

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВПРЫСКИВАНИЯ ПРИ РАБОТЕ ДИЗЕЛЯ НА АКТИВИРОВАННОМ ТОПЛИВЕ

*С.А. Плотников, д.т.н., профессор кафедры,
П.Я. Кантор, к.ф-м.н., доцент кафедры
М.В. Мотовилова, аспирант
Вятский государственный университет, г. Киров*

Экспериментально проверена работоспособность топливной форсунки на высокоактивированном топливе. Приведены геометрические характеристики топливного факела, при подогреве дизельного топлива до 300 °С. Определены основные параметры топливного факела: угол распыливания топлива, длина топливной струи, скорость движения капель впрыскиваемого топлива. Выполнен расчет среднего диаметра каплей топливного факела в камере сгорания дизеля, подтверждающий возможность улучшения условий смесеобразования и полного сгорания топлива. Гипотетически обоснована возможность улучшения эффективных показателей дизеля и его ресурса при работе на активированном топливе.

В современных условиях при эксплуатации дизельного двигателя особое внимание уделяется вопросам его экономичной работы, а также снижению эмиссии токсичных компонентов с отработавшими газами (ОГ). Данная проблема решается за счет совершенствования конструкции дизеля, повышения качества применяемых эксплуатационных материалов и улучшения рабочего процесса. Важное значение при этом имеет качество применяемого топлива. Дополнительное воздействие на топливо, как правило, положительно сказывается на его физико-химических свойствах и в целом на показателях рабочего процесса дизеля [1].

К настоящему времени предложен ряд способов воздействия на дизельное топливо (ДТ), которые подразделяются на химическое и физическое. Химический способ характеризуется использованием всевозможных присадок и веществ, которые придают топливу определенные свойства или способствуют эффективности процесса сгорания. К физическим способам воздействия относят магнитное (электромагнитное), температурное, радиационное, ультрафиолетовое облучение, озонирование и другие виды обработки топлива. В результате воздействия изменяются физико-химические свойства топлива, оказывающие влияние на процесс распада углеводородных

молекул по связям углерода и др. Применение некоторых способов воздействия на топливо требует наличия сложного оборудования, что приводит к дополнительным затратам. Один из эффективных способов воздействия — предварительный подогрев ДТ в системе топливоподачи.

В ФГБОУ ВО КГТУ проводятся исследования по данному направлению. Установлено, что в результате подогрева маловязкого топлива до 60 °С в линии низкого давления снижается коэффициент поверхностного натяжения, что способствует улучшению процесса распыливания и смесеобразования. На больших нагрузках двигателя эффект от предварительного подогрева исчезает [2].

По результатам исследований коллектива ученых (ФГБОУ ВО ТИУ) применение нагревательного элемента в воздушном фильтре для нагрева воздуха до 67 °С позволяет расширить диапазон воспламенения топлива и повысить экономичность дизеля. Данные условия влияют на смесеобразование, но не приводят к изменению процесса сгорания [3].

В ФГБОУ ВО ВГУВТ проводятся исследования по влиянию на рабочий процесс дизеля предварительного подогрева топлива в диапазоне до 200 °С. Установлено, что термофорсирование позволяет расширить спектр используемых присадок, повысить КПД двигателя, уменьшить нагарообразование, выбросы вредных веществ [4].

Анализ выполненных работ по исследованию влияния на рабочий процесс дизеля термического воздействия на топливо выявил недостаточность информации по процессам смесеобразования, самовоспламенения и сгорания, формированию топливного факела, что позволило сформулировать следующие положения.

1. При нагреве топлива до 100 °С за счет снижения его вязкости, облегчается пуск двигателя, но данное воздействие не оказывает заметного влияния на процесс сгорания.

2. Подогрев топлива свыше 100 °С в топливопроводе низкого давления нецелесообразен, так как не обеспечивается герметичность топливной аппаратуры.

3. Наибольший интерес вызывают результаты подогрева ДТ до высоких температур в линии высокого давления [5–7].

Активацию ДТ целесообразно осуществлять за счет высокотемпературного (до 300 °С) локального воздействия на топливопровод высокого давления перед форсунками [8]. При этом не происходит нагрева остальных элементов системы питания. Факел впрыскиваемого топлива, нагретого до температуры ниже температуры самовоспламенения, заполняет больший объем камеры сгорания (КС), обеспечивая удовлетворительное смесеобразование. Время индукционного периода существенно сократится, снижая жесткость процесса сгорания, что позволит форсировать дизель по среднему эффективному давлению.

Цель данной работы — определение параметров топливного факела при работе дизеля на активированном топливе: угла распыливания, длины топливной струи, скорости движения капель топлива в камере сгорания, оценка мелкости распыливания топлива по среднему диаметру капель.

На первом этапе исследования выполнена проверка работоспособности топливной форсунки закрытого типа с гидравлическим управлением подъема иглы ФД-22.455.1112010-50. Испытания проводилось на стенде М107-CR по ГОСТ 10579–2017 в диапазоне температур 50 до 300 °С. В качестве нагревательного элемента использовался провод с высоким электрическим сопротивлением диаметром 0,4–0,5 мм. Температурный диапазон регулировался при помощи регулятора напряжения. Результаты исследований подтвердили работоспособность форсунки и соответствие основных параметров ее работы требованиям ТУ. В тоже время визуальный контроль показал изменение основных параметров топливного факела (рис. 1).

Известно, что распад жидкой струи топлива, которая движется в плотной газовой среде, характеризуется многими факторами. На распад струи влияет как первоначальное сжатие топлива перед форсункой, так и его расширение при

выходе из распылителя. Также влияют турбулентность движения топлива в форсунке, соотношение длины и диаметра сопла распылителя, скорость и объем цикловой подачи топлива, перепад давления в процессе впрыскивания, плотность воздушного заряда, температура сжатия, физико-химические свойства топлива, и другие факторы. Распыливание струи сопровождается распадом топлива на мелкие фракции. В процессе распыливания силы инерции движения капель топлива оказывают более значительное влияние на формирование топливного факела, чем силы вязкости самого топлива [9–11].

В действительности топливный факел не имеет четких границ и геометрической формы. Обычно его представляют в виде конуса с вершиной у соплового отверстия и с полусферой в основании. При тепловом воздействии изменяется коэффициент поверхностного натяжения и кинематическая вязкость топлива. Соответственно, струя топлива расширяется в направлении движения. Распыливание топлива зависит от числа Вебера, которое определяется отношением сил инерции к силам поверхностного натяжения. Числовое значение критерия можно определить из выражения [10]

$$We = \frac{\rho \cdot d_c \cdot v^2}{\sigma}, \quad (1)$$

где We — число Вебера; ρ — плотность дизельного топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$; d_c — диаметр соплового отверстия, м ; v — скорость истечения топлива, $\text{м}/\text{с}$; σ — коэффициент поверхностного натяжения топлива, $\text{Н}/\text{м}$.

Расчеты значений числа Вебера для ДТ при различных значениях температуры приведены в таблице.

На деструкцию струи большое влияние оказывает скорость жидкости в газовой среде [10]:

$$v = \mu_{\Phi} \sqrt{2g \frac{p_{\Phi} - p_{\Pi}}{\rho} 10^4}, \quad (2)$$

где p_{Φ} — среднее давление впрыскивания топлива, $\text{кг}/\text{см}^2$; p_{Π} — среднее давление газа в цилиндре в период впрыскивания топлива, $\text{кг}/\text{см}^2$; μ_{Φ} — коэффициент расхода форсунки.

Проведенные расчеты скорости движения частиц впрыскиваемого топлива составили:

— для дизельного топлива при температуре $t = 20$ °С $v = 144$ $\text{м}/\text{с}$;

— для дизельного топлива при температуре $t_1 = 150$ °С $v_1 = 155,88$ $\text{м}/\text{с}$;

— для дизельного топлива при температуре $t_2 = 300$ °С $v_2 = 219,48$ $\text{м}/\text{с}$.

С уменьшением плотности ДТ скорость впрыскивания увеличивается, что положительно влияет на деструкцию топливной струи. Пара-

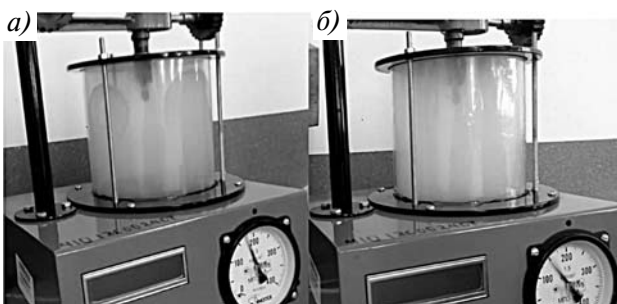


Рис. 1. Общий вид факела впрыскиваемого топлива: а — при температуре 150 °С; б — при температуре 300 °С

метры, которые влияют на мелкость распыливания топлива, можно оценить критерием Лапласа:

$$La = \frac{\sigma \cdot d_c \cdot \rho}{\eta_T^2}, \quad (3)$$

где La — критерий Лапласа; η_T — динамическая вязкость топлива, Па·с, определяемая по выражению

$$\eta_T = \nu_T \cdot \rho_T, \quad (4)$$

где ν_T — кинематическая вязкость топлива, м²/с.

Расчетные значения критерия Лапласа для ДТ при различных значениях температуры также представлены в таблице. Анализ показывает, что при нагреве топлива до 300 °С значение критерия Лапласа возрастает многократно при резком уменьшении динамической вязкости топлива [10, 12]. Это означает, что распыливание происходит на более мелкие фракции, повышая однородность топливовоздушной смеси, увеличивается суммарная площадь капель, уменьшается разность температур между топливом и окружающим его воздушным зарядом.

Для оценки диаметра капель в топливном факеле используют их средние размеры. При расчете размера капли топлива обычно применяется средний объемно-поверхностный диаметр (диаметр Заутера), который дает представление о дисперсности капель в топливном факеле. Для определения среднего диаметра по Заутеру и критерия плотности используем следующие выражения [10]:

$$d_{32} = d_c \cdot 1,68(\rho_k \cdot We)^{-0,266} \cdot La^{-0,073}; \quad (5)$$

$$\rho_k = \frac{\rho_B}{\rho_T}, \quad (6)$$

где ρ_k — критерий плотности; ρ_B — плотность воздушного заряда в камере сгорания, кг/м³.

Плотность воздуха в цилиндре дизельного двигателя в конце такта сжатия составляет 38,77 кг/м³, критерий плотности для ДТ без подогрева равен $\rho_k = 0,045$, а при значениях температуры $t_1 = 150$ °С и $t_2 = 300$ °С значения критерия равны $\rho_{k1} = 0,052$ и $\rho_{k2} = 0,104$ соответственно. Средний диаметр капель ДТ при впрыске по Заутеру представлен в таблице. В составе ДТ много алкановых и циклановых углеводородов, у которых критическая температура перехода из одной фазы в другую находится в пределах 300 °С. Коэффициент поверхностного натяжения капли топлива при таких температурах резко уменьшается [12, 13], происходит испарение (вскипание) фракций и образуется облако пара. При впрыскивании топливо имеет вид тумана; средний диаметр мелкодисперсной капли со-

ставляет $d_{32} = 4,52$ мкм. Алкановые углеводороды, имеющие в своем строении разветвленную структуру, и ароматические углеводороды имеют высокую термическую стойкость, что и объясняет наличие жидких капель. Соответственно, при нагреве топлива в пределах 300 °С топливный факел в своей структуре содержит жидкие капли и газообразную фракцию.

На угол раскрытия факела основное влияние оказывает степень турбулентности течения топлива в выходном канале распылителя форсунки и значение числа Рейнольдса. Определим данный критерий по следующему выражению [10]:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d_c}{\eta_T}. \quad (7)$$

Результаты расчетов показывают, что при стандартных условиях работы дизеля значения Re составляет 26 520 и более (таблица), что значительно превышает критическое значение $Re_{кр} \approx 2300$. Следовательно, режим течения жидкости по выходному каналу турбулентный. С ростом числа Рейнольдса угол распыливания Θ увеличивается с тенденцией приближения к предельному значению. Зависимость Θ от числа Рейнольдса представляется в виде затухающей экспоненты. Влияние на число Рейнольдса температуры топлива проявляется через изменение динамической вязкости. Угол раскрытия факела определим из следующего выражения [10]:

$$\operatorname{tg} \frac{\Theta}{2} = 0,00751 \frac{We^{0,32} \sqrt{\rho_k}}{M^{0,07}}, \quad (8)$$

где Θ — угол топливного факела; M — число Маха.

Критерий Маха для маловязких жидкостей и приведенную плотность топлива ($\rho_{kпр}$) можно определить из следующих выражений [10]:

$$M = \frac{\eta_T^2}{\rho_{kпр} d_c \sigma}; \quad (9)$$

$$\rho_{kпр} = \frac{\rho_T}{9,81}, \quad (10)$$

где $\rho_{тпр}$ — плотность топлива (приведенная), кг·с²/м⁴.

Результаты расчетов изменения угла раскрытия факела от температуры топлива представлены в таблице. Угол раскрытия факела дизельного топлива изменяется в пределах от 14°49' до 51°9' (таблица). Рост угла раскрытия топливного факела приводит к увеличению объема «конуса» топливовоздушной смеси, что способствует повышению однородности распределения капель в КС и сокращению времени испарения.

Длину топливной струи при изменении ее температуры можно вычислить из условия постоянства объема впрыскиваемого топлива:

**Данные зависимости характеристик топливного факела
от температуры активации топлива**

№ п/п	Показатели	ДТ без подогрева	ДТ ($t_1 = 150\text{ }^\circ\text{C}$)	ДТ ($t_2 = 300\text{ }^\circ\text{C}$)
1	Число Вебера	158 022	280 847	$1782 \cdot 10^3$
2	Число Лапласа	443	2185	79 504
3	Средний диаметр капель ДТ при впрыске по Заутеру d_{32} , мкм	26,31	19,42	4,52
4	Число Рейнольдса	26 520	45 770	374 400
5	Плотность топлива $\rho_{\text{дт}} = \rho_r/9,81$, кг·с ² /м ⁴	86,64	74,77	37,72
6	Число Маха	$2,21 \cdot 10^{-4}$	$4,49 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-6}$
7	Угол топливного факела $\text{tg}(\Theta/2)$	13,24	0,1912	0,621
8	Угол топливного факела Θ , град	14°49'	20°55'	51°9'
9	Длина топливной струи s , м	26,5	22,1	15
10	Скорость впрыскивания топлива v , м/с	144,81	155,88	219,48
11	Длина топливной струи s , м (за 1° ПКВ)	0,0066	0,0071	0,01
12	Длина топливной струи s , м (за 4° ПКВ)	0,0266	0,0284	0,03–0,04

$$q_{\text{ц}} = \pi \left(s \left(\text{tg} \frac{\Theta}{2} \right) \right)^2 s / 3, \quad (11)$$

откуда длина топливной струи определится из выражения

$$s = \left(\frac{3q_{\text{ц}}}{\pi \text{tg} \frac{\Theta}{2}} \right)^{0,5}, \quad (12)$$

где s — длина топливной струи, м; $q_{\text{ц}}$ — цикловая подача топлива, г/цикл.

Числовые значения длины топливного факела представлены в таблице.

Впрыснутое в КС топливо воспламеняется не сразу, а с задержкой. За время, соответствующее периоду задержки воспламенения (около 3,5–4 град ПКВ) передний фронт топливного факела должен пройти расстояние от распылителя форсунки до стенки камеры сгорания. Данное условие обеспечивает эффективный процесс воспламенения и сгорания топлива. При малой длине топливной струи топливо фокусируется вблизи форсунки, создавая избыток кислорода в других местах камеры сгорания. При большой дальности факела топливо скапливается у стенок КС, что ухудшает эффективность процесса сгорания.

Данные расчетов (таблица) убедительно показывают, что за время, равное периоду задержки воспламенения, с учетом определенных значений скорости капель нагретого топлива, передний фронт топливного факела достигает стенок КС (рис. 2). При одновременном увеличении угла раскрытия топливного факела это способствует улучшению условий смесеобразования и полноты сгорания топлива. Процесс сгорания будет происходить интенсивнее, с меньшими значениями скорости нарастания давления. Все это положи-

тельно скажется на динамике процесса сгорания, улучшении эффективных показателей дизеля и его ресурсе.

Для исследования показателей работы дизеля с предварительным подогревом топлива разработана экспериментальная установка (рис. 3).

Результаты выполненных расчетов позволяют сделать следующие выводы:

1. Стандартная форсунка при подогреве топлива до 300 °С сохраняет работоспособность. При этом визуально зафиксировано изменение основных параметров топливного факела.

2. Параметры топливного факела при нагреве топлива характеризуются увеличением угла

2. Параметры топливного факела при нагреве топлива характеризуются увеличением угла

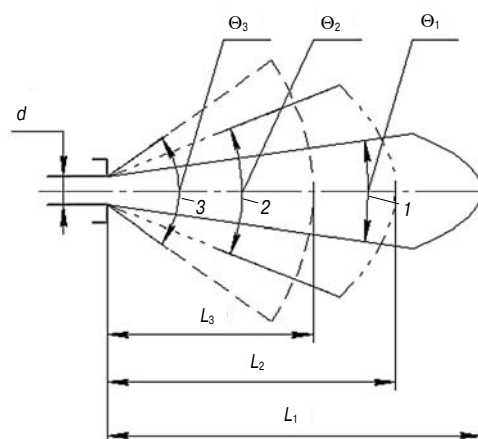


Рис. 2. Схема распространения топливного факела: $L_{(1,2,3)}$ и $\Theta_{(1,2,3)}$ — длина топливной струи и угол распыливания топлива в зависимости от температуры: 1 — без нагрева; 2 — при температуре 150 °С; 3 — при температуре 300 °С

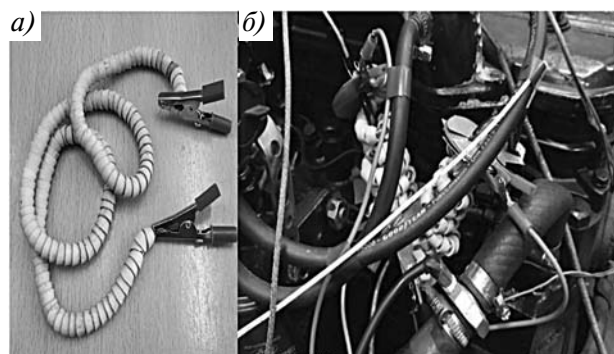


Рис. 3. Нагревательный элемент:

а — внешний вид;

б — нагреватель, установленный на дизеле

распыливания в пределах от 14°49' до 51°9'. Длина жидкой фазы топливного факела составляет не менее 22 мм, а в паровой не менее 15 мм. Средний объемно-поверхностный диаметр капель топлива (диаметр Заутера), характеризующий степень распыливания, уменьшается в пределах от 26,31 до 4,52 мкм, что свидетельствует об интенсивной деструкции впрыснутого топлива.

3. Результаты выполненных расчетов позволяют выдвинуть гипотезу об улучшении условий смесеобразования и полного сгорания подогретого топлива. Процесс сгорания будет происходить интенсивнее, с меньшими значениями скорости нарастания давления. Это способствует улучшению динамики процесса сгорания, повышению эффективных показателей дизеля и его ресурса.

4. Представляет научный интерес исследование работы дизеля на высокоактивированном топливе в стендовых условиях и в составе машино-тракторного агрегата.

Литература

1. *Плотников С.А.* Улучшение эксплуатационных показателей дизелей путем создания новых альтернативных топлив и совершенствования топливоподающей аппаратуры: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Нижний Новгород: НГТУ, 2011. 40 с.
2. *Мартынова И.Б.* Исследование особенностей топливоподачи и экономичности дизеля на долевых нагрузках при подогреве топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Калининград, КГТУ, 1996. 23 с.
3. Применение коэффициента корректирования мощности нагревателей дизельных ДВС с целью экономии топлива / В.Н. Карнаузов, Д.А. Захаров, О.В. Каргаузов, О.В. Рындина // *Транспорт и машиностроение Западной Сибири.* 2017. № 1. С.44–50.
4. *Храмов М.Ю.* Улучшение характеристик двигателя путем термофорсирования топлива / М.Ю. Храмов, М.Х. Садеков // *Вестник АГТУ.* 2007. № 6 (41). С.83–86.
5. *Плотников С.А.* Анализ способов снижения периода задержки воспламенения / С.А. Плотников, Ш.В. Бузиков, В.Ф. Атаманюк // *Развитие транспорта в регионах России: проблемы и перспективы.* 2012. С. 6–9.
6. *Плотников С.А.* Анализ процесса сгорания и тепловыделения тракторного дизеля с предварительной термической подготовкой топлива / С.А. Плотников, Ш.В. Бузиков, А.Л. Бирюков // *Молочнохозяйственный вестник.* 2017. № 3 (27). С. 114–124.
7. *Плотников С.А.* Исследование процесса сгорания и тепловыделения дизеля с термофорсированием / С.А. Плотников, Ш.В. Бузиков, В.Ф. Атаманюк // *Тракторы и сельхозмашины.* 2014. № 7. С. 25–27.
8. Патент RU 2688131 Российская Федерация, МПК F02M 31/00, F02M 31/12, H05B 6/00, H05B 6/10 Индукционный нагреватель топлива / Ш.В. Бузиков, М.В. Мотовилова, П.Ю. Мальшкин, А.Н. Карташевич. заявл. 09.07.2018; опубл. 17.05.2019 г.
9. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени / Н.А. Чигир, Р.Дж. Вейнберг, К. Т. Боумэн и др.; пер. с англ. под ред. Ю. Ф. Дитякина. М. : Машиностроение, 1981. 407 с.
10. *Лышевский А.С.* Процессы распыливания топлива дизельными форсунками / А.С. Лышевский. М. : Машгиз, 1963. 281 с.
11. *Ассад М.С.* Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент / М.С. Ассад, О.Г. Пенязьков. Минск : Беларус. навука, 2010. 305 с.
12. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. М. : Наука, 1972. 721 с.
13. *Плотников, С.А.* Прогнозирование процессов воспламенения и сгорания нагретого топлива в дизеле / С.А. Плотников, Ш.В. Бузиков, В.Ф. Атаманюк // *Проблемы интенсификации животноводства с учетом пространственной инфраструктуры сельского хозяйства и охраны окружающей среды.* Фаленты-Варшава, 2012. С. 216–220.