

УДК 621.43

*А.П. Марченко, д-р техн. наук, А.А. Прохоренко, канд. техн. наук, А.А. Осетров, асп.,  
В. Смайлис, д-р техн. наук, В. Сенчила, канд. техн. наук*

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ В ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

### Введение

Истощение мировых запасов нефти и ухудшение экологии окружающей среды являются причиной повышенного интереса к использованию в двигателях альтернативных топлив (АТ). В Украине, не имеющей сколько-нибудь значительных запасов нефти, но обладающей большими площадями пахотных земель, целесообразно использовать АТ растительного происхождения. Актуальность выполнения работ в данном направлении определена в Законах Украины «Об альтернативных видах жидкого и газообразного топлива» и «Об альтернативных источниках энергии», а также Указе президента Украины «О мероприятиях по развитию производства топлива из биологического сырья».

Для дизельных двигателей все большее распространение получают топлива, произведенные на основе растительных масел. Вопросам исследования рабочего процесса дизеля при использовании растительных топлив посвящен ряд работ [1-15]. В большинстве из них предлагается конкретное топливо или топливная смесь. В некоторых работах [2, 3] рассматривается несколько растительных топлив, однако сравнительная оценка эффективности их применения в дизеле, как правило, отсутствует. В данной работе сравниваются дизельное топливо (ДТ), этиловый эфир рапсового масла (ЭЭРМ) и смеси ДТ с рапсовым маслом. В качестве параметров сравнения рассматриваются удельный эффективный расход топлива, эффективный КПД, токсичность отработавших газов (ОГ) и надежность дизеля.

### Основные способы использования топлив растительного происхождения в дизельном двигателе

Интерес к использованию топлив на основе растительных масел связан с их преимуществами перед нефтяными топливами, к которым можно отнести:

- воспроизводимость в природе;
- сохранение баланса углекислого газа в атмосфере: в окружающую среду при сгорании выбрасывается то количество  $\text{CO}_2$ , которое было поглощено растениями в процессе фотосинтеза;
- растительные остатки и продукты переработки семян являются сырьем для производства кормов для животных и удобрений;
- при попадании на землю такое топливо не наносит экологического ущерба;
- растительное масло является относительно пожаробезопасным из-за высокой температуры вспышки [1];

В некоторых работах [1, 3] к числу преимуществ растительных топлив относят также меньшие

выбросы вредных веществ с отработавшими газами дизелей при их использовании.

Для производства растительных топлив применяются рапсовое, соевое, подсолнечное, и другие масла. Эти вещества можно использовать в дизельном двигателе и в чистом виде [1]. Однако, при работе дизеля традиционной конструкции на чистом растительном масле в процессе эксплуатации двигателя возникает ряд проблем, связанных со значительным отличием физико-химических свойств растительных масел от свойств стандартного дизельного топлива (например, рапсовое масло имеет на 14 % меньше, чем у ДТ теплотворную способность, на 10 % большую плотность и в 22 раза большую вязкость [4]). К таким проблемам относятся углеродистые отложения на поверхностях деталей камеры сгорания, закоксовывание отверстий распылителя, жировые отложения в топливных фильтрах и баке, каналах топливной аппаратуры и др. [3, 5, 6].

Поэтому для использования в дизелях растительного масла необходимо применять следующие мероприятия [2]:

- приспособление конструкции двигателя к работе на растительном масле;
- добавку в масло веществ, приближающих его физико-химические свойства к свойствам дизельного топлива;
- химическую переработку растительного масла в менее вязкие вещества (эфирные масла);
- использование добавки масла и других веществ в ДТ в количестве, которое незначительно изменяет свойства последнего.

Наибольшее распространение получили два последних способа. Этиловые или метиловые эфиры жирных кислот растительных масел (ЭЭРМ и МЭРМ соответственно) получают в результате реакции этерификации, т.е. взаимодействия спирта и растительного масла в присутствии катализатора. Побочным продуктом реакции является глицерин. ЭЭРМ и МЭРМ имеют близкие к ДТ физико-химические свойства и поэтому могут использоваться в дизеле практически без конструктивных его изменений [1-5].

Широкое распространение получили работы, связанные с испытаниями дизелей на смесях растительных масел или их производных с дизельным топливом. Так, например, в Германии проведены испытания дизелей, работающих на смеси, которая состоит из 40% РМ, 40% ДТ, 19% воды и эмульгатора (1%) [6], в Турции - на смеси из 20% использованного подсолнечного масла и 80% ДТ [7]. В России испытывались дизели, работающие на смеси, получившей название «биодиз» - 75% РМ и 25% ДТ [8]. В

Китае исследовалась работа дизеля на смеси 70%ДТ и 30%РМ [9]. В Украине в Национальном техническом университете «ХПИ» исследовались смесевые топлива различного процентного состава, включающие РМ, ДТ и ЭЭРМ [4, 10]. Известен ряд и других работ в этом направлении.

По результатам исследований, выполненных в этих работах, можно сделать следующие выводы:

1. При использовании растительных топлив, как правило, происходит увеличение массового расхода топлива по сравнению с дизельным топливом. Объемный расход топлива либо не изменяется, либо незначительно увеличивается.

2. Между выбросами оксидов азота  $NO_x$ , несгоревших углеводородов  $C_nH_m$ , монооксида углерода СО и видом топлива нет однозначной корреляции. В зависимости от конструкции и режима работы дизеля выбросы этих веществ при переходе на растительные топлива могут либо увеличиваться, либо уменьшаться.

3. Дымность и выбросы твердых частиц (ТЧ) практически во всех случаях использования растительных топлив снижаются.

4. Использование смесевых топлив наиболее эффективно в дизелях с пленочным и объемно-пленочным смесеобразованием, а также в двигателях, оснащенных предкамерой.

5. Надежная работа дизеля возможна при условии регламентных работ по регулировке форсунок,

периодической замене масляных и топливных фильтров и промывке топливных баков.

Из проведенного обзора литературных источников трудно выделить наиболее подходящее для применения в дизеле растительное топливо. Очевидно, что для разных типов двигателей с различной организацией рабочего процесса рациональным является применение топлив, обладающих определенными физико-химическими свойствами. Поэтому для конкретного типа двигателя необходимо проводить исследования, направленные на выявление наиболее рационального вида топлива.

#### Предварительные исследования

В сертификационной лаборатории ОАО ГСКБД были проведены испытания дизеля 4ЧН 12/14 (СМД-23) на ДТ, ЭЭРМ и смесях ДТ с объемным содержанием РМ 25, 50 и 75% [4, 10]. Номинальная мощность двигателя 125 кВт при частоте вращения коленчатого вала  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ . Поршни дизеля имеют цилиндрическую камеру сгорания, в которой реализовано объемно-пленочное смесеобразование. Испытания двигателя проводились без изменения его конструктивных и регулировочных параметров. Показатели рабочего процесса и токсичности дизеля на режимах нагрузочных характеристик с частотами вращения коленчатого вала, соответствующими номинальной мощности  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$  и максимальному крутящему моменту  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  приведены на рис. 1 и 2.

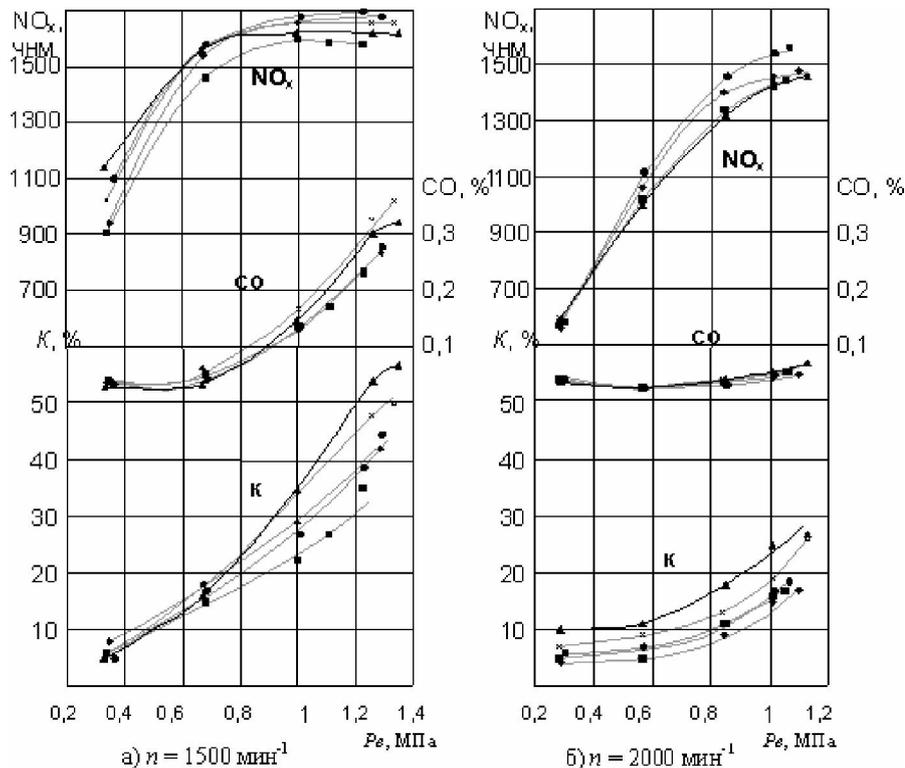


Рис. 1. Влияние нагрузки на показатели токсичности ОГ дизеля 4 ЧН 12/14:  $\blacktriangle$  - ДТ;  $\blacksquare$  - ЭЭРМ; смеси с содержанием РМ в ДТ-  $\times$  - 25%;  $\bullet$  - 50%;  $\blacklozenge$  - 75%

Из рис.1 видно, что при использовании растительных топлив на режимах высоких нагрузок, как правило, увеличивается выброс  $\text{NO}_x$  и уменьшается содержание  $\text{CO}$  и сажи в отработавших газах дизеля. В работе [3] показано, что основной причиной такой тенденции является увеличение скорости диффузионного сгорания растительных топлив. Кроме того,

на указанных режимах высокая температура стенки камеры сгорания обеспечивает высокое качество пленочного смесеобразования для растительных топлив. Интенсификация сгорания также приводит к увеличению индикаторного и эффективного КПД дизеля при использовании смесей РМ с ДТ.

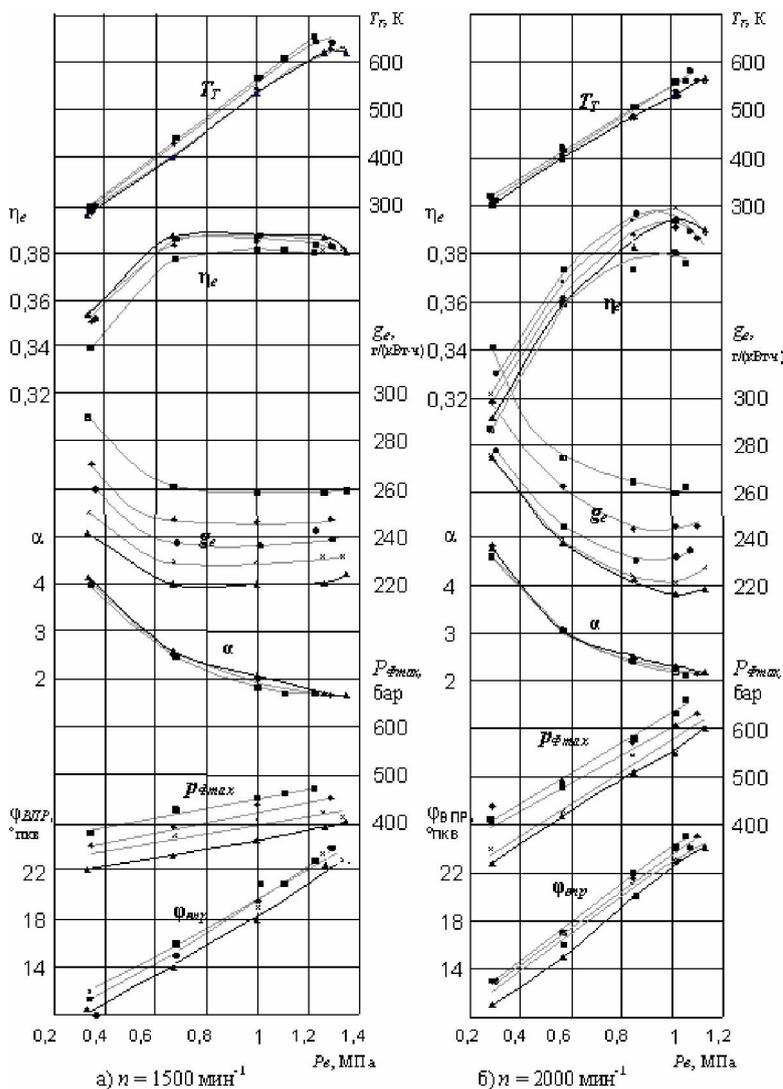


Рис. 2. Влияние нагрузки на показатели рабочего процесса ОГ дизеля 4 ЧН 12/14: ▲ - ДТ; ■ - ЭЭРМ; смеси с содержанием РМ в ДТ- × - 25%; ● - 50%; ◆ - 75%

На режимах с низкими нагрузками при сгорании растительных топлив значительно ухудшается смесеобразование в объеме КС, а также увеличивается количество топлива, попадающего в относительно холодные пристеночные зоны [4]. Это приводит к снижению эффективного КПД. Выход продуктов неполного сгорания при использовании дизельного и растительных топлив на большинстве режимов сопоставим, а выбросы оксидов азота при использовании растительных топлив снижаются по сравнению с ДТ.

Как видно из анализа, противоречивый характер изменения показателей экономичности и токсич-

ности на различных режимах не дает возможность однозначно оценить эффективность применения в дизеле того или иного топлива. Очевидно, требуется комплексная количественная оценка. Для такой оценки, необходим анализ показателей дизеля по испытательным циклам.

**Оценка эффективности применения в дизеле растительных топлив по испытательным циклам**

Выбор наиболее рационального топлива для данного типа двигателя определяется экономичностью, экологичностью и надежностью его работы. Средний эксплуатационный удельный эффективный расход топлива  $g_{e\text{ ср.э}}$  характеризует экономичность

двигателя и затраты на топливо в процессе эксплуатации [11]. Однако, хотя  $g_{e\text{ cp.э}}$  и является критерием экономичности двигателя, он не может характеризовать качество рабочего процесса при использовании растительных топлив. Эти топлива имеют меньшую теплоту сгорания  $Q_n$  [4], что естественно приводит к увеличению расхода топлива при том же качестве сгорания. Поэтому критерием экономичности, кроме  $g_{e\text{ cp.э}}$ , выбран средний эксплуатационный эффективный КПД  $\eta_{e\text{ cp.э}}$ , который одновременно учитывает и расход топлива и низшую теплоту его сгорания:

$$\eta_{e\text{ cp.э}} = \frac{3600}{Q_n \cdot g_{e\text{ cp.э}}} \quad (1)$$

Основными вредными компонентами отработавших газов дизеля являются оксиды азота и твердые частицы (сажа). Вклад этих веществ в общее вредное воздействие отработавших газов (ОГ) составляет более 95% [12]. Выше показано, что дымность и выбросы ТЧ с ОГ при использовании растительных топлив значительно снижаются по сравнению с ДТ. Основную проблему, очевидно, представляют оксиды азота, выбросы которых во многих случаях увеличиваются [1, 2, 4, 5, 10]. Поэтому в качестве критерия токсичности ОГ принят удельный выброс оксидов азота с ОГ дизеля.

Для исследования влияния топливных свойств на надежность двигателя необходимо проведение длительных дороговых испытаний. Поэтому в данной работе надежность двигателя учитывалась опосредованно, по данным обзора литературных источников.

Экономичность, токсичность ОГ и надежность дизеля зависят от его назначения. Например, автомобильный дизель работает в ином диапазоне нагрузок и частот вращения, чем тракторный или комбайновый дизель [11]. Соответственно и эффективность использования альтернативных топлив в этих видах двигателей различается. Поэтому сравнительная оценка эффективности применения топлив производилась по различным испытательным циклам, учитывающим вероятность работы дизеля в том или ином скоростном и нагрузочном режиме. Для оценки параметров автомобильного дизеля был принят 13-режимный цикл ЕСЕ правил № 49 ЕЭК ООН. Показатели комбайнового, тракторного (отдельно гусеничного и колесного) дизелей оценивались по 8-режимным циклам, предложенным в работе [11]. Выбор данных испытательных циклов предопределился методикой проведенных ранее испытаний.

Показатели токсичности определялись по стандартной методике. Средний эксплуатационный удельный эффективный расход топлива рассчитывался по формуле [11]:

$$g_{e\text{ cp.э}} = \frac{\sum_{i=1}^z G_{Ti} W_i}{\sum_{i=1}^z N_{ei} W_i} \quad (2)$$

где  $G_{Ti}$  - часовой расход топлива на  $i$ -м фиксированном режиме;

$W_i$  - коэффициент значимости  $i$ -го фиксированного режима;

$z$  - количество фиксированных режимов.

По определенным  $g_{e\text{ cp.э}}$  и низшей теплоте сгорания топлив  $Q_n$  находили средний эксплуатационный эффективный КПД (формула (1)).

Результаты расчетов  $g_{e\text{ cp.э}}$ ,  $\eta_{e\text{ cp.э}}$  и  $e_{\text{NOx}}$  в абсолютных и относительных единицах приведены на рис. 3-4.

Из рис.3. видно, что с увеличением доли растительного масла в дизельном топливе, а также для ЭЭРМ происходит увеличение  $g_{e\text{ cp.э}}$ . Наибольший рост расхода растительного топлива наблюдается при оценке по автомобильному и комбайновому циклам, наименьший - по циклам колесного и гусеничного трактора.

При анализе среднего эксплуатационного эффективного КПД дизеля (рис. 3), можно отметить следующее. Максимальный  $\eta_{e\text{ cp.э}}$  получается при работе дизеля на смеси с содержанием РМ 25%. При дальнейшем увеличении доли РМ в ДТ, а также для ЭЭРМ  $\eta_{e\text{ cp.э}}$  снижается.

Для каждого вида растительного топлива можно определить тип двигателя, в котором оно наиболее эффективно (по максимальному  $\eta_{e\text{ cp.э}}$ ) используется. Все смесевые топлива рационально использовать в тракторных двигателях, ЭЭРМ - в автомобильном.

Из рис.4 видно, что увеличение доли РМ в ДТ до 50%, приводит к росту выбросов  $\text{NO}_x$ . При дальнейшем увеличении содержания РМ в ДТ, а также для ЭЭРМ удельный выброс оксидов азота снижается. Наименьшие выбросы  $\text{NO}_x$  получаются для всех растительных топлив при работе дизеля по автомобильному циклу, наибольшие - по циклу колесного трактора.

Таким образом, можно отметить, что наибольшие значения  $\eta_{e\text{ cp.э}}$  при минимальном (до 4%) увеличении выбросов  $\text{NO}_x$  достигаются при использовании в дизеле смеси с содержанием РМ 25%. Дальнейшее увеличение содержания РМ в ДТ приводит либо к увеличению выбросов  $\text{NO}_x$  (смесь 50%РМ и 50%ДТ), либо к снижению эффективного КПД (смесь 75% РМ и 25% ДТ).

В пользу выбора смесевых топлив с минимальным содержанием РМ для дизелей традиционной конструкции также можно отметить следующее. Одной из причин нагарообразования при использовании смесевых топлив является глицерин, содержащийся в связанном виде в растительном масле [13]. Увеличение процентного содержания в топливе растительного масла приводит к увеличению вероятности нагарообразования, а значит снижению надежности дизеля.

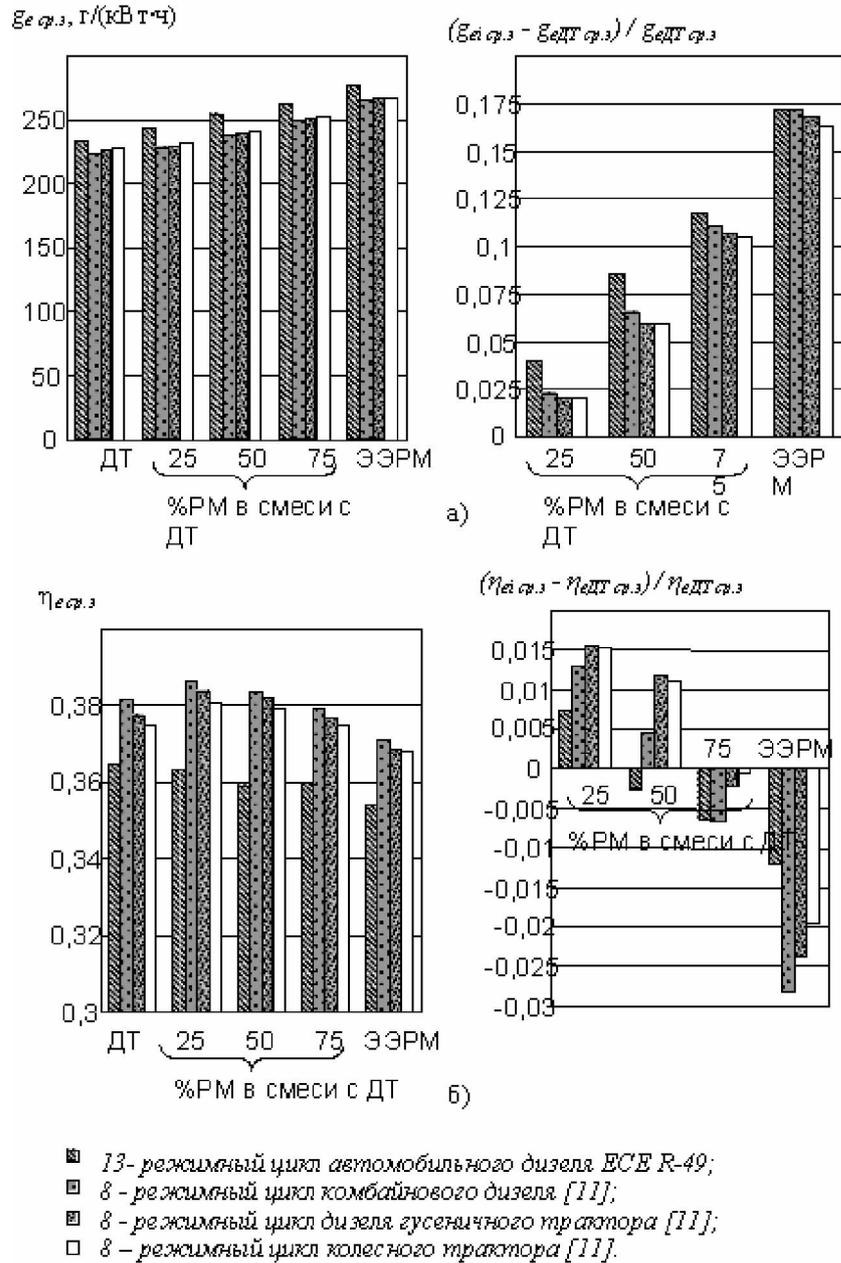


Рис. 3. Влияние вида растительного топлива на средний эксплуатационный удельный эффективный расход топлива (а) и на средний эксплуатационный эффективный КПД (б) дизеля, определенные по различным испытательным циклам.

С точки зрения надежности ЭЭРМ является хорошим топливом, поскольку в результате реакции этерификации при получении ЭЭРМ из масла и этанола в качестве побочного продукта образуется глицерин и содержание его в ЭЭРМ не превышает десятых долей процента.

В целом, анализ гистограмм (рис. 3, 4) показывает перспективность использования всех рассмотренных топлив. Относительное изменение  $\eta_{e\text{ ср.з.}}$  при использовании смесей РМ с ДТ не превышает 2%, ЭЭРМ – 3%, изменение выбросов  $\text{NO}_x$  находится в

пределах 10%. При организации мероприятий по снижению выбросов  $\text{NO}_x$  и увеличению надежности двигателя все эти топлива можно эффективно использовать в дизеле.

Следующий этап данной работы – выполнение расчетного исследования и оптимизационных работ по регулировке дизеля, работающего на различных растительных топливах.

**Выводы**

1. В качестве критериев эффективности использования растительных топлив предложены средний

эксплуатационный удельный эффективный расход топлива, средний эксплуатационный эффективный КПД и выбросы оксидов азота, определяемые по испытательным циклам для конкретного типа двигателей.

2. Среди смесевых топлив наибольшая эффективность рабочего процесса дизеля 4 ЧН 12/14 достигается при использовании смеси с содержанием РМ в ДТ 25%.

3. Применение ЭЭРМ позволяет значительно (до 7%) снизить выбросы  $\text{NO}_x$ , однако при этом сни-

жается эффективный КПД дизеля (до 3%). Более эффективно использование смесей ЭЭРМ с ДТ.

4. Применение смесевых топлив более эффективно в тракторных дизелях, ЭЭРМ - в автомобильном дизеле.

5. Средний эксплуатационный эффективный КПД при использовании всех рассмотренных топлив изменяется незначительно (до 3%), что говорит о высокой эффективности их использования. Однако при этом необходимы мероприятия по снижению выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ.

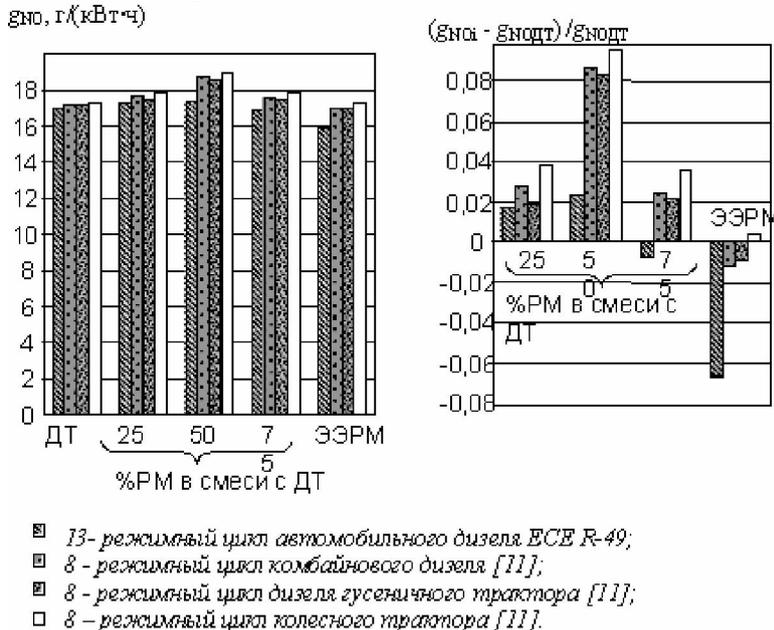


Рис. 4. Влияние вида растительного топлива на удельный выброс  $\text{NO}_x$  с ОГ дизеля, оцененный по различным испытательным циклам.

### Список литературы:

1. Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания.- М.: МАДИ(ТУ), 2000. – 311 с. 2. Редзюк А.М., Рубцов В.О., Гутаревич Ю.Ф. Проблемы та перспективи використання рослинної олії як моторного палива // Автошляховик. - 1999. - №1. - С 4-6. 3. Крайнюк А.И., Васильев И.П., Петренко А.Е., Корчанова Ю.А. Применение растительного масла в дизелях в качестве добавки к топливу // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2001. - № 6. – С. 16-20. 4. Марченко А.П., Минак А.Ф., Слабун И.А., Осетров А.А., Линьков О.Ю., Марков К.В., Аскрепов Д.Н. Результаты исследований рабочего процесса и токсичности дизеля, работающего на топливах растительного происхождения // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. - № 2. – С. 33-40. 5. Makareviciene V., Yanulis P. Environmental effect of rapeseed oil ethil ester // Renewable Energy 28 (2003). P. 2395 – 2403. 6. Winkler H. Raps – der nachwachsende Energieträger // ČLB: Chem. Lab. Und Biotechn. – 1992. – 43, № 7. – S. 378-380. 7. Özactaş Turgut. Compression ignition engine fuel properties of a

used sunflower oil – diesel fuel blend // Energy Sources. - 2000. – 22, №4. - P. 377-382. 8. Огурлиев А.М., Огурлиев З.А. Использование биотоплива в сельскохозяйственной энергетике // МЭСХ. - 2001. - № 2. - С. 22-24. 9. He Y., Bao Y. D. Study on rapeseed oil as athernative fuel for a single-cylinder diesel engine // Renewable Energy 28 (2003). P. 1447 – 1453. 10. Токсичность отработавших газов дизеля при использовании топлив растительного происхождения / Марченко А.П., Строчков А.П., Минак А.Ф., Осетров А.А., Линьков О.Ю. // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. - № 1. – С. 22-25. 11. Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с. 12. Прохоренко А.А. Оценка резервов улучшения экологических показателей автомобильного дизеля на основе выбора рациональных параметров рабочего процесса.- Дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук. – 1998. – 155 с. 13. Котельников Б.П., Погромская В.А. Разработка и испытание метиловых эфиров рапсового масла в качестве альтернативного дизельного топлива // Хімічна промисловість України, 2000. № 4. С.73-76.