

УДК 621.43.057

С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, В. Ф. Атаманюк

Вятский государственный университет, Киров

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ
ДИЗЕЛЯ С ТЕРМОФОРСИРОВАНИЕМ**

Разработана система предварительного подогрева дизельного топлива. Теоретически установлено, что подогрев вызывает сокращение подготовительной фазы процесса сгорания. Проведены стендовые исследования работы тракторного дизеля с термофорсированием. Определены пусковые характеристики и индикаторные показатели дизеля.

Ключевые слова: дизель, подогрев топлива, пусковые характеристики, стендовые испытания.

На сегодняшний день и в ближайшем будущем дизель является основным энергетическим агрегатом [1]. При этом его показатели, несомненно, определяются законом ввода теплоты и характером процесса сгорания. При неизменном характере процесса сгорания ввод и выделение теплоты лимитируются характеристикой впрыскивания с учетом ограничений по динамике тепловыделения. Дифференциальная характеристика впрыскивания в конкретном современном дизеле обеспечивает предельное допустимое значение жесткости процесса сгорания. Дальнейшее форсирование такого дизеля по среднему эффективному давлению маловероятно.

Ранее нами отмечалось, что достаточно перспективным вариантом может быть сокращение периода задержки воспламенения (ПЗВ) [4]. Снижение ПЗВ ликвидирует основную причину повышенной жесткости работы дизеля – накопление в цилиндре впрыскиваемого топлива, самовоспламеняющегося и сгорающего впоследствии с повышенной скоростью. Увеличение (за счет длительности ПЗВ) длительности процесса сгорания обеспечивает более мягкую динамику выделения тепла и более плавное нарастание давления в цилиндре дизеля. Следовательно, сокращение ПЗВ может существенно снизить жесткость процесса сгорания, открывая пути дальнейшего форсирования дизеля.

На основании проведенного анализа работ отечественных и зарубежных ученых удалось выделить следующие способы сокращения ПЗВ: применение свечей зажигания, использование свечей накаливания, установка жаропрочных вставок, керамическое напыление на стенки камеры сгорания, турбулизация заряда, использование калильных тел, применение присадок к топливу и т. п.

Объединяющим направлением может являться подача топлива, предварительно нагретого до температуры, сопоставимой с температурой самовоспламенения.

В соответствии с действующим соглашением о научно-техническом сотрудничестве на кафедре тракторов, автомобилей и энергетических средств Каменец-Подольского аграрно-технического университета Украины при участии наших специалистов были проведены совместные лабораторные исследования влияния управляемого предварительного теплового воздействия на топливо, поступающее в камеру сгорания, и испытания работы дизеля.

Объектом исследований явился быстроходный автотракторный дизель 2Ч10,5/12,0 (Д-120) с полусферической камерой сгорания (КС) в поршне и объемным способом смесеобразования. Известно, что отмеченный способ смесеобразования в первую очередь характеризуется повышенной жесткостью процесса сгорания.

Предлагаемый способ осуществления рабочего цикла дизеля показан на рисунке 1 [3].

В конце такта сжатия топливный насос высокого давления (ТНВД) подает топливо, которое предварительно нагревается в теплообменнике за счет температуры отработавших газов (ОГ), или во время пуска от электрической обмотки в подогревателе топлива до температуры, обеспечивающей его самовоспламенение при минимальном дополнительном нагреве от сжатого заряда воздуха. Топливо, поступая в камеру сгорания, смешивается с находящимся в ней сжатым зарядом воздуха и самовоспламеняется от собственной температуры. В результате этого самовоспламенение топлива в КС происходит практически

без задержки, предотвращая процесс накопления поступающего от ТНВД топлива. Тем самым минимизируется период объемного взрывообразного горения.

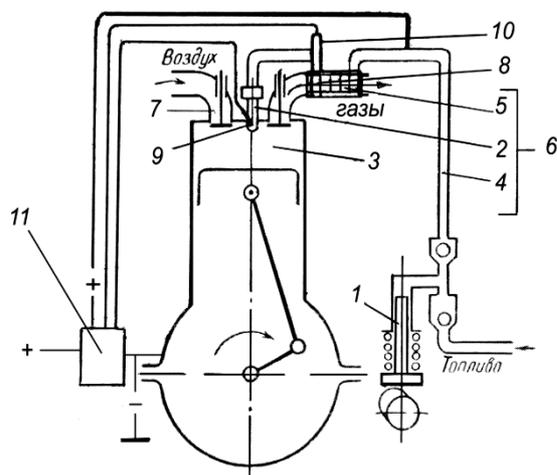


Рис. 1. Схема предварительного подогрева топлива [2]:

- 1 – топливный насос высокого давления;
- 2 – форсунка; 3 – камера сгорания;
- 4 – топливопровод высокого давления;
- 5 – теплообменник; 6 – подогреватель топлива;
- 7 – впускной канал; 8 – выпускной канал;
- 9 – датчик контроля температуры нагрева топлива;
- 10 – датчик контроля температуры нагрева топлива в теплообменнике;
- 11 – блок управления предварительным нагревом топлива, (микропроцессор)

Анализ полученных индикаторных диаграмм показал, что снижение ПЗВ и, соответственно, увеличение длительности процесса сгорания составляет до 5,2 градуса поворота коленчатого вала (ПКВ) в номинальном режиме и до 4,6 градуса ПКВ в режиме максимального крутящего момента [2]. Расчет и анализ характеристик тепловыделения позволил установить, что подогрев топлива положительно влияет на динамику выделения тепла. Максимальная скорость тепловыделения в кинетической фазе снижается от $(d\chi / d\phi)_{\max 60} = 0,053$ до $(d\chi / d\phi)_{\max 300} = 0,037$ для номинального режима работы и от $(d\chi/d\phi)_{\max 60} = 0,068$ до $(d\chi/d\phi)_{\max 60} = 0,044$ для режима работы при максимальном крутящем моменте. При этом сгорание начинается раньше, окончание же процесса выделения теплоты происходит практически одновременно [2].

Таким образом, данные исследования процесса сгорания в полной мере подтвердили возможность снижения жесткости процесса сгорания предложенным методом. Одновременно открывается путь дальнейшего форсирования дизеля по среднему эффективному давлению.

Следующим этапом явились исследования влияния подогрева топлива на эксплуатационные характеристики дизеля.

Лабораторные исследования велись на установке ИТ-9-3 и на установке ЦИАМ-92 при частоте вращения 900 мин^{-1} , значении установочного угла опережения впрыскивания топлива 13° ПКВ, температуре воздуха, поступающего в цилиндр двигателя, $+65^\circ \text{C}$, температуре охлаждающей жидкости $+95^\circ \text{C}$ и минимальной степени сжатия $\varepsilon = 8,6$, обеспечивающей отсутствие воспламенения для всех испытуемых топлив. Подогрев топлива до 300°C осуществлялся в топливопроводе высокого давления указанным способом [3].

Параллельно исследовались условия самовоспламенения одних и тех же образцов топлива при термофорсировании дизеля и без него. Термофорсирование позволило снизить минимальное потребное значение степени сжатия для самовоспламенения до $\varepsilon = 7,1$.

В дальнейшем были проведены стендовые испытания дизеля 2Ч 10,5/12,0 (рис. 2) [1].

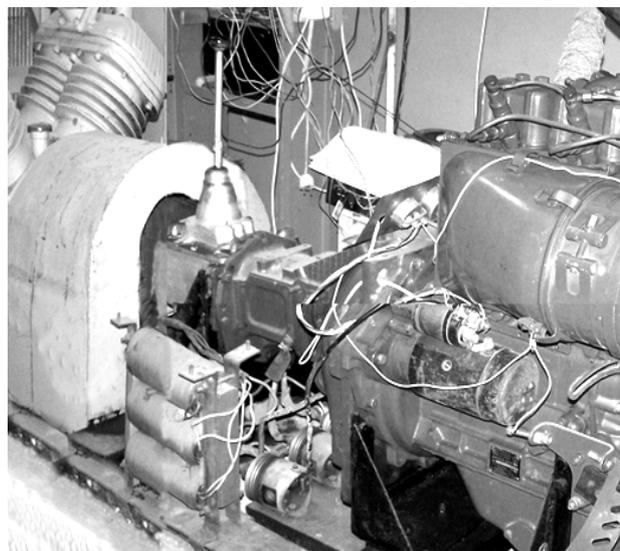


Рис. 2. Общий вид дизеля с устройством подогрева топлива на стенде

Существенный интерес представляло определение характеристик пуска. Пуск дизеля осуществлялся стартером СТ-212. Одновременно с изменением температуры нагрева топлива устанавливалось определенное ранее потребное для самовоспламенения значение степени сжатия в цилиндре дизеля в пределах от 16,5 до 7 единиц. При этом фиксировалось время до достижения устойчивой частоты вращения и развиваемое стартером значение частоты коленчатого вала (рис. 3).

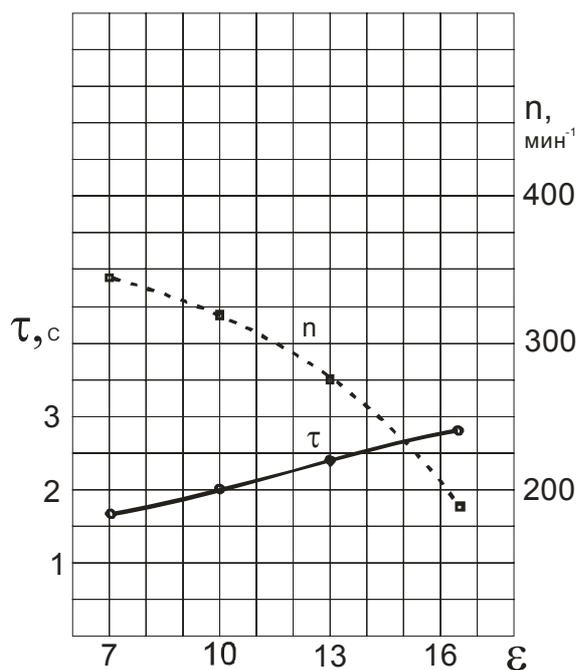


Рис. 3. Пусковая характеристика дизеля 2Ч 10,5/12,0 [3]:
 ○ — время пуска;
 □ — необходимая частота вращения вала

Как видно из представленных данных, пуск серийного дизеля осуществлялся за время $\tau = 2,75$ секунды при частоте вращения $n = 230\text{--}240$ мин⁻¹ и степени сжатия $\epsilon = 16,5$ (правая часть графика). При нагреве топлива до 150 °С потребное для работы дизеля значение степени сжатия снижалось до $\epsilon = 13$. При этом стартер разгонял коленчатый вал до частоты вращения $n = 275$ мин⁻¹, а время пуска снижалось до $\tau = 2,4$ секунды. При нагреве топлива до 300 °С эти цифры составляли соответственно $\epsilon = 7$, $n = 345$ мин⁻¹, $\tau = 1,7$ сек. На наш взгляд, наибольшее влияние оказало уменьшение момента сопротивления вращению коленчатого вала.

Анализ данных пусковой характеристики дизеля позволяет сделать вывод о том, что подогрев топлива существенно облегчает пуск дизеля при прочих равных условиях, снижает ограничения по значению потребной степени сжатия, сокращает время пуска, тем самым увеличивает надежность и долговечность самого дизеля и его пускового устройства.

Теоретические исследования работы ставили своей целью выявление зависимостей между степенью подогрева ДТ, характеристиками процесса сгорания и выходными показателями работы дизеля.

Известна теоретическая зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры

и теплоты парообразования из теории «распаковки молекул» [5]:

$$\sigma = \left(r - \frac{R_u \cdot T}{M} \cdot \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho} \right) \right) \cdot \frac{M^{\frac{1}{3}} \cdot \rho^{\frac{2}{3}}}{6 \cdot N^{\frac{1}{3}}}, \quad (1)$$

где r — удельная теплота парообразования Дж/кг;
 R_u — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль \times К);
 T — температура капли дизельного топлива, К;
 M — молекулярная масса дизельного топлива, кг/кмоль;
 ρ_v — плотность пара дизельного топлива, кг/м³;
 ρ — плотность дизельного топлива, кг/м³;
 N — число Авогадро, кмоль⁻¹.

Анализ представленной зависимости позволил предположить, что процесс впрыскивания нагретого топлива будет сопровождаться снижением времени деструкции топливного факела в связи с уменьшением поверхностного натяжения капель топлива и их последующего испарения.

Кроме того, в рассматриваемом случае имеет место горение одновременно с испарением капли топлива. Сокращается так называемая фаза прогрева и время периода индукции.

Следует также учитывать возможный диапазон нагрева впрыскиваемого дизельного топлива. Если температуру впрыскиваемого топлива принять примерно равной температуре самовоспламенения ДТ, то теплоемкость заряда будет численно равна энергии активации адиабатного взрыва, что, согласно уравнению индукции, приведет к сокращению его времени [6]. Иными словами, при нагреве ДТ до критической температуры, равной

$$r - \frac{R_u \cdot T}{M} = 0, \quad (2)$$

значение коэффициента поверхностного натяжения $\sigma = 0$. Это способствует полному разрушению капли дизельного топлива с резким увеличением свободной поверхности его нагрева, быстрому испарению капель и сокращению периода задержки воспламенения.

В качестве аналитической модели сгорания топлива был принят известный закон жизни капли [8]. Уже грубый расчет показал сокращение времени сгорания капель одинакового диаметра нагретого ДТ в 1,2...1,7 раза (около 2,5 мс) в сравнении с обычными условиями (4 мс) [8].

Принимая результаты теоретических исследований за основу, также было сделано предположение,

что подогрев топлива будет способствовать снижению температуры цикла и возможному улучшению эффективных показателей работы самого дизеля в целом.

Данные моторных испытаний в полной мере подтвердили правильность ранее сделанных предположений.

На рисунке 4 показаны скоростные характеристики дизеля 2Ч10,5/12,0 на номинальной нагрузке ($p_e = 0,56$ МПа) при различных значениях температуры подаваемого топлива.

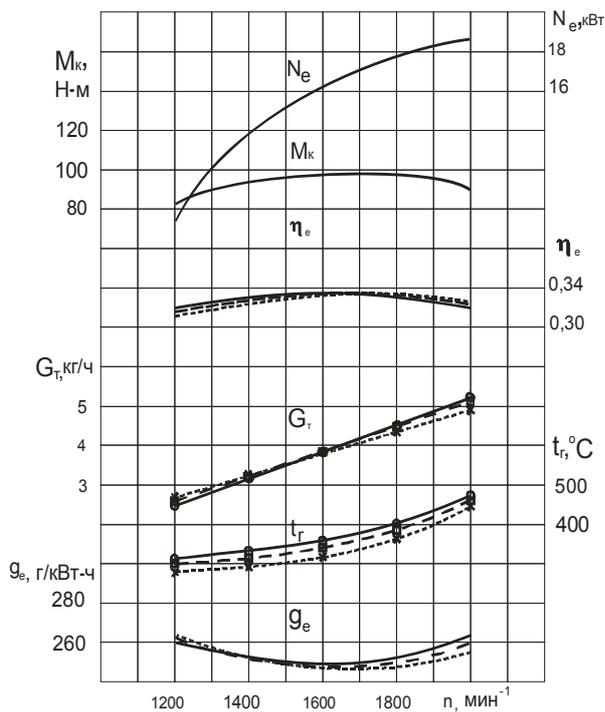


Рис. 4. Скоростная характеристика дизеля 2Ч 10,5/12,0:

- — подогрев до 60 °С;
- — подогрев до 150 °С;
- ✱ — подогрев до 300 °С

Из графиков видно, что работа дизеля на дизельном топливе, как без нагрева (60 °С), так и с нагревом до 150 и 300 °С, практически не изменяет его эффективных показателей. Кривые значений эффективной мощности, крутящего момента и эффективного КПД при работе с подогревом топлива практически совпадают с аналогичными кривыми для работы на дизельном топливе без его подогрева.

Часовой расход подогретого ДТ изменяется неоднозначно. Так, при его нагреве до 150 °С и частоте вращения 1400 мин⁻¹ имеет место увеличение часового расхода от 2,51 до 2,62 кг/ч, по сравнению с работой без подогрева, то есть на 4,4 %, а при 2000 мин⁻¹ — имеет место снижение от 5,26 до 5,10 кг/ч, то есть на 3,0 %.

В случае нагрева ДТ до 300 °С характер изменения кривых аналогичен, однако значения увеличения составляют 9,5 % и снижения — 6,6 % соответственно.

Указанное обстоятельство может быть объяснено, на наш взгляд, увеличением доли тепла, выделяющегося в течение основной фазы процесса сгорания при работе с подогревом топлива. Допуская постоянным значение скорости процесса сгорания и тепловыделения, будет иметь относительный рост отрицательной работы сжатия на малых частотах вращения коленчатого вала и ее снижение при повышении частоты вращения.

Минимум удельного эффективного расхода топлива несколько смещается в сторону больших частот вращения, что также может быть объяснено повышением относительной доли эффективного расхода теплоты с ростом частоты вращения. При этом одновременно с нагревом топлива имеет место его снижение от 264 г/кВт×ч при $n = 2000$ мин⁻¹ до 260 и 255 г/кВт×ч соответственно.

Температура ОГ при работе дизеля с подогревом топлива ниже соответствующих значений температуры при работе без подогрева во всем диапазоне частот вращения. Подача нагретого до 150 °С топлива уменьшила температуру ОГ на 20–25 градусов, при нагреве топлива до 300 °С уменьшение температуры ОГ составляло уже 40–55 градусов. Так, при частоте вращения 2000 мин⁻¹ значения температуры ОГ составляли 485, 470 и 445 °С соответственно.

В результате снижается тепловая напряженность деталей цилиндропоршневой группы, улучшаются условия их смазывания, и, как результат, повышается долговечность дизеля.

По данным исследований были сделаны следующие выводы:

1. Предварительный нагрев топлива положительно влияет на динамику тепловыделения в цилиндре дизеля. Снижается жесткость процесса сгорания. Появляется возможность дальнейшего форсирования дизеля по среднему эффективному давлению без ухудшения показателей его долговечности.

2. Предварительный нагрев топлива существенно облегчает пуск дизеля при прочих равных условиях. Снижаются ограничения по значению потребной степени сжатия на 3,5–9 единиц, на 1,05 секунды сокращается время пуска, в результате увеличивается надежность пуска и долговечность самого дизеля и его пускового устройства.

3. Предварительный нагрев топлива вызывает снижение температуры ОГ на 20–55 градусов.

В результате снижается тепловая напряженность деталей цилиндропоршневой группы, улучшаются условия их смазки, тем самым повышается долговечность дизеля.

4. Предварительный нагрев топлива не вызывает ухудшения эффективных показателей работы дизеля. Напротив, имеют место снижение часового расхода топлива в пределах 3,0–6,6 % и удельного эффективного расхода топлива в пределах 1,5–3,4 %.

Таким образом, можно сделать заключение, что использование предложенного метода предварительного нагрева топлива в быстроходном автотракторном дизеле без наддува с КС в поршне улучшает его показатели процесса сгорания, сохраняет его эффективные показатели, повышает показатели надежности и долговечности, открывает пути дальнейшего форсирования по среднему эффективному давлению.



1. Атаманюк В. Ф. Исследование пусковых свойств дизеля с предварительным нагревом топлива // Агрпромышленный комплекс: контуры будущего: материалы междунар. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых. Курск, 2012. С. 15–16.

2. Карташев А. Н., Товстыка В. С. Возобновляемые источники энергии: науч.-практ. пособие. Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2007. 264 с., ил.

3. Патент РФ № 2524484. Способ управления двигателем внутреннего сгорания с самовоспламенением / Атаманюк В. Ф. 3 с., 1 ил.

4. Плотников С. А., Бузиков Ш. В., Атаманюк В. Ф. Исследование процесса сгорания и тепловыделения дизеля с термофорсированием // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 7. С. 25–27.

5. Плотников С. А., Бузиков Ш. В., Атаманюк В. Ф. Прогнозирование процессов воспламенения и сгорания нагретого топлива в дизеле // Проблемы интенсификации животноводства с учетом пространственной инфраструктуры сельского хозяйства и охраны окружающей среды. Фаленты-Варшава, 2012. С. 216–220.

6. Хайдаров Г. Г., Хайдаров А. Г., Машек А. Ч., Майоров Е. Е. Влияние температуры на поверхностное натяжение // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 4. 2012. Вып. 1. С. 24–28.

7. Юнусов Г. С., Кронотов Ю. А. Прикатывающий каток с зигзагообразными рабочими органами // Вестник Марийского государственного университета. 2013. № 11. С. 27–29.

8. Stapf P., Maas U., Warnatz J. Detaillierte mathematische Modellierung der Tropfenverbrennung. 7. TECFLAM-Seminar «Partikel in Verbrennungsvergangen», Karlsruhe. DLR Stuttgart, 1991. P. 125.

9. Williams F. A. Combustion theory. Benjamin // Cummings. Menlo Park, 1984.

1. Atamanyuk V. F. Issledovanie puskovykh svoystv dizelya s predvaritel'nyim nagrevom topliva, Agropromyshlennyi kompleks: kontury budushchego: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. stud., aspirantov i molodykh uchenykh, Kursk, 2012, pp. 15–16.

2. Kartashevich A. N., Tovstyka V. S. Vozobnovlyаемые источники энергии: науч.-практ. пособие, Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2007, 264 p., il.

3. Patent RF No. 2524484. Sposob upravleniya dvigatelem vnutrennego sgoraniya s samovosplameneniem, Atamanyuk V. F., 3 p., 1 il.

4. Plotnikov S. A., Buzikov Sh. V., Atamanyuk V. S. Issledovanie protsessov sgoraniya i teplovydeleniya dizelya s termoforsirovaniem, Traktory i sel'khoz mashiny, 2014, No. 7, pp. 25–27.

5. Plotnikov S. A., Buzikov Sh. V., Atamanyuk V. F. Prognozirovaniye protsessov vosplameneniya i sgoraniya nagretogo topliva v dizele, Problemy intensifikatsii zhivotnovodstva s uchetom prostranstvennoy infrastruktury sel'skogo khozyaistva i okhrany okruzhayushchei sredy. Falenty-Varshava, 2012, pp. 216–220.

6. Khaidarov G. G., Khaidarov A. G., Mashek A. Ch., Maiorov E. E. Vliyaniye temperatury na poverkhnostnoye natyazheniye, Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta, ser. 4, 2012, vyp. 1, pp. 24–28.

7. Yunusov G. S., Kropotov Yu. A. Prikatyvayushchii katok s zigzagobraznyimi rabochimi organami, Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo universiteta, 2013, No. 11, pp. 27–29.

8. Stapf P., Maas U., Warnatz J. Detaillierte mathematische Modellierung der Tropfenverbrennung. 7. TECFLAM-Seminar «Partikel in Verbrennungsvergangen», Karlsruhe. DLR Stuttgart, 1991, p. 125.

9. Williams F. A. Combustion theory. Benjamin, Cummings, Menlo Park, 1984.

UDK 621.43.057

S. A. Plotnikov, Sh. V. Buzikov, V. F. Atamanyuk
Vyatka State University, Kirov

THE STUDY OF OPERATION INDICES OF DIESEL ENGINE WITH FUEL PRE-HEATING

The system of pre-heating of diesel fuel is developed. We ascertained in theory that heating shortens the preparatory phase of the combustion process. The bench tests of tractor diesel engine when running on preheated fuel were carried out. The starting characteristics and indicator parameters of diesel engine were determined.

Keywords: diesel engine, fuel heating, starting characteristics, bench test.