

УДК 621.436.2; 621.4-1/-3

# РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДОБАВОК ВОДЫ В КАМЕРУ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ



**БИЖАЕВ А.В.,**  
аспирант,



**ДЕВЯНИН С.Н.,**  
ДОКТ. ТЕХН. НАУК

Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева,  
Тимирязевская ул., 49, Москва, 127550, Российская Федерация, e-mail: a.bizhaev@mail.ru

*Актуальную проблему для сельскохозяйственного сектора представляет токсичность дизельных двигателей, а также их высокая теплонапряженность. Основные токсичные компоненты, свойственные дизельным двигателям, – это оксиды азота и твердые частицы. Установлено, что добавка воды в топливо снижает теплонапряженность и токсичность двигателей. При подаче воды в камеру сгорания происходит охлаждение заряда, поступающего в цилиндр. Определили, что от способа подачи воды в камеру сгорания зависят показатели работы двигателя. Для проведения исследований выбрали два распространенных рациональных способа подачи воды в цилиндр: с воздухом и в виде водотопливной эмульсии. Предложен методике экспериментального исследования, которая заключается в сопоставлении выбранных способов по экологической безопасности двигателя внутреннего сгорания, его температурных режимов и регистрации предельного количества воды до нарушения нормальной работы дизеля. Проанализировали характеристики дизельного двигателя по токсичности отработанных газов, эффективности работы и температурному режиму в зависимости от способа подачи воды в цилиндры. Провели испытания на нагрузочных характеристиках при номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля, что соответствует режиму работы двигателя при проведении сельскохозяйственных операций на тракторе или комбайне. Показали, что подача 70 процентов воды с воздухом уменьшает температуру огневой поверхности головки на 27 процентов при средних значениях мощности 11-13 кВт. А при малых и максимальных нагрузках это снижение составляет около 20 процентов. При подаче воды с водотопливной эмульсией этот эффект меньше и на малых нагрузках составляет около 5 процентов, а при мощности 12-14 кВт доходит до 20 процентов.*

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, отработанные газы, добавка воды в двигатель, водотопливная эмульсия, оксиды азота.

**Д**обавка воды в камеру сгорания (КС) дизелей служит эффективным методом снижения токсичных выбросов отработанных газов (ОГ) [1, 2]. В связи с этим возникает проблема выбора способа подачи воды в цилиндр.

**Цель исследования** – экспериментальный анализ двух наиболее распространенных и рациональных по трудозатратам способов подачи воды:

- через штатные форсунки с топливом;
- через специальную систему с воздухом.

Подача воды с топливом осуществлялась в виде

водотопливной эмульсии (ВТЭ) через топливную форсунку топливным насосом высокого давления (ТНВД). Принцип работы данной системы на ВТЭ такой же, как и с дизельным топливом (ДТ) в обычном режиме, но требуется установить дополнительное приспособление для приготовления эмульсии.

Подача воды с воздухом осуществляется посредством специальной системы, дозирующей количество воды и впрыскивающей ее во впускной тракт двигателя через электроуправляемые форсунки. Расходом воды и частотой открытия управляет

специально разработанная электронная система. Форсунка совершает впрыск воды во впускной коллектор до открытия впускного клапана каждого цилиндра. Угол подачи воды относительно оси коленчатого вала двигателя в положении нижней мертвой точки в начальный момент регулируется и может иметь как положительное, так и отрицательное значение.

**Материалы и методы.** Исследования проводили на дизельном двигателе Д-120 номинальной мощностью 20 кВт. Тормозной стенд мощностью 125 кВт содержит индикаторы частоты вращения вала и крутящего момента двигателя. Для индикации расхода топлива или ВТЭ использовали расходомер DFM50. Расход воды на впуск определяли по периоду открытия форсунки осциллографом С1-117. Для замеров токсичности ОГ использовали пятикомпонентный газоанализатор «Инфракар 5М-2.02». Количество сажи измеряли с помощью дымомера Bosch фильтрацией порции ОГ через фильтровальную бумагу марки «Ф». Теплонапряженность головки цилиндра оценивали термопарой типа «ХК» заводского исполнения.

В экспериментах на ДТ, ВТЭ, а также при подаче воды с воздухом на впуске расход воды изменяли от 0 до 100% от массы поданного топлива. Установили, что при подаче ВТЭ с концентрацией воды 100% двигатель прекращает работать при  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  и выше, на меньших оборотах он работает, но с перебоями. Этого эффекта не наблюдалось при подаче воды в цилиндр с воздухом даже при повышении ее концентрации до 200%. Однако такое количество воды не способно полностью испариться в подаваемом воздухе, и, поступая в цилиндр в жидкой фазе, вода могла попадать в смазку, что было установлено ранее [3].

**Результаты и обсуждение.** Результаты испытаний двигателя в виде нагрузочных характеристик при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  с подачей воды в количестве 80% с ВТЭ и с воздухом на впуске, а также без подачи воды представлены на рисунке 1. Как следует из полученных результатов, при подаче воды в виде эмульсии на высоких нагрузках отмечается рост эффективного КПД двигателя с 0,36 до 0,38 (рис. 1а), однако без регулировки ТНВД максимальная мощность снижается с 19,0 до 13,5 кВт. При добавке такого же количества воды с воздухом наблюдается снижение КПД с 0,26 до 0,24 на низких нагрузках.

Более существенное влияние способ подачи воды оказывает на показатели токсичности. При подаче воды с воздухом содержание монооксида углерода CO выше на 0,01-0,02% (рис. 1а), чем при работе на ДТ во всем диапазоне нагрузок. При подаче воды с ВТЭ увеличение CO существенно выше, и при мощности 13,5 кВт оно составляет 0,06%, что

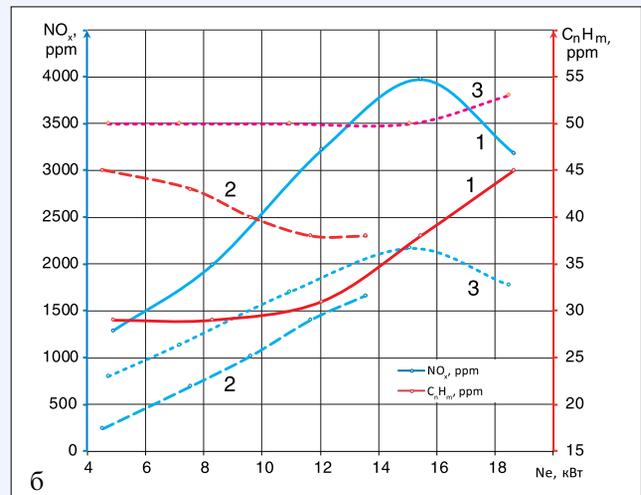
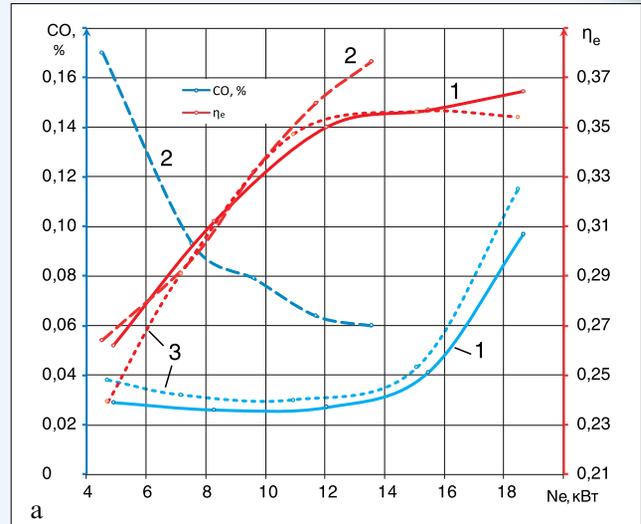


Рис. 1. Зависимость токсичности показателей и КПД от нагрузки ДВС:  
 а)  $\eta_e$  (эффективный КПД) и CO (монооксид углерода);  
 б)  $NO_x$  (оксиды азота) и  $C_xH_y$  (суммарные углеводороды);  
 1 – ДТ; 2 – ВТЭ; 3 – добавка воды с воздухом

выше почти в 2 раза, а на малых нагрузках выбросы CO достигают 0,16%, что превышает выбросы на ДТ почти в 5 раз. Такое различие можно объяснить более существенным снижением температуры в зоне горения топлива при подаче воды с ВТЭ, как следствие – замедление процесса сгорания, увеличение объема продуктов неполного сгорания, что и подтверждается другим исследованием [4].

Выбросы углеводородов появляются также в результате неполного сгорания топлива, и при подаче воды их количество увеличивается из-за снижения температуры сгорания (рис. 1б). При подаче воды с воздухом на участке 5-12 кВт концентрация  $C_xH_y$  составляет 50 ppm, то есть больше, чем при работе на ДТ, на 20 ppm. Дальнейшее увеличение мощности приводит к сокращению разницы до 8 ppm при мощности 19 кВт.

При подаче воды с ВТЭ при мощности 5-8 кВт концентрация углеводородов  $C_xH_y$  составляет 43-45 ppm, что выше на 13-15 ppm. При дальнейшем повышении мощности до 13,5 кВт этот показатель снижается до 38 ppm, превышение выбросов сокращается до 4 ppm, что меньше практически на 20%, чем при подаче воды с воздухом. Такое увеличение выбросов углеводородов при подаче воды с воздухом можно объяснить более низкой температурой воздушного заряда в цилиндре, что замедляет химические реакции окисления в пристеночных зонах камеры сгорания.

Снижение температуры сгорания негативно влияет на продукты неполного сгорания, но способствует образованию оксидов азота  $NO_x$  (рис. 1б). При подаче воды с ВТЭ выбросы оксидов азота в 3-4 раза меньше, чем при работе на ДТ, во всем диапазоне нагрузок. Так, при мощности 4,5 кВт, выбросы  $NO_x$  составляют 240 ppm вместо 1300 ppm, при нагрузках 13,5 кВт – 1660 ppm вместо 3700 ppm. При подаче воды с воздухом выбросы  $NO_x$  снижаются не так значительно, как при подаче с ВТЭ. Например, при мощности 5 кВт наблюдается снижение с 1300 до 800 ppm, а при мощности 15,5 кВт выбросы оксида азота сокращаются с 4000 до 2170 ppm, и общее падение при этом составляет 1830 ppm. На максимальной мощности 19 кВт окислы азота снижаются, по сравнению с работой на ДТ, с 3180 до 1780 ppm. Падение концентрации оксидов азота вызвана зависимостью интенсивности их образования от температуры сгорания смеси [5-7]. Концентрация оксидов азота уменьшается в связи со снижением температуры, особенно в зоне сгорания топлива.

Как и следовало ожидать, выбросы сажи имеют тенденцию к увеличению с ростом нагрузки на ДВС (рис. 2). При этом разница по выбросам сажи между способами подачи воды незначительна. При подаче воды с воздухом на малых нагрузках выбросы сажи снижаются на 0,2-0,3 ед. Bosch, а на больших нагрузках увеличиваются на 0,2-0,3 ед. Bosch, достигая значения 2,3 ед. Bosch. С подачей воды в виде ВТЭ тенденция неоднозначная, в пределах погрешности измерений. Можно наблюдать рост выбросов сажи в области повышенных нагрузок до 1,3 ед. Bosch. При этом же значении нагрузки выброс сажи при подаче воды с воздухом меньше и составляет 0,8 ед. Bosch, что ниже почти в 1,5 раза.

Оценка теплонапряженности деталей камеры сгорания может быть проведена по температуре го-

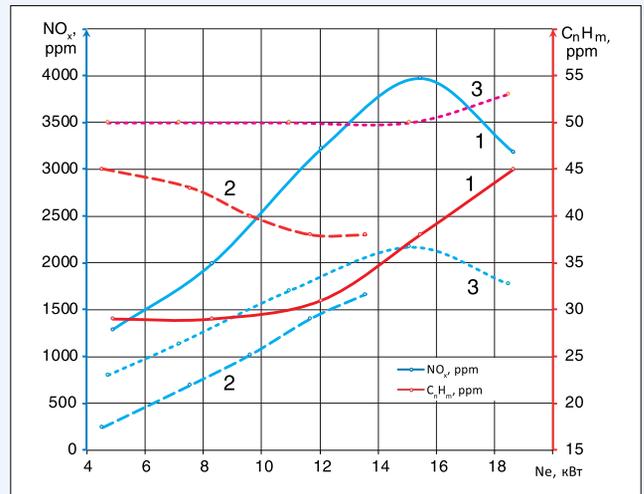


Рис. 2. Относительное изменение температуры головки ( $T_u/T_{u0}$ ) и выбросов сажи с ОГ ( $TЧ$ ) от нагрузки на ДВС: 1 – ДТ; 2 – ВТЭ; 3 – добавка воды с воздухом

ловки на огневой поверхности, измеренной термопарами каждого цилиндра. Результаты измерений представлены на рисунке 2 в виде относительных величин и в сравнении с работой на ДТ. Подача 80% воды с воздухом уменьшает на 27% температуру огневой поверхности головки при средних значениях мощности (11-13 кВт), а при малых и максимальных нагрузках это снижение составляет около 20%. При подаче воды с ВТЭ эффект меньше и на малых нагрузках составляет около 5%, а при мощности 12-14 кВт доходит до 20%.

**Выводы.** Добавка воды в цилиндры двигателя влияет на выбросы токсичных компонентов и уровень тепловой напряженности, причем это влияние зависит от способа подачи воды. При подаче 80% воды от количества топлива в цилиндры дизеля Д-120 повышаются выбросы продуктов неполного сгорания ( $CO$  и  $C_xH_y$ ). Причем выбросы  $CO$  увеличиваются при подаче воды с ВТЭ больше, чем при подаче ее с воздухом. Выбросы углеводородов, наоборот, активнее возрастают при подаче воды с воздухом, чем с ВТЭ. Выбросы оксидов азота снижаются интенсивнее при подаче воды с ВТЭ, чем с воздухом.

Теплонапряженность деталей камеры сгорания уменьшается при подаче воды в цилиндры двигателя, особенно при подаче с воздухом.

Добавка воды с ВТЭ без дополнительной регулировки ТНВД приводит к снижению максимальной мощности, а при подаче 100% воды – к прекращению нормальной работы двигателя.

наук. – М., 1987. – 272 с.

2. Савельев Г.С. Выбор технологии конвертации тракторных дизелей при работе на компримированном природном газе // Инновационные технологии и техника нового поколения – основа модернизации

## Литература

1. Конев А.Ф. Использование добавок воды и бензина на впуске тракторных двигателей в условиях жаркого климата: Дисс. ... канд. техн.

сельского хозяйства: Сб. науч. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. – М.: ВИМ, 2011. – С. 105-109.

3. Андрощук В.С. Совершенствование технологии безразборной очистки от нагара деталей цилиндра-поршневой группы путем подачи воды на впуске в цилиндры дизеля: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб.: С.-Петербург. гос. аграр. ун-т, 1996. – 17 с.

4. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.

5. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Ка-

менецкий Д.А. Окисление азота при горении. – М.: АН СССР, 1947. – 147 с.

6. Сапьян Ю.Н., Колос В.А., Кабакова В.Н. Проблемы использования оксигенатов как компонентов моторных топлив // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: Сб. науч. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. – М.: ВИМ, 2013. – С. 144-148.

7. Бижаяев А.В. Исследование методов добавок воды в топливо в поршневой двигатель внутреннего сгорания // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2015. – № 1. – С. 16-19.

## EXPERIMENTAL RESULTS OF WATER ADDITIVES IN DIESEL ENGINE COMBUSTION CHAMBER

A.V. Bizhaev, S.N. Devyanin

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya St., 49, Moscow, 127550, Russian Federation, a.bizhaev@mail.ru

*An agricultural sector has an actual problem. It means toxicity of diesel engines, and also their high heat density. The main toxic components such as nitrogen oxides and firm particles are typical for diesel engines. The water additive in fuel reduces heat density and toxicity of engines. At water supply in the combustion chamber there is a cooling of the charge coming to the cylinder. Indicators of engine operation depend on a way of water supply in the combustion chamber. The authors chose for researches two widespread rational ways of water supply in the cylinder: with air and in the form of a water fuel emulsion. A technique of an experimental study consists in comparison of the chosen ways on ecological safety of an internal-combustion engine, its temperature conditions and registration of a limit amount of water before violation of normal operation of the diesel. The authors analysed characteristics of the diesel engine on toxicity of exhaust gases, engine efficiency and temperature condition depending on a way of water supply in cylinders. They carried out tests on load characteristics with a nominal frequency of rotation of a cranked shaft of the diesel that corresponds to power at agricultural operations on a tractor or a harvester. Water supply of 70 percent with air reduces temperature of a piston crown fire surface by 27 percent at average values of the power of 11-13 kW. But at low and maximum loadings this decrease makes about 20 percent. At water supply with a water fuel emulsion this effect is less and on low loadings makes about 5 percent, and at the power of 12-14 kW it reaches 20 percent.*

**Keywords:** Internal combustion engine; Exhaust gases; Water fuel emulsion; Water additive in an engine; Nitrogen oxides.

### References

1. Konev A.F. Ispol'zovanie dobavok vody i benzina na vpuske traktornykh dvigateley v usloviyakh zharkogo klimata [Use of intake additives of water and benzine in tractor engines at hot climate conditions]: Diss. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 1987. 272 pp. (Russian).

2. Savel'ev G.S. Vybora tekhnologii konvertatsii traktornykh dizeley pri rabote na komprimirovannom prirodnom gaze [Choice of tractor diesels converting technology when compressed natural gas operate]. Innovatsionnye tekhnologii i tekhnika novogo pokoleniya – osnova modernizatsii sel'skogo khozyaystva: Sb. nauch. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Ch. 2. M.: VIM, 2011. pp. 105-109 (Russian).

3. Androshchuk V.S. Sovershenstvovanie tekhnologii bezrazbornoy ochistki ot nagara detaley tsilindro-porshnevoy gruppy putem podachi vody na vpuske v tsilindry dizelya [Improvement of technology of in-place cleaning of a deposit of components of cylinder-piston group by intake water supply in diesel cylinders]:

Avto-ref. diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: S.-Peterb. gos. agrar. un-t, 1996. 17 pp. (Russian).

4. Zvonov V.A. Toksichnost' dvigateley vnutrennego sgoraniya [Toxicity of internal combustion engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 160 pp. (Russian).

5. Zel'dovich Ya.B., Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamenetskiy D.A. Okislenie azota pri gorenii [Oxidation of nitrogen when burning]. Moscow: AN SSSR, 1947. 147 pp. (Russian).

6. Sap'yan Yu.N., Kolos V.A., Kabakova V.N. Problemy ispol'zovaniya oksigenatov kak komponentov motornykh topliv [Problems of use of oxygenates as components of motor fuels]. Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii: Sb. nauch. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Ch. 2. Moscow: VIM, 2013. pp. 144-148 (Russian).

7. Bizhaev A.V. Issledovanie metodov dobavok vody v toplivo v porshnevoy dvigatel' vnutrennego sgoraniya [Research of methods of water additives to fuel in conventional engine]. Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii. 2015. No. 1. pp. 16-19 (Russian).