

УДК 621.436.12

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УСЛОВИЙ ИСТЕЧЕНИЯ ТОПЛИВА ИЗ РАСПЫЛИТЕЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ СТРУИ И РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ДИЗЕЛЯ

Шустров Андрей Александрович, студент,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, andrs4st@gmail.com.

Дунин Андрей Юрьевич, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, a.u.dunin@yandex.ru.

Душкин Павел Витальевич, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, dushkin.pavel@gmail.com.

Аннотация. Дизели широко применяют в качестве энергетических установок современного коммерческого транспорта. Для совершенствования их экономических и экологических показателей применяют аккумуляторные топливные системы с электронным управлением и давлениями впрыскивания 200 МПа и выше. С повышением давления впрыскивания усиливается влияние формы и динамики струи впрыскиваемого топлива на рабочий процесс дизеля. В этой связи, актуальным является анализ влияния режима работы распылителя аккумуляторной топливной системы на показатели дизеля. Разработана методика оценки физических параметров струи впрыскиваемого топлива и проведено исследование на экспериментальной установке.

Ключевые слова: дизель, топливо, форсунка, давление впрыскивания, распыливание.

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF FUEL FLOW CONDITIONS FROM THE SPRAYER ON THE JET PARAMETERS AND THE WORKING PROCESS OF A DIESEL ENGINE

Shustrov Andrey A., student,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, andrs4st@gmail.com

Dunin Andrey Y., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, a.u.dunin@yandex.ru

Dushkin Pavel V., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, dushkin.pavel@gmail.com

Abstract. Diesel engines are widely used as power plants of modern commercial vehicles. To improve their economic and environmental performance, common rail fuel systems with electronic control and injection pressures up to 200 MPa and higher are used. With an increase in the injection pressure, the influence of the shape and dynamics of the injected fuel spray on the working process of the diesel engine increases. In this regard, it is relevant to analyze the influence of the operating mode of the common rail fuel system spray on the diesel indicators. A method for estimating the physical parameters of the injected fuel spray has been developed and a study has been conducted on an experimental installation.

Key words: diesel engine, fuel, common rail injector, injection pressure, spray.

Введение

Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй – область физики, описание которой очень важно при решении прикладных технических задач. Так, например, современные топливные системы дизелей подают топливо под давлением вплоть до 300 МПа [1, 2] через сопловые отверстия диаметром до 0,08 мм. Задача моделирования подобных технических процессов актуальна сейчас и останется важной на протяжении всего периода существования гидравлических систем высокого давления с электронным управлением.

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований: температуры, силы и скорости истечения струи топлива через один распыливающий канал.

Актуальность проведения исследований струи связана с дальнейшим совершенствованием топливных систем дизелей, направленном на обеспечение многократного впрыскивания с управлением передним фронтом характеристики впрыскивания и учетом волновых явлений в линии высокого давления [3]; организацию распределения топлива в камере сгорания [4]; обеспечение многотопливности двигателя [5, 6, 7].

Экспериментальная установка

Испытания проводились с применением гидравлического стенда МАДИ, фотография которого представлена на рис. 1. Стенд оборудован

системой управления (с помощью ПЛК), позволяющей работать с ним на удалении. Перечень основного дополнительного оборудования (комплектация) стенда приведен в табл. 1.



Рис. 1. Гидравлический стенд МАДИ

Таблица 1

Условия проведения исследования и экспериментальное оборудование

Элемент	Название	Свойства
Рабочая жидкость	Viscor 1487	$\nu = 0,820-0,830 \text{ мм}^2/\text{с}$ $\rho = 840 \text{ кг/м}^3$
ЭГФ	Bosch CRIN2	$d_c = 0,18 \dots 0,20 \text{ мм}$ 1 или 8 отверстий
Топливопровод №1 (короткий, применен в разделах 2.2 и 3 отчета)	---	$l = 700 \text{ мм}$ $d = 2,2 \text{ мм}$
Топливопровод №2 (длинный, раздел 2.1 отчета)	---	$l = 1300 \text{ мм}$ $d = 2,2 \text{ мм}$
Датчики давления	T6000	пьезоэлектрический $s = 22 \text{ пКл/МПа}$
Датчик давления в гидравлическом аккумуляторе	Bosch 0281002937	тензометрический $p[\text{бар}] = 477 \cdot U[\text{В}] - 243$
Термопары	TXA-2088	---
Токовые клещи	Hantek CC-65	$s = 0,1 \text{ мВ/мА}$
Весы	Веста BM153	Приборная погрешность (аддитивная) $\pm 10 \text{ мг}$

Система сбора (медленные измерения) и управление стендом	ОВЕН ПЛК150	Период опроса 0,5с
Система сбора (быстрые измерения)	National Instruments PCI-6251	Частота дискретизации 300кГц
Блок измерений термопар	Etas ES421.1	Период опроса 0,05с
Усилитель заряда пьезоэлектрических датчиков	РШ2734	Коэффициент передачи $k=10 \dots 100$ мВ/пКл

Результаты исследования

Для проведения исследования стандартный распылитель был переделан в односопловой с помощью заклеивания отверстий под микроскопом холодной сваркой. Процесс подготовки показан на рис. 2. Распылитель установлен в форсунку без запирающей иглы (подача топлива происходит непрерывно). Необходимое давление в гидравлическом аккумуляторе регулируется частотой вращения вала топливного насоса высокого давления.

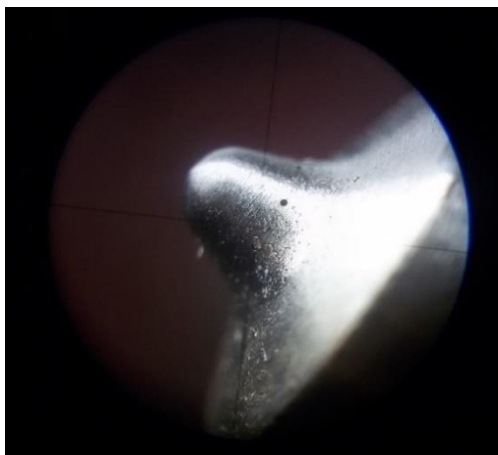


Рис. 2. Подготовка распылителя ЭГФ к испытаниям

В качестве датчика силы струи используются аналитические весы, параметры которых приведены в табл. 1. Удаление скапливающегося топлива осуществляется пневматическим эжектором (рис. 3).

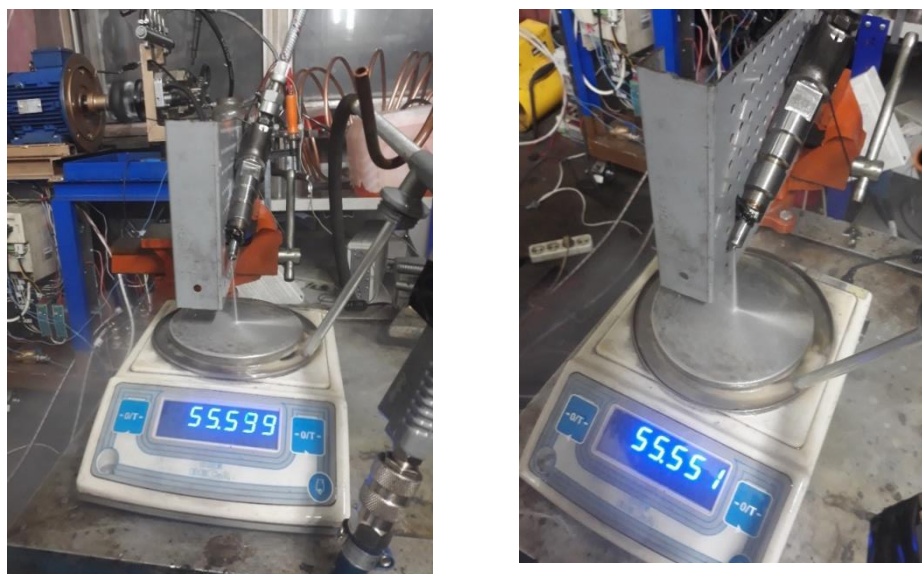


Рис. 3. Процесс измерения силы струи

Экспериментальное исследование включает в себя измерения: силы струи, температуры и скорости истечения.

Предварительно было проведено измерение силы струи в зависимости от расстояния между распылителем и весами в диапазоне 15...55 мм при постоянном давлении. Испытания показали, что изменение силы струи находится в пределах случайной погрешности эксперимента.

Далее испытания проводились на расстоянии 15 мм при различных давлениях, результаты представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2

Результаты измерения силы струи

№	p , МПа	F , кгс	Δ , кгс
1	7	$41,63 \cdot 10^{-3}$	$\pm 0,79 \cdot 10^{-3}$
2	11	$62,39 \cdot 10^{-3}$	$\pm 1,15 \cdot 10^{-3}$
3	16	$90,063 \cdot 10^{-3}$	$\pm 2,36 \cdot 10^{-3}$
4	22	$118,37 \cdot 10^{-3}$	$\pm 3,55 \cdot 10^{-3}$
5	25	$135,49 \cdot 10^{-3}$	$\pm 8,03 \cdot 10^{-3}$

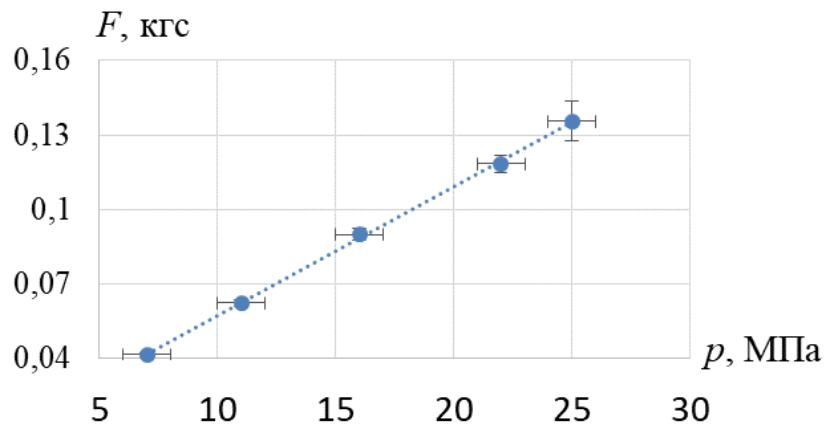


Рис. 4. Результаты измерения силы струи топлива, выходящей через единственное распыливающее отверстие

Основной источник погрешности определения силы – случайная ошибка, вызванная пульсацией струи (в первую очередь из-за вибраций стенда), поэтому приборная погрешность не учитывается. Случайная погрешность вычисляется по выражениям (1) и (2):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (F_i - \bar{F})^2}{n \cdot (n - 1)}}, \quad (1)$$

$$\Delta = \tau \cdot S, \quad (2)$$

где $\bar{F}$ – среднее значение силы, n – количество замеров, τ – коэффициент Стьюдента.

Характер струи – жидкое ядро, движущееся в спутном потоке капельно-воздушной смеси.

Измерение температур осуществляется с помощью двух термодпар, одна из которых установлена в баке с рабочей жидкостью, вторая – под струей впрыскиваемого топлива. Для обеспечения достоверности результатов термодпары подключены к системе сбора данных, позволяющей записывать результаты измерения, что необходимо для идентификации момента наступления термостабилизации (рис. 5).

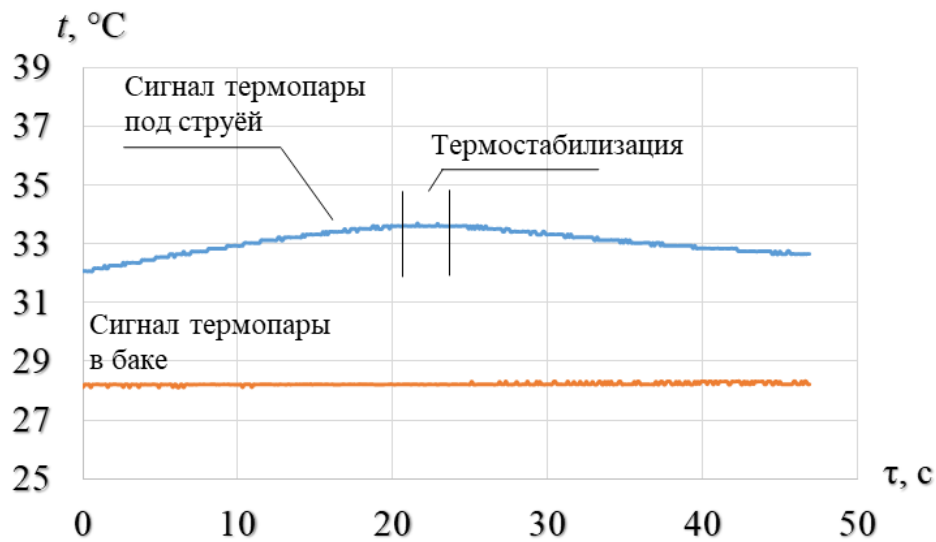
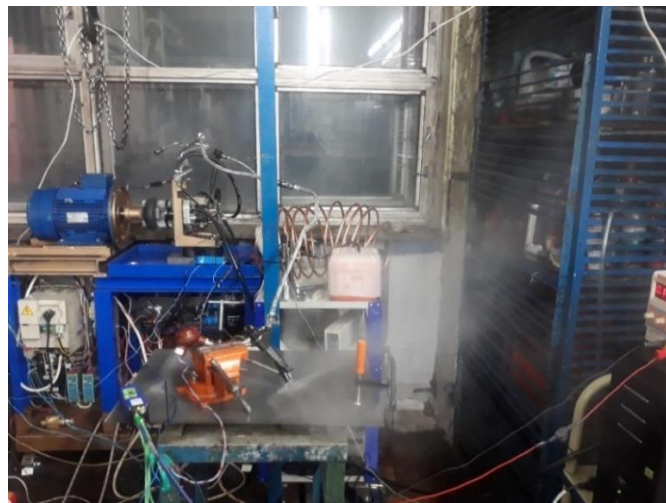


Рис. 5. Термостабилизация в процессе измерений

Характер струи тот же (жидкое ядро), однако разбиваясь о корпус термопары струя создает мощный туман из рабочей жидкости (рис. 6), забираемый вытяжным вентилятором (на рис. 6 справа – шахта вытяжки).

а)



б)



Рис. 6. Процесс измерения температуры струи:

а – 11 МПа, б – 27 МПа;

*1 – ЭГФ, 2 – термопара (первичный преобразователь),
3 – регистрирующий прибор*

Измерение температуры струи проводится на расстоянии 15 мм от распылителя до термопары. Полученные результаты приведены в табл. 3 и на рис. 7. В табл. 3: Δt – разность показаний двух термопар «сигнал термопары в баке» и «сигнал термопары под струей».

Таблица 3

Результаты измерения температуры струи

№	p , МПа	Δt , °C
1	7	0,56
2	11	1,36
3	16	2,8
4	22	4,53
5	27	5,39

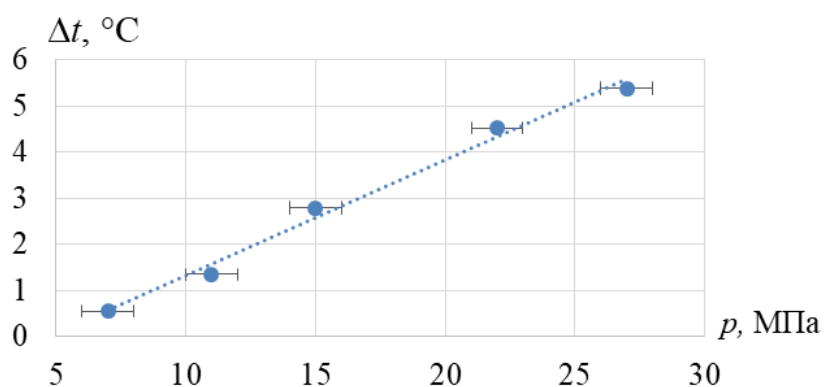


Рис. 7. Результаты измерения температуры струи топлива, идущей через один распыливающий канал

Скорость истечения (массовая) измеряется с помощью взвешивания топлива, поданного за контрольное время (табл. 4 и рис. 8). Оценка погрешностей не проводилась из-за очевидной достоверности результатов.

Таблица 4

Результаты измерения скорости истечения

№	p , МПа	q , г/с	ω , м/с
1	7	3,22	126,7
2	11	3,99	153,2
3	16	4,66	189,4
4	22	5,13	226,1
5	25	5,70	232,9

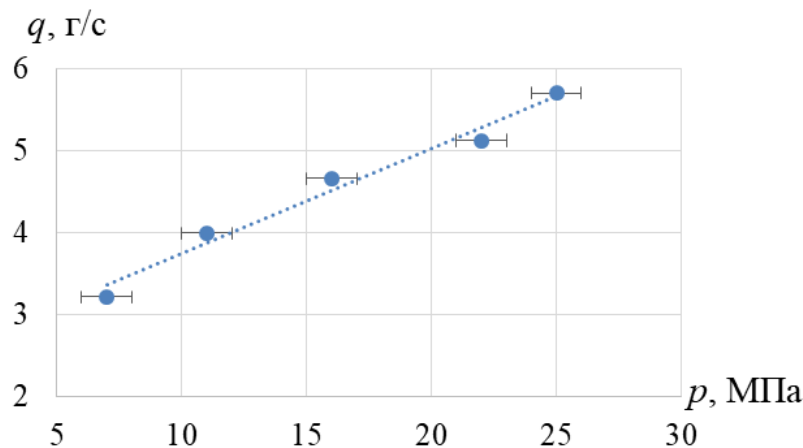


Рис. 8. Результаты измерения скорости истечения струи топлива через один распыливающий канал

Выводы

Разработан способ регистрации параметров струи, позволяющий определить скорость ее распространения.

Список литературы

1. Wloka, J. A. Injection Spray Visualization for 3000bar Diesel Injection / J. A. Wloka, C. Pötsch, G. Wachtmeister // ILASS – Europe 2011, 24th European conference on liquid atomization and spray systems, Estoril, Portugal, September 2011. – 2011. – 10 p.
2. Vera-Tudela, W. An experimental study of a very high-pressure diesel injector (up

to 5000 bar) by means of optical diagnostics / W. Vera-Tudela, R. Haefeli, C. Barro, B. Schneider, K. Boulouchos // *Fuel*. – 2020. – Vol. 275. – P. 117933.

3. Catania, A. E. Parametric study of hydraulic layout effects on common-rail multiple injections / A. E. Catania, A. Ferrari, M. Manno // *Fall Technical Conference of the ASME ICED*. – 2005. Paper No. ICEF 2005-1288. – P. 1288.

4. Мальчук, В.И. Топливоподача и зональное смесеобразование в дизелях / В.И. Мальчук. – М.: МАДИ, 2009. – 176 с.

5. Дунин, А.Ю. Совершенствование системы совместной подачи двух топлив в камеру сгорания дизеля через одну форсунку / А.Ю. Дунин: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. – М, 2006.

6. Дунин, А.Ю. Влияние состава топлива на основе масел растительного происхождения на режим работы электрогидравлической форсунки / А.Ю. Дунин, Е.В. Горбачевский, П.В. Душкин, Л.Н. Голубков, И.Е. Иванов // *Транспорт на альтернативном топливе*. – 2017. – № 4(58). – С. 48-58.

7. Алексеев, И.В. Двигатели автотракторной техники: учебник / И.В. Алексеев, К.А. Морозов, Ю.В. Горшков, С.А. Пришвин, В.В. Синявский, А.Ю. Дунин, А.Л. Яковенко, С.Д. Скороделов, М.Г. Шатров; под. ред. М.Г. Шатрова. – М.: КНОРУС, 2016. – 400 с.

References

1. Wloka J. A., Pötsch C., Wachtmeister G. Injection Spray Visualization for 3000bar Diesel Injection // *ILASS – Europe 2011, 24th European conference on liquid atomization and spray systems*, Estoril, Portugal, September 2011. – 2011. – 10 p.

2. Vera-Tudela W., Haefeli R., Barro C., Schneider B., Boulouchos K. An experimental study of a very high-pressure diesel injector (up to 5000 bar) by means of optical diagnostics // *Fuel*. – 2020. – Vol. 275. – pp. 117933.

3. Catania A.E., Ferrari A., Manno M. Parametric study of hydraulic layout effects on common-rail multiple injections // *Fall Technical Conference of the ASME ICED*. – 2005. Paper No. ICEF 2005-1288. – pp. 1288.

4. Malchuk V.I. *Toplivopodacha i zonal'noe smeseobrazovanie v dizelyax* (Fuel supply and zonal mixing in diesel engines), Moscow, MADI, 2009, 176 p.

5. Dunin A.Y. *Sovershenstvovanie sistemy`sovmestnoj podachi dvux topliv v kameru sgoraniya dizelya cherez odnu forsunku* (Improvement of the system of joint supply of two fuels to the diesel combustion chamber through one nozzle), PhD thesis, Moscow, MADI, 2006, 196 p.

6. Dunin A.Y., Gorbachevsky E.V., Dushkin P.V., Golubkov L.N., Ivanov I.E. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2017, no. 4(58), pp. 48-58.

7. Alekseev I.V., Morozov K.A., Gorshkov Y.V., Prishvin S.A., Sinyavsky V.V., Dunin A.Y., Yakovenko A.L., Skorodelov S.D., Shatrov M.G. *Dvigateli avtotraktornoj texniki* (Engines of automotive equipment), Moscow, KNORUS, 2016, 400 p.

Рецензент: А.Л. Яковенко, канд. техн. наук, доц., МАДИ