию иглы распылителя и струйной подаче. Работоспособность форсунки полностью восстанавливается после снижения величины подогрева на 2–3 %.

При температуре 140 °С, в факеле наблюдалось появление паровой фазы, а сама конфигурация факела менялась аналогично описанной при подогреве корпуса форсунки. Данные испытаний представлены в табл. 2.

Характерной особенностью работы форсунок тепловозных дизелей на горячем топливе (как при подогреве в корпусе форсунки, так и в нагнетательном трубопроводе)

является снижение давления начала подъема иглы распылителя с повышением температуры. При неизменном усилии затяжки пружины характер изменения величины $P_{вп}$ описывается полученной на основании экспериментальных данных эмпирической зависимостью

$$P_{вп} = 23{,}03 - 0{,}0273 \cdot t_{вп}, \text{ МПа},$$

где $t_{вп}$ в °С, что свидетельствует о снижении сил трения в прецизионной паре «игла-корпус распылителя». В частности, предпринята попытка объяснить это явление исходя из предположения, что трение в зазоре между корпусом распылителя и иглой является жидкостным. Результаты расчета величины $P_{вп}$ при $t_{вп} = 160$ °С показали сходство с опытными данными в пределах 1,5 %.

Экспериментальные исследования выполнялись на тепловозном дизеле типа Д100 и проводились в условиях моделирования режимов работы по генераторной характеристике. Подогрев топлива осуществлялся в нагнетательном трубопроводе в соответствии с программой исследований.

Таблица 2

Усредненные данные испытаний при подогреве топлива на линии высокого давления

Температура трубопровода, $t_{ТР}$ °С	Температура топлива при впрыске, $t_{ВП}$ °С	Производительность форсунки, $G_Ф$, см^3	Обратный слив, $V_{СЛ}$, см^3	Подача насосом, $V_Н$, см^3	Давление впрыска, $P_{ВП}$, МПа	Характеристика факела
100	80	26,47	1,03	28,5	21,5	Распыл согласно техническим условиям
160	95	27,09	1,41	28,5	20	
180	105	26,80	1,70	28,5	20	
200	110	26,62	1,88	28,5	20	
250	130	25,88	2,62	28,5	19,5	
300	150	24,99	3,51	28,5	19	Мелкодисперсная фракция
350	170	24,10	4,40	28,5	18	
365	180	27,10	1,40	28,5	17	Нестабильный впрыск

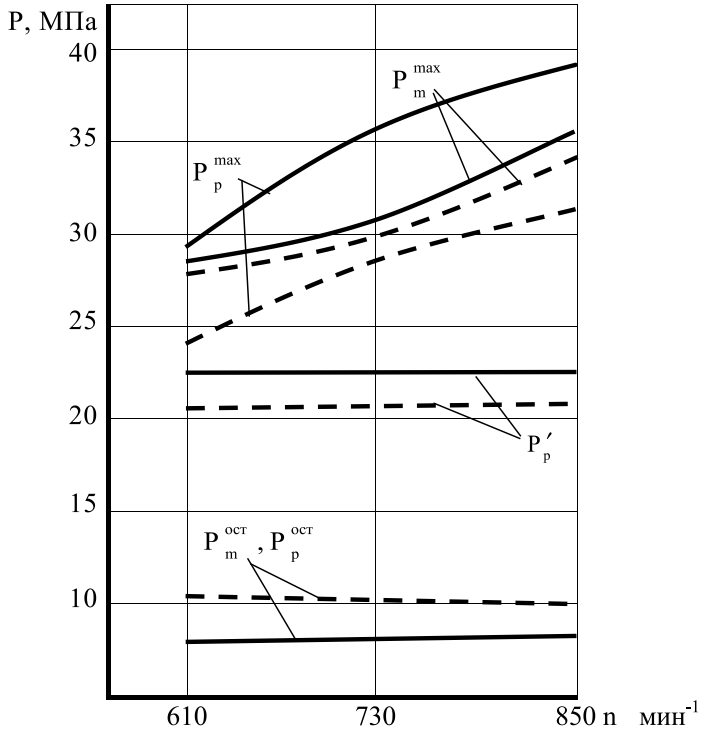

Рис. 4. Влияние подогрева топлива на изменение давлений в топливной системе.
——— без подогрева; - - - - - - подогрев в 463К

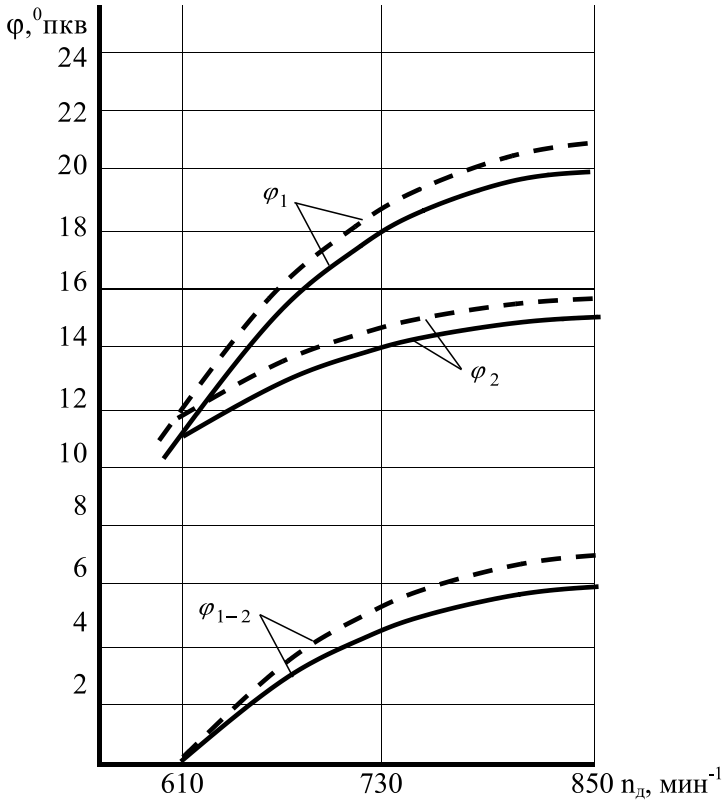

Рис. 5. Влияние подогрева топлива на продолжительность впрыска.
——— без подогрева; - - - - - - подогрев в 463К

Анализ полученных результатов показал, что повышение температуры топлива в нагнетательном трубопроводе ведет к существенному изменению давлений в системе впрыска. Из рис. 4 видно, что при температуре подогрева 190 °С максимальное давление топлива под иглой p_p^{max} в среднем снижается на 14–18 %, а максимальное давление топлива в трубопроводе $p_{тр}^{max}$ – на 4–4,5 %.

Обозначения на рис. 4:

P_p^{max} – максимальное давление под иглой распылителя;

P_m^{max} – максимальное давление в ТВД;

P_p' – давление начала подъема иглы распылителя;

$P_m^{ост}$, $P_p^{ост}$ – остаточное давление соответственно в ТВД и под иглой распылителя.

Наблюдается также падение давления начала подъема иглы, которое с величины $P' = 22{,}5$ МПа (фактическое давление начала впрыска в динамике) снижается до 20,2–20,4 МПа. Это составляет около 10–11 %.

Наряду с уменьшением величины p_p' остаточное давление в трубопроводе (при той же температуре подогрева) повышается и достигает величины $p_0' \cong 10$–10,2 МПа, т.е. увеличивается примерно на 20 %.

Известно, что продолжительность и запаздывание впрыска, в свою очередь, находятся в прямой зависимости от давления открытия иглы. Следовательно, перераспределение давлений топлива в системе оказывает влияние на продолжительность фаз топливоподачи.

Изменение продолжительности впрыска (в градусах поворота коленчатого вала, пкв) при подогреве топлива в нагнетательном трубопроводе показано на рис. 5.

Обозначения на рис. 5:

φ_1 – суммарная продолжительность впрыска;

φ_2 – продолжительность основного впрыска;

φ_{1-2} – продолжительность подвпрыска.

Из графика следует, что повышение температуры топлива ведет к росту общей продолжительности впрыска φ_1 при пропорциональном увеличении основной подачи φ_2 и подвпрыска φ_{1-2}.

В соответствии с экспериментальными данными подогрев топлива ведет к увеличению угла опережения впрыска топлива.

Следовательно, изменение закона впрыска при высокотемпературном подо-

греве дизельных топлив позволяет улучшить условия формирования рабочего цикла, а именно: уменьшить долю топлива, участвующего в самовоспламенении, и увеличить его количество, впрыскиваемое возле ВМТ. Это ведет к снижению динамических показателей и повышению качества рабочего процесса тепловозного двигателя.

Выводы

– Топливовпрыскивающая аппаратура устойчиво работает при температурах подогрева непосредственно в форсунке до 170 °С и в нагнетательном трубопроводе до 350 °С.

– Наиболее эффективным способом термической обработки топлива является его подогрев в нагнетательном трубопроводе, что позволяет достичь уровня температур, необходимого для начала деструктивных преобразований углеводородов.

– В пределах работоспособности форсунок, определяемой по температурам распыливаемого топлива, статическое давление начала подъема иглы снижается по линейному закону на 15 %.

Список литературы

1. Храмов М.Ю., Садеков М.Х. Улучшение характеристик двигателя путем термофорсирования топлива. // Вестник АГТУ, Теплофизика, теплоэнергетика. – Нижний Новгород, 2007. – № 6 (41). – С. 83–85.