



# ИННОВАЦИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ И ХИМИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

---

DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu10.2016.4.5>

УДК 621.436.12

ББК 40.75

## УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ ВЫСОКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ

**Александр Викторович Васильев**

Доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и гидравлики,  
Волгоградский государственный технический университет  
vasilyev@vstu.ru  
просп. им. Ленина, 28, 400005 г. Волгоград, Российская Федерация

**Андрей Михайлович Ларцев**

Кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных машин и двигателей,  
Волгоградский государственный технический университет  
vasilyev@vstu.ru  
просп. им. Ленина, 28, 400005 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрено влияние функциональных характеристик топливной форсунки, топливного насоса высокого давления, турбокомпрессора на экономические и экологические показатели тракторного дизеля воздушного охлаждения, такие как удельный эффективный расход топлива, дымность отработавших газов, вредные выбросы с отработавшими газами CO, CH, NO<sub>x</sub>. Приведены результаты сравнительных стендовых испытаний двигателя 8ЧВН15/16 в модификации В-400, укомплектованного перечисленными выше узлами различных производителей. Экспериментально получены количественные зависимости улучшения экологических и экономических показателей двигателя при повышении технического уровня комплектующих узлов.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, система топливоподачи, турбонаддув, форсунка, топливный насос высокого давления, турбокомпрессор, экономические и экологические показатели, экспериментальные исследования.

Выбросы вредных веществ с обработавшими газами двигателей сельскохозяйственных и промышленных тракторов в настоящее время ограничиваются действующими стандартами [4]. При этом изменение регулировочных параметров двигателя, таких как угол опережения впрыска топлива, давление подъема иглы распылителя форсунки, позволяет управлять в достаточно широких пределах показателями его экономичности и токсичности [1]. Однако более эффективным и, естественно, более дорогим способом улучшения показателей дизеля может быть использование узлов и агрегатов более высокого технического уровня [2; 3].

В связи с этим в данной статье приведены результаты экспериментального исследования влияния функциональных характеристик таких важнейших узлов, как топливная форсунка, топливный насос высокого давления (ТНВД), турбокомпрессор (ТКР), на экономические и экологические показатели тракторного дизеля воздушного охлаждения. Исследовательские работы были выполнены на двигателе 8ЧВН15/16 в модификации В-400, установленном на испытательном стенде. При этом с целью проведения сравнительных испытаний двигатель укомплектовывался перечисленными выше узлами, представленными различными производителями.

Основным элементом, определяющим технический уровень форсунки, является распылитель. При этом важна не только его конструкция, но и качество изготовления проточных отверстий. При проведении моторных испытаний двигатель был укомплектован ТНВД «Bosch» и ТКР S3A фирмы «Schwitzer». Угол опережения впрыскивания топлива составлял  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$  угла поворота коленчатого вала ( $^\circ$ пкв), а давление начала подъема иглы фор-

сунки  $P_{\text{ф}} = 23,5$  МПа. На форсунки устанавливались два типа распылителей, имеющих сходную геометрию: распылители производства ЧЗТА (Чугуевского завода топливной аппаратуры, Украина) и распылители фирмы «Bosch» (Германия). Экспериментальные данные приведены в таблице 1.

Как видно, протекание рабочего процесса улучшается не только с уменьшением  $\mu f$  (это обусловлено повышением давления перед распылителем и, как следствие, лучшим распыливанием топлива в случае с распылителями ЧЗТА), но и при переходе на распылитель «Bosch», который, имея сходную с распылителем ЧЗТА геометрию, обладает более совершенными проточными частями.

При испытаниях двигатель регулировался на постоянную мощность  $N_e = 305 \pm 3$  кВт. В этом случае при уменьшении  $g_e$  снижается цикловая подача топлива, а это ведет к снижению  $\text{NO}_x$ . В случае с распылителями ЧЗТА показатель  $\text{NO}_x$  растет. Здесь преобладающим воздействием на оксиды азота является рост максимальной температуры цикла. При использовании распылителя «Bosch» наблюдается также заметное снижение дымности (с 21 до 14 %), удельных выбросов  $\text{CO}$  (0,7 г/кВт·ч),  $\text{CH}$  (0,2 г/кВт·ч), рост  $P_z$  (0,2–0,3 МПа) и, соответственно, скорости нарастания давления (0,13–0,14 МПа/ $^\circ$ пкв).

Оптимальное значение эффективного проходного сечения распылителя определяется наилучшими показателями двигателя. При этом дальнейшее улучшение показателей дизеля возможно за счет более качественного изготовления проточных каналов распылителя.

Имеющие различный технический уровень, турбокомпрессоры и топливные насосы

Таблица 1

## Влияние типа распылителя на экологические и экономические показатели двигателя В-400

Распылитель	$\mu f$ , мм <sup>2</sup>	$g_{\text{еон}}$ , г/кВт·ч	$g_{\text{NO}_x}$ , г/кВт·ч	$g_{\text{CO}}$ , г/кВт·ч	$g_{\text{CH}}$ , г/кВт·ч	$K$ , %	$P_z$ , МПа	$dP/d\phi$ , МПа/ $^\circ$ пкв
ЧЗТА	0,44–0,46	219	13,08	1,40	0,94	21	9,6	0,24
	0,38–0,40	217	14,93	1,43	0,90	18	9,9	0,38
«Bosch»	0,38–0,40	214	14,00	0,71	0,70	14	9,8	0,37

*Примечание.*  $\mu f$  – эффективное проходное сечение распылителя форсунки;  $g_{\text{еон}}$  – удельный эффективный расход топлива, приведенный к нормальным атмосферным условиям;  $g_{\text{NO}_x}$ ,  $g_{\text{CO}}$ ,  $g_{\text{CH}}$  – удельные выбросы в отработавших газах соответственно  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$ ;  $K$  – дымность отработавших газов;  $P_z$  – максимальное давление сгорания;  $dP/d\phi$  – скорость нарастания давления.

высокого давления, как правило, имеют разные технические характеристики, что оказывает существенное влияние на показатели двигателя. В ходе экспериментальной оценки этого влияния на дизель устанавливались следующие турбокомпрессоры:

1. ТКР S3A «Schwitzer» (США), максимальный КПД компрессора  $\eta_k = 0,77$  в диапазоне расхода воздуха  $G_v = 0,18-0,34$  кг/с при степени повышения давления  $\pi_k = 1,65-2,48$ ; проходное сечение турбины  $25 \text{ мм}^2$ .

2. ТКР H1E «Holset» (Англия), максимальный КПД компрессора  $\eta_k = 0,79$  в диапазоне  $G_v = 0,15-0,26$  кг/с при  $\pi_k = 1,52-2,62$ ; проходное сечение турбины  $25 \text{ мм}^2$ .

3. ТКР H2B «Holset» (Англия), максимальный КПД компрессора  $\eta_k = 0,75$  в диапазоне  $G_v = 0,06-0,14$  кг/с при  $\pi_k = 1,20-1,98$ ; проходное сечение турбины  $25 \text{ мм}^2$ .

4. ТКР 8,5C-7 (Украина), максимальный КПД компрессора  $\eta_k = 0,68$  в диапазоне  $G_v =$

$0,18-0,24$  кг/с при  $\pi_k = 1,60-1,90$ ; проходное сечение турбины  $24 \text{ мм}^2$ .

При этом на двигатель поочередно устанавливались топливные насосы высокого давления «Motorpal» PV8B11K915j526 (диаметр плунжера 11 мм, ход 12 мм) и «Bosch» PE8P120A50/4RS 7010 (диаметр плунжера 12 мм, ход 12 мм). Для обоих насосов использовались распылители фирмы «Bosch»  $\mu_f = 0,38-0,40 \text{ мм}^2$ . Давление начала подъема иглы топливных форсунок  $P_{\phi} = 185 \text{ Бар}$ .

На рисунке 1 приведены регулировочные характеристики при комплектации двигателя ТНВД «Motorpal», а на рисунке 2 – ТНВД «Bosch». Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблицах 2 и 3. Используемые здесь понятия экономичного и малотоксичного режима работы связаны с соответствующими регулировками дизеля [1]. В таблице 4 приведены основные параметры используемых турбокомпрессоров.

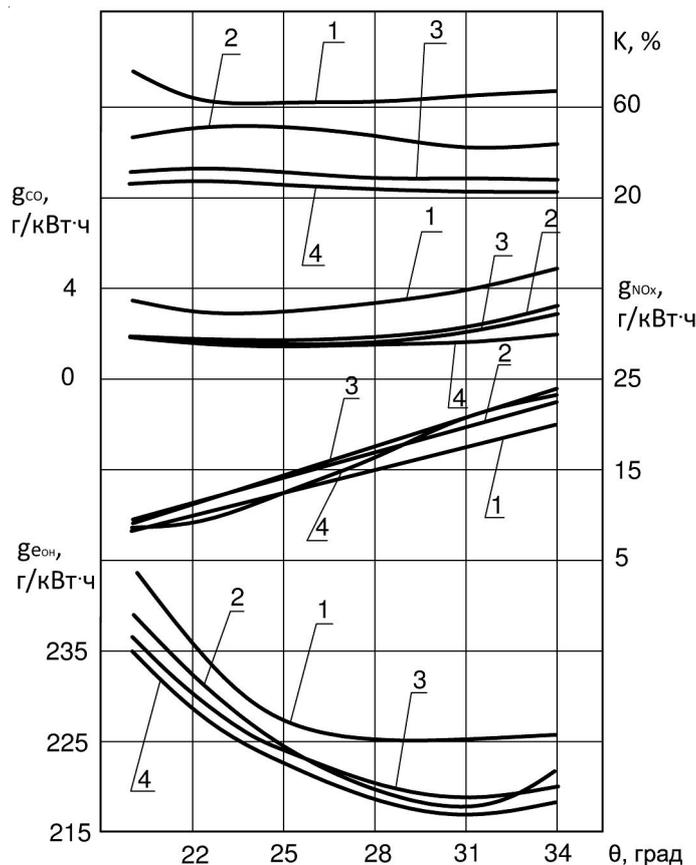


Рис. 1. Регулировочные характеристики по углу опережения впрыска топлива: ТНВД «Motorpal», распылитель «Bosch»: 1 – ТКР 8,5C-7; 2 – ТКР H2B; 3 – ТКР S3A; 4 – ТКР H1E

Рост технического уровня ТКР (см. табл. 2 и 3) определяет увеличение КПД компрессора с  $\eta_k = 0,68$  для ТКР 8,5С-7 до  $\eta_k = 0,79$  для ТКР Н1Е, давление наддува, расход воздуха и, соответственно, коэффициента избытка воздуха с  $\alpha = 1,78$  до  $\alpha = 2,15$ . Это при-

водит к повышению индикаторного КПД цикла и снижению потерь на газообмен. При этом повышение эффективности сгорания топлива приводит (для экономичного режима работы дизеля) к увеличению удельных выбросов  $NO_x$  с 17 до 19 г/кВт·ч.

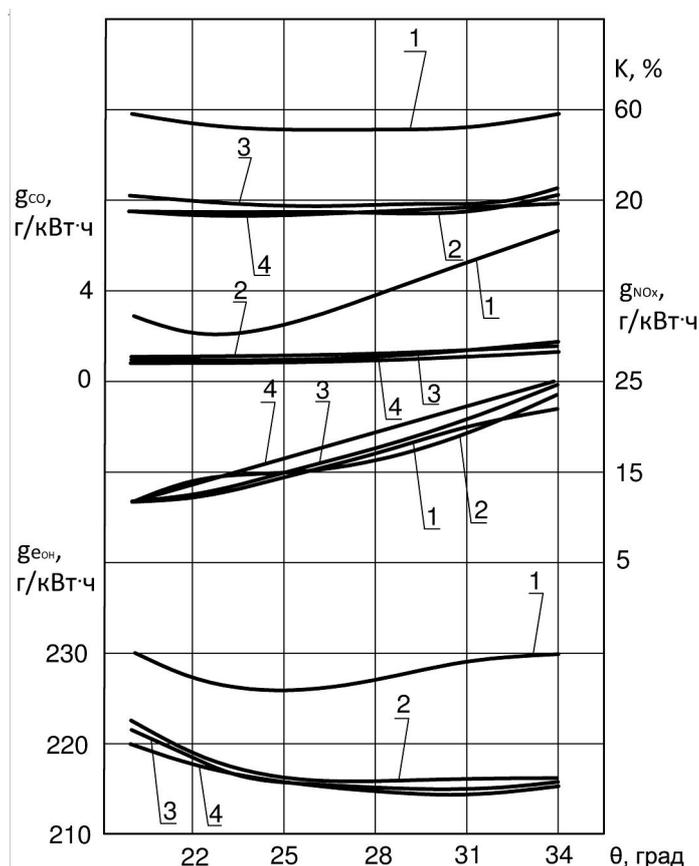


Рис. 2. Регулировочные характеристики по углу опережения впрыска топлива: ТНВД «Bosch», распылитель «Bosch»:

1 – ТКР 8,5С-7; 2 – ТКР Н2В; 3 – ТКР S3А; 4 – ТКР Н1Е

Таблица 2

**Влияние типа турбокомпрессора на экологические и эффективные показатели двигателя В-400 (ТНВД «Motorpal»)**

Тип ТКР	$\theta_{впр}, \text{°пкв}$	$g_{соз}, \text{г/кВт·ч}$	$g_{NOx}, \text{г/кВт·ч}$	$g_{CO}, \text{г/кВт·ч}$	$g_{сн}, \text{г/кВт·ч}$	$K, \%$	$P_k, \text{мБар}$	$G_b, \text{кг/ч}$	$\alpha$	$P_z, \text{Бар}$
Экономичный режим работы дизеля										
Н1Е	30	217	19	1,6	0,40	23	950	2030	2,14	121
S3A	30	219	18	1,8	0,40	30	905	2000	2,08	116
Н2В	30	219	18	2,4	0,40	46	870	1925	2,00	114
8,5С-7	31	224	17	3,8	0,40	62	720	1760	1,78	111
Малогокисичный режим работы дизеля										
Н1Е	27	219	15	1,4	0,50	26	970	2060	2,15	113
S3A	27	221	15	1,5	0,50	32	925	2010	2,08	110
Н2В	27	221	15	2,0	0,55	46	880	1940	2,00	107
8,5С-7	28	227	15	3,0	0,40	62	730	1765	1,78	104

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  является основным фактором, определяющим дымность ОГ. Как видно из приведенных выше данных, с ростом  $\alpha$  резко снижается дымность с 62 до 23 % при использовании ТНВД «Motorpal». Использование ТНВД более высокого технического уровня («Bosch») позволяет понизить общий уровень дымности в рассматриваемом диапазоне с 51 до 14 %. Везде наблюдается стабильное снижение CO, чего нельзя сказать о СН, остающихся практически на неизменном уровне.

Наблюдаемое улучшение эффективности процесса сгорания с улучшением параметров ТКР одновременно приводит при экономичном режиме работы дизеля к снижению  $g_{\text{сoн}}$  на 12 г/кВт·ч для ТНВД «Bosch» и на 7 г/кВт·ч для ТНВД «Motorpal», а также к росту максимальных давлений сгорания со 109–111 Бар для ТКР 8,5С-7 до 121–124 Бар для ТКР Н1Е.

В малотоксичном режиме удельные выбросы оксидов азота ограничиваются величиной 15 г/кВт·ч и значительно снижаются (до  $\Delta = 4$  г/кВт·ч) для ТКР Н1Е и обоих типов ТНВД по сравнению с экономичным режимом работы двигателя. Здесь также

снижаются удельные выбросы CO, а удельные выбросы СН и дымность ОГ незначительно увеличиваются. При этом повышается  $g_{\text{сoн}}$  на 1–2 г/кВт·ч для ТНВД «Bosch» и на 2–3 г/кВт·ч для ТНВД «Motorpal». Значительно снижается  $P_z$ : до 104–105 Бар для ТКР 8,5С-7 и до 113 Бар для ТКР Н1Е.

В случае применения ТКР с высоким КПД (Н1Е, S3A, H2B) переход от ТНВД «Motorpal» к ТНВД «Bosch» и связанное с этим уменьшение  $\theta_{\text{впр}}$  на 2–3 °пкв для обоих режимов работы дизеля сопровождаются при соответственно одинаковых удельных выбросах NO<sub>x</sub> улучшением топливной экономичности двигателя. В то время как для ТКР 8,5С-7 этими же условиями сравнения имеет место ухудшение  $g_{\text{сoн}}$  до 2 г/кВт·ч.

Наибольшее снижение дымности ОГ достигается в случае применения ТКР Н1Е и ТНВД «Bosch». Следовательно, применение турбокомпрессора и топливного насоса с высокими параметрами технического уровня за счет установки более позднего угла опережения впрыска топлива позволяет обеспечить наилучшие экологические параметры отработавших газов двигателя без ухудшения топливной экономичности или лучшую топливную

Таблица 3

**Влияние типа турбокомпрессора на экологические и эффективные показатели двигателя В-400 (ТНВД «Bosch»)**

Тип ТКР	$\theta_{\text{впр}}$ , °пкв	$g_{\text{сoн}}$ , г/кВт·ч	$g_{\text{NO}_x}$ , г/кВт·ч	$g_{\text{CO}}$ , г/кВт·ч	$g_{\text{СН}}$ , г/кВт·ч	$K$ , %	$P_{\text{кр}}$ , мБар	$G_{\text{в}}$ , кг/ч	$\alpha$	$P_z$ , Бар
Экономичный режим работы дизеля										
Н1Е	28	214	19	1,0	–	14	930	2015	2,16	124
S3A	28	214	18	1,2	0,40	16	820	1935	2,09	112
H2B	28	216	17	1,4	–	15	820	1910	2,06	114
8,5С-7	28	226	17	3,5	0,40	51	710	1740	1,77	109
Малотоксичный режим работы дизеля										
Н1Е	24	216	15	0,9	–	14	980	2065	2,18	113
S3A	25	216	15	1,0	0,30	18	850	1950	2,09	105
H2B	25	217	15	1,2	–	16	850	1915	2,03	107
8,5С-7	26	227	15	3,0	0,40	51	706	1750	1,80	105

Таблица 4

**Параметры турбокомпрессоров**

Тип ТКР	$\eta_{\text{к макс}}$	Диапазон $G_{\text{в}}$ , кг/с	$\pi_{\text{к}}$ в диапазоне $G_{\text{в}}$	$S$ , мм
Н1Е	0,79	0,15–0,26	1,52–2,62	25
S3A	0,77	0,18–0,34	1,65–2,48	25
H2B	0,75	0,06–0,14	1,20–1,98	25
8,5С-7	0,68	0,18–0,24	1,60–1,92	24

экономичность без ухудшения экологических показателей.

Увеличение давления впрыскивания с 40,5 до 59,0 МПа и сокращение продолжительности впрыскивания топлива с 24,4° до 20,4° (соответствует переходу от ТНВД «Motorpal» к ТНВД «Bosch») приводят к повышению эффективности сгорания, которое выражается в уменьшении  $g_{\text{сoн}}$  на 3–5 г/кВт · ч, при этом наблюдается снижение оптимального  $\theta_{\text{впр}}$  на 2 °пкв. Примечательно, что удельные выбросы  $\text{NO}_x$  не увеличиваются, то есть потенциальное возрастание указанных выбросов за счет увеличения скорости горения и максимальных температур цикла компенсируется уменьшением  $g_{\text{NOx}}$  вследствие снижения  $\theta_{\text{впр}}$ . Дымность ОГ существенно снижается с повышением энергии впрыскивания, и тем значительнее, чем относительно хуже КПД турбокомпрессора: от 9 % для ТКР Н1Е до 31 % для ТКР Н2В. Удельные выбросы СО при переходе к ТНВД «Bosch» имеют тенденцию к снижению, а СН практически постоянны.

### Заключение

1. Экспериментально получены количественные зависимости улучшения экологических и экономических показателей двигателя при повышении технического уровня комплектующих узлов.

2. Так, например, повышение давления впрыскивания вследствие применения ТНВД «Bosch» приводит на экономичном режиме работы дизеля к существенному снижению дымности ОГ (на 9–30 %), причем удельные выбросы СО также имеют тенденцию к снижению, а выбросы  $\text{NO}_x$  и СН практически постоянны.

3. Увеличение КПД турбокомпрессора, оцениваемое по КПД компрессора (рост  $\eta_k$  от 0,68 до 0,79) на экономичном режиме работы двигателя, приводит к существенному снижению дымности ОГ (на 37–39 %), снижению выбросов СО (на 2,5 г/кВт · ч на номинальном режиме), а также некоторому увеличению выбросов  $\text{NO}_x$  на 2 г/кВт · ч на номинальном режиме. Влияние ТКР на выбросы СН не обнаружено. Снижение оксидов азота может быть достигнуто при регулиров-

ке двигателя на малотоксичный режим работы путем уменьшения угла опережения впрыска топлива.

4. Применение топливных распылителей «Bosch» вместо распылителей ЧЗТА улучшает протекание рабочего процесса: приводит к снижению расхода топлива на 3 г/кВт · ч, дымности на 4 % и некоторому снижению вредных выбросов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, А. В. Повышение эффективности дизеля совершенствованием газораспределения / А. В. Васильев, Е. А. Григорьев, Е. А. Дивинский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2000. – № 6. – С. 20–22.

2. ГОСТ Р 41.96-2011. Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной технике, в отношении выброса вредных веществ этими двигателями: (взамен ГОСТ Р 41.96-2005). – Введ. 2013–03–01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 61 с.

3. Ларцев, А. М. Особенности форсирования наддувом дизелей воздушного охлаждения большой размерности / А. М. Ларцев. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 163 с.

4. Ларцев, А. М. Экспериментальное исследование влияния регулировочных параметров на экономические и экологические показатели тракторного дизеля воздушного охлаждения / А. М. Ларцев, А. В. Васильев // Справочник. Инженерный журнал. – 2015. – № 8. – С. 37–42.

### REFERENCES

1. Vasilyev A.V., Grigoryev E.A., Divinskiy E.A. Povyshenie effektivnosti dizelya sovershenstvovaniem gazoraspredeleniya [Improving the Efficiency of a Diesel Engine by Gas Distribution Improvement]. *Traktory i selskokhozyaystvennyye mashiny*, 2000, no. 6, pp. 20–22.

2. GOST R 41.96-2011. *Edinoobraznyye predpisaniya, kasayushchiesya dvigateley s vosplamneniem ot szhatiya, prednaznachennykh dlya ustanovki na selskokhozyaystvennykh i lesnykh traktorakh i vnedorozhnoy tekhnike, v otnoshenii vybrosa vrednykh veshchestv etimi dvigatelyami: (vzamen GOST R 41.96-2005). Vved. 2013–03–01* [GOST R 41.96-2011. Uniform Provisions Concerning the Diesel Engine with Compression Ignition Designed to be Installed in Agricultural and Forestry Tractors

and Off-Highway Machines with Regard to the Emissions of Pollutants by the Engines: (Substitution of GOST R 41.96-2005). Adopted March 1, 2013]. Moscow, Standartinform Publ., 20613. 61 p.

3. Lartsev A.M. *Osobennosti forsirovaniya nadduvom dizeley vozdušnogo okhlazhdeniya bolshoy razmernosti* [Peculiarities of the Supercharged Air-Cooled Diesel Engine with High Dimensionality]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2015. 163 p.

4. Lartsev A.M., Vasilyev A.V. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya regulirovochnykh parametrov na ekonomicheskie i ekologicheskie pokazateli traktornogo dizelya vozdušnogo okhlazhdeniya [Experimental Study of the Effect of Adjusting the Parameters of Economic and Environmental Performance of Air-Cooled Diesel Engine Tractor]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, 2015, no. 8, pp. 37-42.

## **IMPROVING THE PARAMETERS OF TRACTOR DIESEL ON THE BASIS OF UNITS AND AGGREGATES OF HIGH TECHNICAL LEVEL**

**Aleksandr Viktorovich Vasilyev**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Heat Engineering and Hydraulics,  
Volgograd State Technical University  
vasilyev@vstu.ru  
Prosp. Lenina, 28, 400005 Volgograd, Russian Federation

**Andrey Mikhaylovich Lartsev**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Transport Machines and Engines,  
Volgograd State Technical University  
vasilyev@vstu.ru  
Prosp. Lenina, 28, 400005 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** Emissions of harmful substances with exhaust gases of agricultural and industrial tractors' engines are currently limited to operating standards. The change in the adjustment of engine parameters such as injection advance angle of fuel, the pressure lifting of the needle spray nozzles allow to control a fairly wide range of effectiveness and toxicity indicators. However, the use of units and aggregates of a higher technical level can be more efficient and expensive way to improve diesel performance.

The influence of the functional characteristics of the fuel injector, high-pressure fuel pump, turbocharger on the economic and ecological performance of air cooling tractor diesel, such as the effective specific fuel consumption, exhaust smoking, harmful emissions with exhaust gases CO, CH, NO<sub>x</sub>, have been considered. The results of comparative bench tests of the engine (V-400), equipped with the above units from different manufacturers, are given. The quantitative patterns of improving the engine ecological and economic characteristics using higher-level units have been experimentally obtained.

The increase in efficiency of the turbocharger measured at the compressor efficiency (increase of PC from 0.68 to 0.79) for the economical operation of the engine leads to a significant decrease opacity (37-39 %), lower emissions (2.5 g/kWh at nominal mode) and a slight increase in NO<sub>x</sub> 2 g/kWh at nominal regime. Emission of SN effect of TKR was not detected. The reduction of nitrogen oxides can be achieved when adjusting the engine for low-toxicity mode of operation by reducing the advance angle of fuel injection.

Using fuel Bosch nozzles instead of CST improves the flow of the working process: leads to lower fuel consumption by 3 g/kWh, smoke fumes by 4 % and some reduction in harmful bargain.

**Key words:** diesel engine, fuel supply system, turbocharging, fuel injector, high-pressure fuel pump, turbocompressor, ecological and economic indicators, experimental research.