

Результаты лабораторных исследований топливной экономичности дизельного двигателя при работе на водной инжекции

И.И. Сторожев, к.т.н., С.В. Романов, ст. преподаватель, ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья

Современную промышленность и сельское хозяйство невозможно представить без двигателя внутреннего сгорания, который сегодня является основным источником энергии для мобильных технологических средств. Согласно статистическим данным, на июль 2016 г. в Российской Федерации эксплуатировалось около 49,11 млн транспортных средств [1]. Нетрудно посчитать, что если каждый автомобиль экономит хотя бы 1 г топлива, то в целом по стране экономия может составить около 50 т топлива. Очевидно, что и наша атмосфера станет чище на это же количество продуктов сгорания. Таким образом, повышение топливной экономичности машинно-тракторных агрегатов, использующих в качестве энергетической установки дизельный двигатель внутреннего сгорания, является важнейшей народнохозяйственной задачей.

Цель данного исследования – оценка влияния увлажнения свежего заряда путём водной инжекции во впускной коллектор или систему рециркуляции отработавших газов дизельного двигателя Д-240 (трактор МТЗ-80/82) на его топливную экономичность и экологические показатели работы. Присутствие воды в составе свежего заряда приводит к значительной экономии углеводородного топлива и улучшению экологических показателей работы дизельного двигателя внутреннего сгорания.

Материал и методы исследования. Экспериментальное исследование проводили в испытательной лаборатории ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, г. Тюмень. При проведении испытаний проверяли основные теоретические положения, раскрывающие влияние многокомпонентного топлива на повышение эффективной мощности двигателя, улучшение его топливной экономичности и экологической безопасности. Кроме того, были получены недостающие исходные данные для построения математической модели. В основу методики проведения стендового экспериментального исследования были положены методики, соответствующие ГОСТу 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний», и рекомендации [2, 3].

Исследование топливной экономичности тракторного дизеля Д-240 при работе на многокомпонентном топливе (топливо-водной смеси) проводили в три основных этапа.

На первом этапе испытывали дизельный двигатель Д-240 по поиску оптимального состава рабочей смеси (снятие регулировочной характеристики по составу рабочей смеси). В качестве критерия

оптимизации был выбран максимум эффективной мощности двигателя (управляемый фактор – цикловая подача воды). При проведении исследования подача воды осуществлялась двумя способами:

– во впускной коллектор двигателя с калиброванным жиклером;

– в систему рециркуляции отработавших газов.

Подача воды осуществлялась посредством специально разработанного устройства, выполненного на основе карбюратора пускового двигателя К-61.

Результаты исследования. На рисунке 1 показан фрагмент обработки результатов проведённого исследования. Подачу воды осуществляли во впускной коллектор двигателя Д-240 посредством инжектора с калиброванным жиклером.

Регрессионный анализ полученных экспериментальных данных показал, что в границах факторного пространства зависимость эффективной мощности в функции цикловой подачи воды с достаточно высокой степенью доверительной вероятности ($R^2 = 0,99$) может быть выражена полиномиальным трендом третьего порядка:

$$N_e = 52,71 - 0,166 \cdot q_{H_2O} + 0,188 \cdot q_{H_2O}^2 - 0,007 \cdot q_{H_2O}^3, \text{ кВт} \quad (1)$$

где q_{H_2O} – цикловая подача воды, мг/ц.

Исследовав выражение (1) на экстремум, определили оптимальное значение q_{H_2O} :

$$q_{H_2O \text{ опт}} = 17,452 \text{ мг/ц,}$$

эффективная мощность двигателя Д-240 при этом составила

$$N_{e \text{ max}} = 69,87 \text{ кВт.}$$

Установив 5-процентный допуск на полученное значение q_{H_2O} , определили границы оптимальных значений цикловой подачи воды:

$$q_{H_2O \text{ опт}} = 17,452 \pm 0,87 \text{ мг/ц,}$$

$$N_{e \text{ max}} = 69,87 \pm 3,49 \text{ кВт.}$$

На номинальном режиме работы двигателя Д-240 цикловая подача дизельного топлива составила 54 мг/ц. Процентное содержание воды по отношению к дизельному топливу составило около 32%, что достаточно хорошо согласуется с результатами ранее проведённых теоретических исследований [4, 5].

Таким образом, в результате проведённого экспериментального исследования нами установлено, что посредством инжекции воды во впускной коллектор дизельного двигателя Д-240 его эффективная мощность может быть повышена на 10–12 кВт (на 11–19%) и достигает почти 70 кВт при стандартной мощности данного двигателя – 59 кВт. Оптимальная цикловая подача воды на

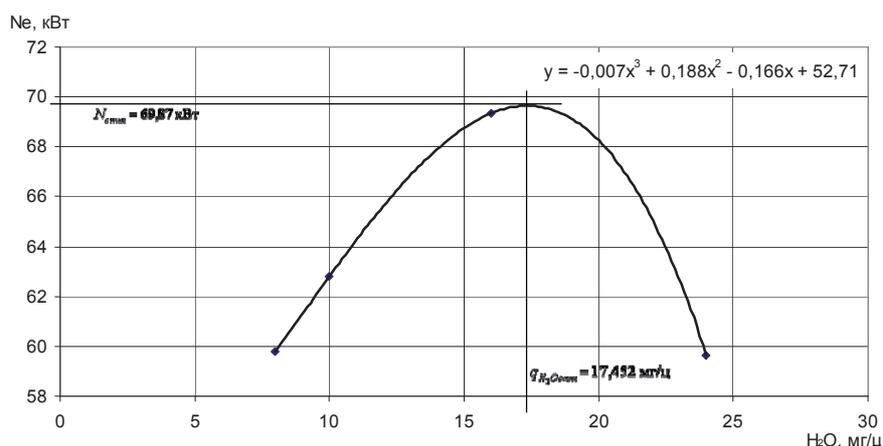


Рис. 1 – Зависимость эффективной мощности дизельного двигателя Д-240 от величины цикловой подачи воды (при инъекции воды во впускной коллектор)

номинальном режиме работы двигателя должна составлять $17,452 \pm 0,87$ мг/ц.

На рисунке 2 представлен фрагмент обработки результатов стендовых испытаний двигателя Д-240 при инъекции воды в систему рециркуляции отработавших газов.

Анализ полученных результатов показал, что зависимость эффективной мощности двигателя Д-240 от величины цикловой подачи воды, подаваемой в систему рециркуляции отработавших газов, может быть выражена полиномиальным трендом второго порядка (степень доверительной вероятности $R^2 = 0,98$):

$$N_e = 46,46 + 0,8515 \cdot q_{H_2O} - 0,0337 \cdot q_{H_2O}^2, \text{ кВт} . \quad (2)$$

Дальнейший анализ рисунка 2 показывает, что при инъекции воды в систему рециркуляции отработавших газов мы наблюдаем обратный эффект. Присутствие воды приводит к снижению эффективной мощности. Полученный отрицательный эффект может быть объяснён тем, что парообразование воды происходит уже во впускном коллекторе двигателя вследствие высокой температуры отработавших газов. Температура отработавших газов двигателя на номинальном режиме находится в пределах $500\text{--}600^\circ\text{C}$. В результате раннее парообразование воды во впускном коллекторе

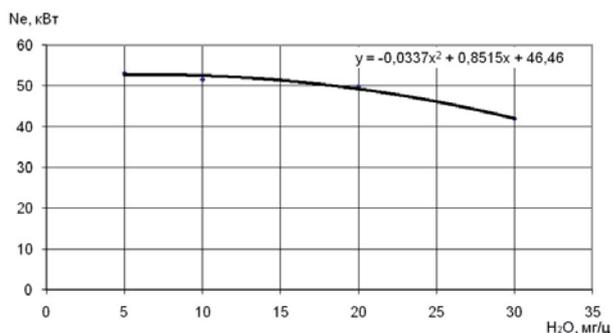


Рис. 2 – Зависимость эффективной мощности двигателя Д-240 от величины цикловой подачи воды (при подаче воды в систему рециркуляции отработавших газов)

двигателя не способствует улучшению наполнения цилиндра и, как следствие, не приводит к повышению индикаторного давления в процессе сгорания дизельного топлива.

На основании изложенного можно заключить, что увеличение эффективной мощности дизельного двигателя Д-240 путём увлажнения свежего заряда нам удалось получить только в случае инъекции воды во впускной коллектор двигателя, при этом процентное содержание воды должно составлять около 30–33% по отношению к дизельному топливу.

На втором этапе исследования осуществлялась оценка топливной экономичности работы двигателя Д-240 путём снятия внешней скоростной характеристики при работе двигателя с регулятором. На данном этапе стендовых испытаний подача воды осуществлялась только во впускной коллектор испытуемого дизеля и соответствовала оптимальной цикловой подаче воды – 32% с учётом погрешности, не превышающей $\pm 5\%$. На рисунке 3 представлены результаты данного этапа исследования.

С целью повышения качества получаемой информации опыты производили с трёх-, пятикратной повторностью в зависимости от сходимости результатов опытов. Предельное расхождение результатов одного опыта устанавливалось в пределах $\pm 5\%$ [6, 7]. Полученную информацию обрабатывали известными методами теории вероятности и математической статистики с использованием пакета прикладных программ Microsoft Excel.

Анализ скоростных характеристик дизельного двигателя Д-240, представленных на рисунке 3, показывает, что при увлажнении свежего заряда во впускном коллекторе эффективные показатели работы двигателя возрастают. В частности, на номинальном режиме работы экспериментального двигателя Д-240 зафиксировано повышение эффективной мощности, достигающее 17–19% (прирост 10–12 кВт) при соответствующем увеличении эффективного крутящего момента с 254–258 Нм до 298–306 Нм (на 17–19%). Отмечено снижение

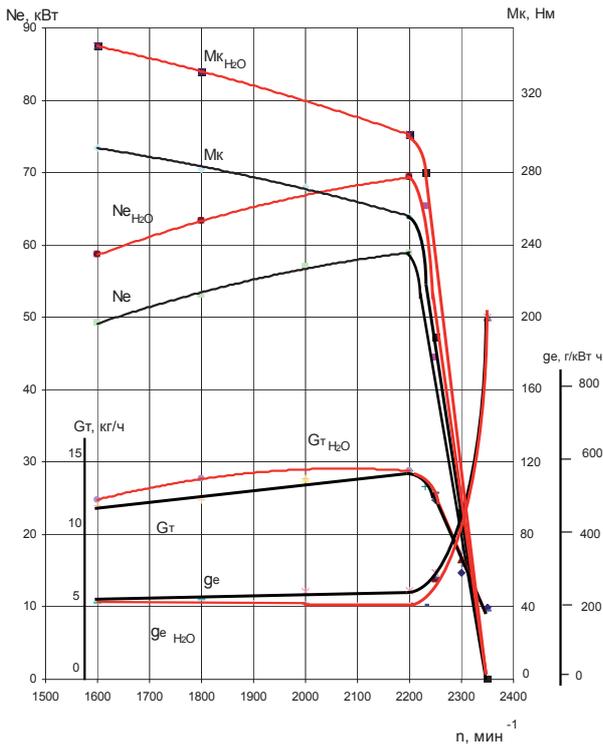


Рис. 3 – Совмещённая внешняя скоростная характеристика дизеля Д-240 при работе с регулятором

удельного эффективного расхода топлива с 240–250 г/кВт·ч до 210–220 г/кВт·ч (на 12–15%).

На третьем, заключительном этапе исследования была произведена оценка влияния водной инъекции на экологические показатели работы двигателя. Результаты исследования представлены на рисунках 4, 5.

В качестве основных оценочных показателей токсичности отработавших газов двигателя на основании анализа литературных источников [8–10] были использованы:

- содержание CO, мг/м³;
- содержание NO_x, мг/м³;
- дымность, %.

В качестве нормативной базы для оценки экологических показателей работы двигателя были использованы требования Euro, нормативные значения которых представлены в таблице.

Анализ полученных данных показал, что увлажнение свежего заряда в целом приводит к снижению содержания вредных веществ в отработавших газах дизельного двигателя. Оба исследованных способа являются достаточно эффективным средством снижения токсичности отработавших газов. Наибольшая эффективность отмечена при снижении содержания окиси углерода (CO). Здесь снижение

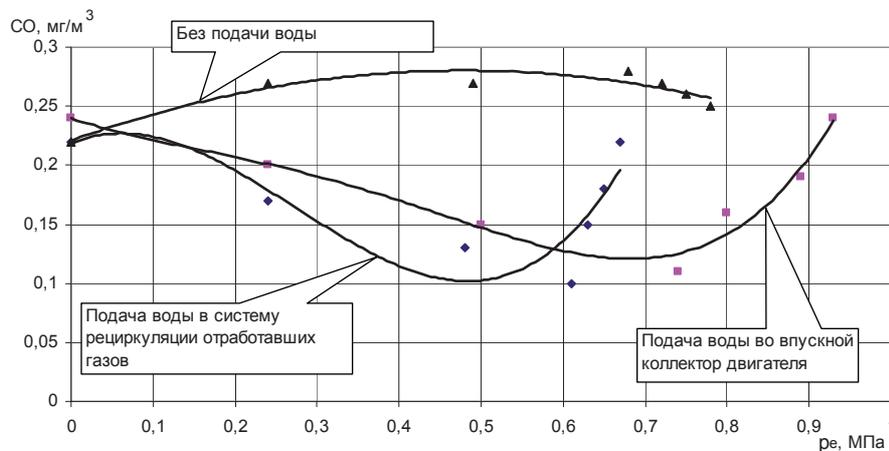


Рис. 4 – Содержание CO в отработавших газах в зависимости от среднего эффективного давления (дизельный двигатель Д-240)

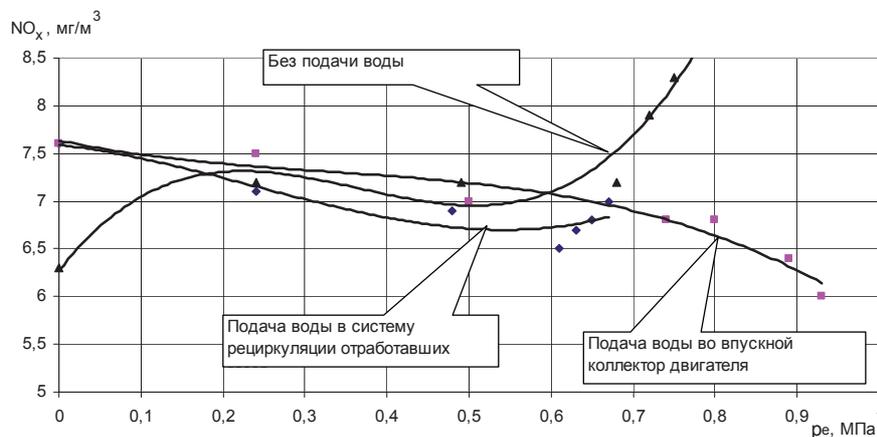


Рис. 5 – Содержание NO_x в отработавших газах в зависимости от среднего эффективного давления (дизельный двигатель Д-240)

Требования Евро к экологическим показателям автотракторных двигателей

Правила ЕЭС	Год введения	Содержание вредных веществ в отработавших газах двигателя, мг/м ³			
		NO _x	CO	СН	твёрдые частицы
Евро 3	2000	5,00	2,00	0,60	0,10
Евро 4	2005	3,50	1,80	0,50	0,09
Евро 5	2009	2,00	1,50	0,25	0,02
Евро 6	2015	0,40	1,50	0,13	0,01

может быть достигнуто на 40–60%. С оксидами азота (NO_x) наблюдается достаточно противоречивая ситуация. В частности, на режиме холостого хода применение водной инжекции даже способствует увеличению NO_x, однако с ростом нагрузки ситуация меняется и содержание NO_x убывает. Данное обстоятельство может быть объяснено различной температурой отработавших газов. Так, на режиме холостого хода температура отработавших газов достаточно низкая, а водная инжекция ещё и способствует её снижению, поэтому содержание NO_x возрастает. С ростом нагрузки температура отработавших газов возрастает и содержание NO_x убывает.

Вывод. Применение водной инжекции приводит к увеличению эффективной мощности дизельного двигателя, повышению его топливной экономичности и снижению содержания вредных веществ в отработавших газах.

Литература

1. Посчитано, сколько всего автомобилей в России по состоянию на июль 2016 года [Электронный ресурс]. URL:// <http://www.prav-net.ru/5669-ira/>.
2. ГОСТ Р 41.96-2005 (Правила ЕЭК ООН № 96) – Единые предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенные для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной технике, в отношении выброса вредных веществ этими двигателями [Электронный ресурс]. URL:// <http://docs.cntd.ru/document/1200042292>.
3. ГОСТ Р 41.24-2003 (Правила ЕЭК ООН № 96) – Единые предписания, касающиеся: I. Сертификации двигателей с воспламенением от сжатия в отношении дымности; II. Сертификации транспортных средств в отношении установки на них двигателей с воспламенением от сжатия, сертифицированных по типу конструкции; III. Сертификации автотранспортных средств с двигателями с воспламенением от сжатия в отношении дымности; IV. Измерение мощности двигателей. [Электронный ресурс]. URL:// <http://docs.cntd.ru/document/1200034424>.
4. Быстров О.И. Повышение экономических и экологических показателей дизеля путём реализации комбинированного шеститактного цикла: дисс. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2008. 157 с.
5. Сторожев И.И. Повышение топливной экономичности тракторного агрегата на базе тракторов МТЗ-80/82 путём добавления воды в систему питания воздухом: дисс. ... канд. техн. наук. (05.20.01). Челябинск, 2009. 157 с.
6. ГОСТ 18509-88 Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний [Электронный ресурс]. URL:// <http://docs.cntd.ru/document/1200010002>.
7. ГОСТ 20000-88 (СТ СЭВ 1006-78) Дизели тракторные и комбайновые. Общие технические условия [Электронный ресурс]. URL:// <http://docs.cntd.ru/document/1200009867>.
8. Максимейко Ю.Г. Мельберг А.А., Медведев Г.В. Снижение вредных выбросов в период предпусковой подготовки двигателей // Проблемы экологической безопасности: матер. конф., 27 ноября 2014 г. Рубцовск, 2014. 18 с.
9. Медведев Г.В. Совершенствование очистки вредных выбросов дизелей в композитных материалах, содержащих никель / Г.В. Медведев, А.А. Мельберг, А.А. Новоселов [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 1. С. 207–210.
10. Хасанова М.Л. Универсальные показатели снижения токсичности отработавших газов дизеля с помощью утилизационной системы // Достижение науки – агропромышленному производству: матер. LIV междунар. науч.-технич. конф. / Под ред. П.Г. Свечникова. Челябинск, 2015. С. 207–212.