

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES

Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Technologies, Machines and Equipment for the Agro-industrial Complex

Научная статья

УДК 631.372: 621.436.1

doi: 10.55196/2411-3492-2024-3-45-83-92

Исследование влияния технического состояния элементов топливной системы высокого давления на параметры топливоподачи**Аслан Каральбиевич Апажев¹, Юрий Хасанович Шогенов²,
Юрий Ахметханович Шекихачев³, Владимир Исмаилович Батыров⁴**^{1,3}Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030²Российская академия наук, Ленинский проспект, 14, Москва, Россия, 119991¹kbr.apagev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5448-5782>²yh1961s@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>³shek-fmer@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6300-0823>⁴batyrov.53@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2183-4058>

Аннотация. Топливная аппаратура должна обеспечить идентичность топливоподачи во все цилиндры по таким параметрам как цикловая подача, угол начала впрыска топлива, характеристики впрыска. Неидентичность указанных параметров по всем цилиндрам дизельного двигателя является причиной различного характера протекания рабочего процесса в них и, естественно, приводит к различиям индикаторных показателей работы по цилиндрам дизельного двигателя. Износ деталей топливной аппаратуры в процессе эксплуатации, особенно прецизионных элементов топливной системы высокого давления, приводит к изменению их гидравлических характеристик, в результате чего нарушается равномерность процесса впрыскивания топлива по секциям топливного насоса высокого давления. Таким образом, для разработки мероприятий по обеспечению равномерности параметров топливоподачи в процессе ремонтно-обслуживающих работ требуется установить зависимость параметров топливоподачи от изменения технического состояния элементов топливной системы высокого давления с учетом их отклонения от установленных значений техническими условиями. В результате проведенных исследований установлено, что увеличение эффективного проходного сечения на режиме работы дизеля 4Ч11/12,5 от 0,30 мм² до критической величины, равной 0,40 мм², вызвало увеличение цикловой подачи топлива на 5,7%; увеличение эффективного проходного сечения от 0,29 до 0,59 мм² при этом привело к уменьшению давления впрыскивания на 25%, продолжительности впрыскивания на 22,2% и угла запаздывания впрыскивания топлива на 10,0%; увеличение эффективного проходного сечения топливопровода с 0,80 до 1,10 мм² привело к увеличению цикловой подачи топлива на 1,1%. При этом давление и продолжительность впрыскивания топлива уменьшились, соответственно, на 13,6% и на 12,2%, угол запаздывания впрыскивания топлива практически не изменился.

Ключевые слова: дизельный двигатель, топливо, топливная аппаратура, топливная система, топливный насос, цикловая подача, проходное сечение

Для цитирования. Апажев А. К., Шогенов Ю. Х., Шекихачев Ю. А., Батыров В. И. Исследование влияния технического состояния элементов топливной системы высокого давления на параметры топливоподачи // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова, 2024. № 3(45). С. 83–92. doi: 10.55196/2411-3492-2024-3-45-83-92

Original article

Investigation of the influence of the technical condition of the elements of the high-pressure fuel system on the parameters of the fuel supply

Aslan K. Apazhev¹, Yuri Kh. Shogenov², Yuri A. Shekikhachev^{✉3}, Vladimir I. Batyrov⁴

^{1,3,4}Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik, Russia, 360030

²Russian Academy of Sciences, 14 Lenin Avenue, Moscow, Russia, 119991

¹kbr.apagev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5448-5782>

²yh1961s@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

^{✉3}shek-fmep@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6300-0823>

⁴batyrov.53@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2183-4058>

Abstract. Fuel equipment must ensure identical fuel supply to all cylinders according to such parameters as: cyclic supply, fuel injection start angle, injection characteristics. The non-identity of the specified parameters for all cylinders of a diesel engine is the reason for the different nature of the working process in them and, naturally, leads to differences in the indicator performance indicators for the cylinders of a diesel engine. Wear of parts of fuel equipment during operation, especially precision elements of the high-pressure fuel system, leads to a change in their hydraulic characteristics, as a result of which the uniformity of the fuel injection process across the sections of the high-pressure fuel pump is disrupted. Thus, in order to develop measures to ensure uniformity of fuel supply parameters during repair and maintenance work, it is necessary to establish the dependence of fuel supply parameters on changes in the technical condition of the elements of the high-pressure fuel system, taking into account their deviation from the established values by technical specifications. As a result of the studies, it was established that: an increase in the effective flow area in the 4Ch11/12.5 diesel operating mode from 0.30 mm² to a critical value of 0.40 mm² caused an increase in the cyclic fuel supply by 5.7%; an increase in the effective flow area from 0.29 to 0.59 mm² led to a decrease in injection pressure by 25%, injection duration by 22.2% and fuel injection retardation angle by 10.0%; An increase in the effective flow area of the fuel line from 0.80 to 1.10 mm² led to an increase in the cyclic fuel supply by 1.1%. At the same time, the pressure and duration of fuel injection decreased by 13.6% and 12.2%, respectively, and the fuel injection retardation angle remained virtually unchanged.

Keywords: diesel engine, fuel, fuel equipment, fuel system, fuel pump, cyclic supply, flow area

For citation. Apazhev A.K., Shogenov Yu.Kh., Shekikhachev Yu.A., Batyrov V.I. Investigation of the influence of the technical condition of the elements of the high-pressure fuel system on the parameters of the fuel supply. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2024;3(45):64–69. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2024-3-45-64-69

Введение. Дизельные двигатели в наибольшей мере удовлетворяют тем тенденциям, которые имеют место в двигателестроении: повышение мощностных показателей, сниженный удельный расход топлива и токсичность отработавших газов. Реализовать указанные достоинства дизельных двигате-

лей возможно лишь в случае обеспечения и сохранения оптимальными тех параметров, которые характеризуют топливоподачу. Характер же топливоподачи предопределяет показатели, характеризующие качество протекания рабочего процесса в дизельном двигателе.

Проблема улучшения показателей дизельных двигателей решается на современном этапе в процессе их производства посредством совершенствования и тщательной отработки конструктивных схем и технологических процессов, связанных с изготовлением их наиболее ответственных деталей, а в процессе эксплуатации – путем совершенствования методов и применяемых средств при техническом обслуживании и ремонте. Такой подход можно считать оправданным в силу влияния значительного количества факторов (конструктивных и эксплуатационных) на показатели работы дизелей.

От параметров топливоподачи зависят качественные характеристики смесеобразования и характер протекания процесса сгорания топлива. Анализируя состояние проблемы улучшения показателей работы дизельных двигателей, можно сделать следующий вывод: основная причина, вызывающая отклонение показателей рабочего цикла двигателей от установленных значений, состоит в отклонении параметров топливоподачи от оптимальных значений.

С изменением технических характеристик топливной системы высокого давления (ТСВД) в процессе работы изменяются и характеристики впрыска. При исследовании влияния параметров ТСВД на характеристики топливоподачи зачастую не учитывается изменение характеристик впрыскивания, что объясняется сложностью и трудоемкостью указанных исследований.

Отказы дизельных двигателей в основном вызваны естественным износом (40%) и несвоевременным и некачественным техническим обслуживанием (36%). Учитывая сложившееся в научном мире мнение о том, что наибольшее количество отказов двигателей связано с отклонениями в работе топливной системы (до 70%), можно обоснованно сделать заключение, что определяющее место в общих объемах потерь занимают потери топлива [1–3].

Задача топливной аппаратуры (ТА) – обеспечение одинаковых условий для функционирования всех цилиндров дизельного двигателя. Таким образом, ТА должна обеспечить идентичность топливоподачи во все

цилиндры по таким параметрам как цикловая подача, угол начала впрыска топлива, характеристики впрыска. Неидентичность указанных параметров по всем цилиндрам дизельного двигателя является причиной различного характера протекания рабочего процесса в них и, естественно, к различиям индикаторных показателей работы по различным цилиндрам дизельного двигателя [4–6].

Износ деталей ТА в процессе эксплуатации, особенно прецизионных элементов ТСВД, приводит к изменению их гидравлических характеристик. В результате этого нарушается равномерность параметра процесса впрыскивания топлива по секциям топливного насоса высокого давления (ТНВД).

Для разработки мероприятий, обеспечивающих равномерность параметров топливоподачи в процессе проведения ремонтно-обслуживающих работ, требуется установление зависимости параметров топливоподачи от изменения технического состояния элементов ТСВД, учитывая их отклонения от технических условий.

Цель исследования – установление зависимости параметров топливоподачи от изменения технического состояния элементов ТСВД.

Материалы, методы и объекты исследования. Исследования базируются на методах физического и математического моделирования, сравнения. В качестве объекта исследования использован дизельный двигатель. При интегрировании дифференциальных уравнений использован метод Эйлера. Параметры технического состояния исследуемых элементов ТСВД установлены по результатам обследования ремонтного фонда ремонтно-обслуживающих предприятий. Результаты расчетов параметров топливоподачи обработаны с помощью пакета прикладных программ «STATISTICA-5.0».

Результаты исследования. Разработана математическая модель гидродинамического расчета процесса топливоподачи с учетом утечек топлива через прецизионные элементы ТСВД (для топливного насоса – система уравнений (1), для форсунки насоса – система уравнений (2) [7–10]:

$$\left. \begin{aligned} f_n C_n &= \frac{\alpha V_n}{\rho} dP_n + \sigma_1 \mu_0 f_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_n - P_z)} + \\ &+ \sigma_1 \mu_k f_k \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_n - P'_n)} + \sigma_1 f_k C_k + Z_1 + Z_2 \\ f_m C'_m &= \left[\sigma_1 \mu_k f_k \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_n - P'_n)} + \sigma_1 f_k C_k - \alpha V' \frac{dP'_n}{\rho} \right] \sigma_2 \\ dV'_{nu} &= - \left[\mu_k f_k \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_n - P'_n)} + \sigma_1 f_k C_k \right] \\ M_k \frac{dC_k}{dt} &= [f_k (P_n - P'_n) - f_k P_{k0} - C_{nk}] \sigma_1 \\ \frac{dh_k}{dt} &= C_k \sigma_1 \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} f_m C''_m &= \left[\frac{dP_\phi}{dt} \alpha V_\phi + \mu_p f_p \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_\phi - P_u)} + \sigma_3 (f_u - f'_u) C_u + Z_3 \right] \sigma_4 \\ \frac{dV'_{n\phi}}{dt} &= - [f_m C''_m - \sigma_3 (f_u - f'_u) C_u] \sigma_4 \\ M_u \frac{dC_u}{dt} &= [(f_u - f'_u) (P_\phi - P_z) + (f'_u - f_u) P_\phi - C_{n\phi} h_u + f_u P_\phi] \sigma_3 \\ \frac{dh_u}{dt} &= C_u \sigma_3 \end{aligned} \right\} (2)$$

где:

$P_n, P'_n, P_z, P_\phi, P_z, P_{ko}, P_u$ – соответственно, давления: в полости нагнетания плунжерной пары; полости штуцера; в головке насоса; давления впрыска; затяжки пружины форсунки; открытия нагнетательного клапана; в цилиндре двигателя;

$f_n, f_k, f_m, f_o, f_u, f_u, f'_u$ – соответственно, площади: поперечного сечения плунжера; нагнетательного клапана; канала топливопровода; окон втулки плунжера; иглы распылителя; штифта иглы распылителя; определяемая по диаметру запорной кромки иглы;

$V_n, V'_n, V_\phi, V'_{nu}, V'_{n\phi}$ – соответственно, объем: в полости нагнетания плунжерной пары; штуцера насоса; каналов форсунки; свободные объемы в полостях насоса; форсунки;

$C_{nk}, C_{n\phi}$ – соответственно, жесткость пружин: нагнетательного клапана; форсунки;

C'_m, C''_m – соответственно, скорость движения топлива в сечениях топливопровода: во входном; в выходном;

C_n, C_k, C_u – соответственно, скорости движения: плунжера; нагнетательного клапана; иглы распылителя;

t, a – соответственно, время и скорость распространения волны давления;

σ_i – ступенчатая функция;

$\mu_0 f_0, \mu_k f_k, \mu_p f_p$ – соответственно, эффективные проходные сечения: окон втулки; щели между нагнетательным клапаном и седлом; распылителя форсунки;

α, ρ – соответственно, коэффициенты сжимаемости и плотности топлива;

h_k, h_u – соответственно, подъемы нагнетательного клапана и иглы распылителя;

M_k, M_u – соответственно, массы движущихся частей нагнетательного клапана и иглы распылителя;

Z_1, Z_2, Z_3 – соответственно, расходы топлива через зазоры: в золотниковой; поршневой частях плунжера; между иглой и корпусом распылителя.

Экспериментально установлены гидравлические характеристики элементов ТСВД:

$$\mu_p f_p = f(h_u), \mu_0 f_0 = f(\phi). \quad (3)$$

Интегрирование дифференциальных уравнений производили с применением метода Эйлера с дроблением шага расчета в три раза после выхода разгрузочного пояска из седла нагнетательного клапана. В этом случае обеспечивается достаточная точность расчета при шаге интегрирования $0,02 \dots^\circ$. Результаты расчета через каждые $0,5 \dots^\circ$ поворота кулачкового вала насоса (к. в. н.) приведены в таблице 1.

Матрица плана расчетов, уровни параметров исследуемых факторов и варианты комплектования элементами ТСВД представлены в таблице 2. Результаты расчетов приведены там же.

В соответствии с результатами расчетов, изменение технического состояния элементов ТСВД в исследованном диапазоне поразному влияет на основные параметры топливоподачи (по величине и характеру). Так, с увеличением зазора в плунжерной паре с 2 до 10 мкм уменьшаются цикловая подача и давление впрыска топлива, соответственно, на $5,5 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ и $4,5 \text{ МПа}$, или на $7,4\%$ и $20,5\%$. Угол запаздывания и продолжительность впрыскивания при этом увеличиваются, соответственно, на $0,5^\circ$ и $0,7 \dots^\circ$ поворота к. в. н., или на 10% и $7,8\%$.

Таблица 1. Результаты расчета процесса топливоподачи УТН-5 дизеля 4Ч11/12,5
(номинальный режим)
Table 1. Calculation results for the UTN-5 fuel supply process for diesel 4Ch11/12.5
(nominal mode)

Угол поворота к. в. н.	Давление в полости насоса	Расход топлива через клапан	Подъем клапана	Давление на входе в топливopовpод	Подъем иглы распылителя	Цикловая подача	Давление в полости форсунки	Прямая волна давления
φ	P_n	P_n^c	h_k	P_φ	h_u	g_u	P_g	$F(t-L/a)$
град	кг/см ²	кг/см ²	см	кг/см ²	см	мм ³ /Град	кг/см ²	кг/см ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
53,499	21,2	-	0,0001	-	-	-	-	-
53,999	23,2	-	0,0026	-	-	-	-	-
54,499	22,9	-	0,0086	-	-	-	-	-
54,999	22,3	-	0,0178	-	-	-	-	-
55,499	23,3	-	0,0301	-	-	-	-	-
55,999	24,1	-	0,0457	-	-	-	-	-
56,499	20,9	-	0,0545	-	-	-	-	-
56,999	19,0	-	0,0851	-	-	-	-	-
57,499	20,3	4,9	0,1060	-	-	-	-	-
57,999	47,9	31,5	0,1246	-	-	-	-	-
58,490	90,1	47,5	0,1425	-	-	-	-	-
58,999	74,6	73,1	0,1682	-	-	-	-	-
59,499	94,3	89,0	0,1883	-	-	-	-	-
59,999	107,1	103,9	0,2002	-	-	-	-	-
60,499	122,2	116,3	0,2030	-	-	-	-	-
60,999	140,6	126,1	0,1980	-	-	-	-	-
61,490	171,6	132,5	0,1899	-	-	-	-	-
61,999	175,0	143,4	0,1894	-	-	-	-	-
62,499	167,3	154,6	0,1941	-	-	-	-	-
62,999	177,1	161,6	0,1950	-	-	-	84,8	138,0
63,499	18,8	166,3	0,1929	135,1	0,00001	0,003	15,7	149,7
63,999	186,3	163,8	0,1901	201,8	0,00466	2,472	198,5	158,6
64,499	173,4	152,6	0,1877	125,4	0,01982	8,028	198,3	164,4
64,999	152,9	133,3	0,1851	49,1	0,03686	9,166	92,2	177,8
65,499	127,3	105,6	0,1819	120,4	0,03907	13,128	91,7	186,8
65,999	95,7	72,8	0,1791	131,3	0,03776	14,498	141,0	193,4
66,499	52,4	37,8	0,1780	129,0	0,03800	14,290	136,4	196,5
66,999	44,9	39,4	0,1740	126,1	0,03963	13,300	124,8	191,5
67,499	40,4	10,4	0,1634	127,2	0,03999	13,105	115,6	177,8
67,999	23,5	-	0,1552	110,6	0,03998	12,254	99,5	156,1
68,499	18,4	-	0,1494	87,8	0,03910	11,325	72,2	126,2
68,999	16,6	-	0,1428	102,9	0,03501	13,580	15,2	163,3
69,499	15,9	-	0,1345	17,2	0,02703	5,931	12,3	-6,6
69,999	15,6	-	0,1244	69,8	0,01020	2,355	77,5	19,0
70,499	15,6	-	0,1124	147,9	0,00062	0,324	194,5	106,9
70,999	15,5	-	0,0985	131,5	0,00650	2,57	101,0	83,5
71,499	15,5	-	0,0831	36,5	0,01534	2,953	86,3	52,6
71,999	15,5	-	0,0662	36,6	0,01775	3,728	33,5	57,6
72,499	15,2	-	0,0482	80,7	0,01250	3,251	49,2	59,1
72,999	14,9	-	0,02991	117,2	0,00443	2,023	88,2	48,0
73,499	14,6	-	0,0091	107,8	0,00012	0,050	116,1	39,9

Продолжение таблицы 1

Угол поворота к.в.н.	Обратная волна давлений	Расход топлива через клапан	Скорость истечения топлива из распылителя	Скорость топлива на входе в топливо-вопровода	Скорость топлива на выходе из топливо-вопровода	Свободный объем в полости насоса	Свободный объем в полости форсунки	Давление посадки иглы
φ	$w(t)$	q_k	C_ϕ	C'_m	C''_m	$V'_{нп}$	$V'_{нф}$	P'_ϕ
град	кг/см ²	мм ³	см/сек	см/сек	см/сек	см ³	см ³	кг/см ²
10	11	12	13	14	15	16	17	18
53,499	-	-	-	-	-	0,290	0,0044	-
53,999	-	-	-	-	-	0,0283	0,0044	-
54,499	-	-	-	-	-	0,0266	0,0044	-
54,999	-	-	-	-	-	0,0240	0,0044	-
55,499	-	-	-	-	-	0,0205	0,0044	-
55,999	-	-	-	-	-	0,0161	0,0044	-
56,499	-	-	-	-	-	0,0108	0,0044	-
56,999	-	-	-	-	-	0,0050	0,0044	-
57,499	-0.1	-	-	31	-	-	0,0044	-
57,999	12,6	-	-	513	-	-	0,0044	-
58,490	30.8	-	-	994	-	-	0,0044	-
58,999	31,5	-	-	1260	-	-	0,0044	-
59,499	31,4	0,776	-	1415	-	-	0,0044	-
59,999	31,4	4,190	-	1556	-	-	0,0044	-
60,499	31,2	10,225	-	1671	-	-	0,0044	-
60,999	31,1	18,400	-	1762	-	-	0,0044	-
61,490	31,1	27,118	-	1822	-	-	0,0044	-
61,999	31,1	34,560	-	1923	-	-	0,0044	-
62,499	31,1	40,978	-	2030	-	-	0,0044	-
62,999	31,0	48,113	-	2096	2527	-	0,0031	-
63,499	30,9	55,919	17395	2140	1531	-	-	128,0
63,999	30,9	62,904	21903	2116	984	-	-	188,0
64,499	30,9	68,320	17554	2012	1778	-	-	118,0
64,999	30,9	72,132	10689	1830	2799	-	-	44,0
65,499	30,9	74,231	16766	1569	2297	-	-	108,5
65,999	45,6	74,600	17624	1213	2300	-	-	119,8
66,499	-24,1	74,600	17474	2	2376	-	-	117,8
66,999	-35,3	74,600	17275	-312	2314	-	-	115,2
67,499	76,7	74,600	17371	1404	2049	-	-	116,5
67,999	117,4	74,600	16238	2191	1804	0,0070	-	101,8
68,499	55,9	74,600	14489	1033	1472	0,0131	-	81,1
68,999	57,8	74,600	15482	1054	2031	0,0181	-	92,1
69,499	61,4	74,600	6666	1122	-299	0,0238	-	16,3
69,999	56,0	74,600	12385	1042	-265	0,0300	-	61,5
70,499	42,6	74,600	18602	785	573	0,0361	-	145,6
70,999	38,2	74,600	17916	704	245	0,0423	-	125,4
71,499	31,0	74,600	9561	574	597	0,0487	-	35,9
71,999	-8,1	74,600	9148	-58	720	0,0559	-	32,3
72,499	-24,4	74,600	13641	-449	338	0,0597	-	73,9
72,999	-65,1	74,600	16623	-1147	-226	0,0630	-	108,0
73,499	-41,2	74,600	16095	-747	-305	0,0655	-	109,5
73,999	-41,2	74,600	13480	-803	-77	0,0656	-	75,9

Таблица 2. Матрица плана, уровни варьирования и результаты расчета параметров топливоподачи
Table 2. Plan matrix, variation levels and calculation results of fuel supply parameters

Уровни варьирования	Факторы				Функции отклика			
	Эффективное проходное сечение распылителя μ_{rfp} , мм ²	Эффективное проходное сечение т.в.д. μ_{TFD} , мм ²	Зазор в плунжерной паре δ_n , мкм	Зазор по разгрузающему пояску нагнетательного клапана δ_k , мкм	Продолжительность впрыскивания φ_n^o	Запаздывание впрыскивания φ_3^o	Цикловая подача g_u , мм ³ /цикл	Давление впрыскивания P_6 , МПа
	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
Верхний	0,60	1,10	10	16				
Основной	0,45	0,95	6	10				
Нижний	0,30	0,80	2	4				
Интервал	0,15	0,15	4	6				
Номера опытов	План				Результаты			
Основной	0,45	0,95	6	10	9,30	10,84	73,67	22,49
1	0,30	0,95	6	10	10,38	11,81	68,83	25,16
2	0,45	0,80	6	10	9,69	10,84	73,41	23,71
3	0,45	0,95	2	10	8,95	9,75	75,77	24,69
4	0,45	0,95	6	4	11,04	11,78	71,44	20,89
5	0,60	0,95	6	10	8,23	10,80	73,76	19,81
6	0,45	1,10	6	10	8,54	10,84	74,18	20,04
7	0,45	0,95	10	10	9,66	10,60	71,56	20,28
8	0,45	0,95	6	16	7,57	10,81	75,90	24,08

Увеличение эффективного проходного сечения приводит к уменьшению гидравлического сопротивления, оказываемого истечению топлива из сопла распылителя. В этом случае давление впрыска топлива снижается [11–14]. Данное обстоятельство приводит к уменьшению влияния сжимаемости на величину цикловой подачи.

Величина критического эффективного проходного сечения распылителя зависит от величины цикловой подачи, параметров стендовых топливопроводов и распылителей форсунок, с которыми регулировался ТНВД, а также от параметров рабочих топливопроводов и распылителей форсунок, с которыми работает ТНВД на дизельном двигателе.

Увеличение эффективного проходного сечения для исследованной ТА на режиме работы дизеля 4Ч11/12,5 от 0,30 мм² и до критической величины, равной 0,40 мм², вызвало увеличение цикловой подачи топлива с 70,5 до 74,5 мм³/цикл, то есть на 4,0 мм³/цикл, или на 5,7%. Дальнейшее увели-

чение эффективного проходного сечения до 0,59 мм² не привело к изменению цикловой подачи топлива.

Увеличение эффективного проходного сечения от 0,29 до 0,59 мм² при этом привело к уменьшению давления впрыскивания на 5,5 МПа с 24,5 до 19,0 МПа, или на 25%, продолжительности впрыскивания на 2...° с 10,0 до 8,0...°, или 22,2% и угла запаздывания впрыскивания топлива на 1,0...° с 11,0 до 10,2...°, или на 10,0%.

Увеличение эффективного проходного сечения топливопровода с 0,80 до 1,10 мм² привело к увеличению цикловой подачи топлива на 0,8 мм³/цикл с 74,0 до 74,8 мм³/цикл, или на 1,1%. При этом давление и продолжительность впрыскивания топлива уменьшились, соответственно, на 3,0 МПа с 23,5 до 20,0 МПа, или на 13,6% и на 1,1...° с 9,5...° до 8,4...°, или на 12,2%, угол запаздывания впрыскивания топлива практически не изменился.

Вывод. В результате проведенного исследования установлено, что замена элементов ТСВД без контроля их гидравлических характеристик приводит к неравномерности: по цикловой подаче до 7,4%; давлению впрыскивания до 25%; продолжительности и углу запаздывания впрыскивания топлива, соответственно, на 48,8 и 10,01%. Следовательно, существует необходимость проведе-

ния многофакторного исследования влияния параметров технического состояния на основные параметры топливоподачи, на основании которых разрабатывается система эталонирования дизельной топливной аппаратуры, что позволит исключить установку на дизельный двигатель ТА с параметрами, которые имеют существенное отклонение от нормативных значений.

Список литературы

1. Koichev V.S., Kobozev A.K., Shvetsov I.I., Gritsai D.I., Gerasimov E.V. Biofuel mixtures: perspective motor fuel // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2017. Т. 8. № 5. С. 642–646. EDN: XCNLFS
2. Koichev V., Mosikyan K. Influence of combustion chamber design for power and fuel efficiency of gasoline engines running on natural GAS // *Известия Национального аграрного университета Армении*. 2016. № 3. С. 44–46.
3. Кобозев А. К., Швецов И. И., Койчев В. С. Методика проведения испытания и регулировки форсунок // *Актуальные вопросы инженерного образования: сб. науч. тр. по материалам научно-методической конференции*. Ставрополь: Изд-во «Агрус», 2016. С. 36–43. EDN: UCLQRL
4. Кобозев А. К., Швецов И. И., Койчев В. С. Методика проверки нагнетательных клапанов // *Актуальные вопросы инженерного образования: сб. науч. тр. по материалам научно-методической конференции*. Ставрополь: Изд-во «Агрус», 2016. С. 43–46. EDN: WINCNV
5. Кобозев А. К., Швецов И. И., Койчев В. С., Газизов И. И., Бахолдин Н. В. Обнаружение и пути устранения неисправностей – резерв более глубокого познания конструкций тракторов и автомобилей // *Совершенствование научно-методической работы в университете: сб. науч. тр. по материалам научно-методической конференции*. Ставрополь: Изд-во «Агрус», 2018. С. 138–144. EDN: VSGLEK
6. Кобозев А. К., Швецов И. И., Койчев В. С. Методика проверки плунжерных пар // *Актуальные вопросы инженерного образования: сб. науч. тр. по материалам научно-методической конференции*. Ставрополь: Изд-во «Агрус», 2016. С. 47–51. EDN: WINIWB
7. Шекихачев Ю. А., Батыров В. И., Карданов Х. Б. Основные пути повышения стабильности параметров топливоподачи тракторных дизелей // *АгроЭкоИнфо*. 2018. № 2(32). С. 55.
8. Батыров В. И., Губжоков Х. Л. Совершенствование процессов смесеобразования и сгорания в дизелях // *Сельский механизатор*. 2017. № 6. С. 48. EDN: WEPQSZ
9. Батыров В. И., Койчев В. С., Болотоков А. Л. Влияние состояния топливной системы низкого давления на работоспособность топливных насосов распределительного типа // *Научно-технический прогресс в АПК: проблемы и перспективы. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016»*. Ставрополь: Изд-во «Агрус», 2016. С. 247–252. EDN: WAWRAN
10. Батыров В. И., Койчев В. С., Болотоков А. Л. Зависимость параметров топливоподачи от давления в полости питания топливного насоса высокого давления // *Научно-технический прогресс в АПК: проблемы и перспективы. Сборник трудов по материалам Международной научно-практической конференции, в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016»*. Ставрополь: Изд-во «Агрус», 2016. С. 252–256. EDN: WBHSPV
11. Батыров В. И., Болотоков А. Л., Ашабоков Х. Х. Закономерности изменения давления начала подъема иглы распылителя форсунок дизелей ЯМЗ // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2015. Т. 3. № 4-1(15-1). С. 156–160. DOI: 10.12737/13912. EDN: UYRJYF
12. Шекихачев Ю. А., Батыров В. И., Карданов Х. Б. Результаты экспериментальных исследований распылителей форсунок автотракторных дизелей // *АгроЭкоИнфо*. 2018. № 2(32). С. 59.
13. Батыров В. И., Карданов Х. Б. Определение предельного состояния и классификация отказов распылителя форсунок дизелей // *Научное обеспечение инновационного развития агропромышленного комплекса регионов РФ: сб. науч. тр. по материалам Международной научно-практической конференции*. Лесниково: Курганская ГСХА, 2018. С. 307–310. EDN: YROMRQ
14. Шекихачев Ю. А., Батыров В. И., Карданов Х. Б. Исследование предельного состояния распылителя форсунок автотракторных дизелей // *АгроЭкоИнфо*. 2018. № 2(32). С. 48.

References

1. Koichev V.S., Kobozev A.K., Shvetsov I.I., Gritsai D.I., Gerasimov E.V. Biofuel mixtures: perspective motor fuel. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2017;8(5):642-646. EDN: XCNLFS
2. Koichev V., Mosikyan K. Influence of combustion chamber design for power and fuel efficiency of gasoline engines running on natural GAS. *Bulletin of Armenian National Agrarian University*. 2016;(3):44-46.
3. Kobozev A.K., Shvetsov I.I., Koychev V.S. Methodology for testing and adjusting nozzles. *Aktual'nyye voprosy inzhenerenogo obrazovaniya: sb. nauch. tr. po materialam nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Current issues of engineering education: collection of scientific papers based on materials of a scientific-methodological conference]. Stavropol: Izd-vo "Agrus", 2016. Pp. 36-43. EDN: UCLQRL
4. Kobozev A.K., Shvetsov I.I., Koychev V.S. Methodology for checking discharge valves. *Aktual'nyye voprosy inzhenerenogo obrazovaniya: sb. nauch. tr. po materialam nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Current issues of engineering education: collection of scientific papers based on materials of a scientific-methodological conference]. Stavropol: Izd-vo "Agrus", 2016. Pp. 43-46. (In Russ.). EDN: WINCNV
5. Kobozev A.K., Shvetsov I.I., Koychev V.S. [et. al.]. Detection and ways of eliminating faults – a reserve for deeper knowledge of the designs of tractors and cars. *Sovershenstvovaniye nauchno-metodicheskoy raboty v universitete: sb. nauch. tr. po materialam nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Improvement of scientific research methodological work at the university: collection of scientific papers based on materials of a scientific-methodological conference]. Stavropol: Izd-vo "Agrus", 2018. Pp. 138-144. (In Russ.). EDN: VSGLEK
6. Kobozev A.K., Shvetsov I.I., Koychev V.S. Methodology for checking plunger pairs. *Aktual'nyye voprosy inzhenerenogo obrazovaniya: sb. nauch. tr. po materialam nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Current issues of engineering education: collection of scientific papers based on materials of a scientific-methodological conference]. Stavropol: Izd-vo "Agrus", 2016. Pp. 47-51. (In Russ.). EDN: WINIWB
7. Shekikhachev Yu.A., Batyrov V.I., Kardanov Kh.B. The main ways to increase the stability of the fuel supply parameters of tractor diesel engines. *AgroEkoInfo*. 2018;2(32):55.
8. Batyrov V.I., Gubzhokov Kh.L. Improving the processes of mixture formation and combustion in diesel engines. *Selskiy Mekhanizator*. 2017;(6):48. (In Russ.)
9. Batyrov V.I., Koichev V.S., Bolotokov A.L. Influence of the state of the low-pressure fuel system on the performance of distribution-type fuel pumps. *Nauchno-tehnicheskij progress v APK: problemy i perspektivy. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, v ramkakh XVIII Mezhdunarodnoy agropromyshlennoy vystavki «Agrouniversal – 2016»* [Scientific and technical progress in the agro-industrial complex: problems and prospects. Collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference, within the framework of the XVIII International Agro-Industrial Exhibition "Agrouniversal – 2016"]. Stavropol: Izd-vo "Agrus", 2016. Pp. 247-252. (In Russ.). EDN: WAWRAN
10. Batyrov V.I., Koychev V.S., Bolotokov A.L. Dependence of fuel supply parameters on pressure in the feed cavity of a high-pressure fuel pump. *Nauchno-tehnicheskij progress v APK: problemy i perspektivy. Sbornik trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, v ramkakh XVIII Mezhdunarodnoy agropromyshlennoy vystavki «Agrouniversal – 2016»* [Scientific and technical progress in the agro-industrial complex: problems and prospects. Collection of works based on the materials of the International Scientific and Practical Conference, within the framework of the XVIII International Agro-Industrial Exhibition "Agrouniversal – 2016"]. Stavropol: Izd-vo "Agrus", 2016. Pp. 252-256. (In Russ.). EDN: WBHSPV
11. Batyrov V.I., Bolotokov A.L., Ashabokov Kh.Kh. Patterns of changes in the pressure of the beginning of the lifting needle of the YaMZ diesel injector nozzle. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2015;3(4-1):156-160. (In Russ.). DOI: 10.12737/13912. EDN: UYRJYF
12. Shekikhachev Yu.A., Batyrov V.I., Kardanov Kh.B. Results of experimental studies of injector nozzles for automobile and tractor diesel engines. *AgroEkoInfo*. 2018;2(32):59. (In Russ.)
13. Batyrov V.I., Kardanov Kh.B. Determination of the limit state and classification of failures of the diesel injector nozzle. *Nauchnoye obespecheniye innovatsionnogo razvitiya agropromyshlennogo kompleksa regionov RF: sb. nauch. tr. po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific support of innovative development of the agro-industrial complex of regions of the Russian Federation: collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference]. Lesnikovo: Kurganskaya GSKHA, 2018. Pp. 307-310. (In Russ.). EDN: YROMRQ
14. Shekikhachev Yu.A., Batyrov V.I., Kardanov Kh.B. Study of the limiting state of the injector nozzle of automobile and tractor diesel engines. *AgroEkoInfo*. 2018;2(32):48. (In Russ.)

Сведения об авторах

Апажев Аслан Каральбиевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 1530-1950, Scopus ID: 57195587959, Researcher ID: H-4436-2016

Шогенов Юрий Хасанович – доктор технических наук, академик РАН, профессор, заведующий сектором механизации, электрификации и автоматизации Отдела сельскохозяйственных наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российская академия наук» (РАН), SPIN-код: 7335-0970, Scopus ID: 57221207970, Researcher ID: AAR-1140-2020

Шекихачев Юрий Ахметханович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4107-1360, Scopus ID: 57205029899, Researcher ID: AAE-3244-2019

Батыров Владимир Исмелович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры агроинженерии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова», SPIN-код: 1074-2232, Scopus ID: 57214136440

Information about the authors

Aslan K. Apazhev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-код: 1530-1950, Scopus ID: 57195587959, Researcher ID: H-4436-2016

Yuri Kh. Shogenov – Doctor of Technical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Head of the Sector of Mechanization, Electrification and Automation of the Department of Agricultural Sciences, Russian Academy of Sciences (RAS), SPIN-code: 7335-0970, Scopus ID: 57221207970, Researcher ID: AAR-1140-2020

Yuri A. Shekikhachev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-код: 4107-1360, Scopus ID: 57205029899, Researcher ID: AAE-3244-2019

Vladimir I. Batyrov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Maintenance and Repair of Machines in the Agroindustrial Complex, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN: 1074-2232, Scopus ID: 57214136440

Авторский вклад. Все авторы принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors were directly involved into the planning, execution and analysis of this study. All authors of this article have read and approved the submitted final version.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 02.07.2024;
одобрена после рецензирования 22.07.2024;
принята к публикации 31.07.2024.*

*The article was submitted 02.07.2024;
approved after reviewing 22.07.2024;
accepted for publication 31.07.2024.*