

Оценка значимости факторов в образовании токсичных компонентов при работе дизеля на биотопливах

© 2025. П. Я. Кантор, к. ф.-м. н., доцент,
С. А. Плотников, д. т. н., профессор,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: Shawl@list.ru

Рассматриваются экологические проблемы, связанные с частичной заменой углеводородного дизельного топлива растительными компонентами и в частности, рапсовым маслом. Проанализированы факторы, приводящие к изменению состава токсичных компонентов отработавших газов при работе дизеля на смешанном топливе: специфические физико-химические особенности рапсового масла и изменение температурного режима работы двигателя. Проведена теоретическая оценка влияния температурного фактора на образование оксидов азота и сажи. Показано, что при температурах, характерных для рабочего цикла дизеля, прямое окисление азота (механизм Зельдовича) практически отсутствует. Предполагается, что основную роль в образовании оксидов азота играет низкотемпературный механизм окисления с участием промежуточных продуктов. Осуществлены стендовые испытания смешанных топлив на автотракторном дизеле Д-245.5S2 производства Минского моторного завода (Республика Беларусь). Приводятся результаты экспериментальных испытаний смешанных топлив, содержащих до 55% рапсового масла. В большинстве случаев увеличение содержания рапсового масла приводило к снижению концентрации оксидов азота в отработавших газах; в некоторых режимах обнаруживалось уменьшение концентрации более чем в 2 раза. Дымность отработавших газов, обусловленная главным образом наличием свободного углерода в виде сажи, также обнаружила выраженную тенденцию к снижению при увеличении содержания рапсового масла в смешанном топливе.

Ключевые слова: дизель, биотопливо, рапсовое масло, стендовые испытания, нагрузка, частота вращения, оксиды азота, сажа.

Assessing the significance of factors in the toxic components forming during diesel engine operation on biofuels

© 2025. P. Ya. Kantor ORCID: 0000-0002-3033-6512
S. A. Plotnikov ORCID: 0000-0002-8887-4591
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: Shawl@list.ru

The article considers environmental problems associated with partial replacement of hydrocarbon diesel fuel with plant components, in particular, rapeseed oil. We analyze factors that change the toxic component composition in exhaust gases when a diesel engine operates on mixed fuel, in particular, specific physicochemical properties of rapeseed oil and changes in the temperature conditions of the engine. Theoretical assessment of the temperature effect on the nitrogen oxides (NO_x) and soot forming is carried out. It is shown that direct nitrogen oxidation (Zeldovich mechanism) is practically absent at temperatures typical for the diesel engine working cycle. We assumed that the low-temperature oxidation mechanism with the participation of intermediate products (refined Fenimore mechanism) plays the main role in the NO_x forming. Bench tests of mixed fuels were carried out on a D-245.5S2 tractor diesel engine produced by the Minsk Motor Plant (Republic of Belarus). Three series of results were obtained: adjustment, load and speed characteristics. The results of experimental tests of mixed fuels containing up to 55% rapeseed oil are presented. In most cases, the increase in the rapeseed oil content decreases NO_x concentration in the exhaust gases. In some modes, a decrease in NO_x concentration by more than 2 times was detected. The smoke content of the exhaust gases, mainly due to the presence of free carbon in soot form, also showed a pronounced tendency to decrease with increasing rapeseed oil content in the mixed fuel.

Keywords: diesel, biofuels, rapeseed oil, bench tests, load, speed, nitrogen oxides, soot.

Несмотря на ужесточение требований к экологическому классу двигателей внутреннего сгорания, проблема загрязнения окружающей среды продуктами сгорания остаётся актуальной [1]. Постепенное увеличение доли возобновляемых источников энергии является общемировым трендом [2]. Наиболее значительная часть – это биотоплива – продукты этерификации растительных масел и масла как таковые. Другой широко используемой добавкой является этанол. Очевидно, что по мере истощения ископаемых ресурсов в будущем топливо, полученное из растительных источников, займёт доминирующее положение. На сегодняшний день цены дизельного топлива и рапсового масла сопоставимы. Однако в долгосрочной перспективе следует ожидать увеличения стоимости ископаемых углеводородов в связи с возрастанием сложности их добычи, тогда как при отработанной технологии производства рапса объективных оснований для роста его стоимости нет. В данной работе мы исследуем смесовое топливо, состоящее из дизельного топлива (ДТ) с добавкой рапсового масла (РМ) в количестве нескольких десятков процентов.

Здесь, однако, возникают новые проблемы. Среди них следует отметить чисто технические проблемы, связанные с перенастройкой двигателя, а также экологические проблемы, обусловленные изменением состава отработавших газов. Они, в свою очередь, порождаются двумя причинами: изменением доминирующих химических реакций в процессе горения смесового топлива и, как следствие, возникновением новых продуктов сгорания, а также изменением температурного режима, что приводит к изменению соотношения «традиционных» продуктов горения. В данной работе приводятся результаты исследования экологических последствий замены части дизельного топлива продуктами растительного происхождения и их обобщение. Работа выполнена в рамках проводимых в Вятском государственном университете исследований по оптимизации работы дизеля при использовании альтернативных видов топлива [3–6].

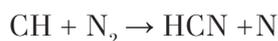
Достоверных данных о составе выброса при работе дизеля на смесовом топливе сравнительно немного [7, 8]. Имеющиеся в литературе данные о влиянии добавок на состав выброса несколько противоречивы и малонадёжны. В частности, представляется неоправданным упоминание в работе [9] термической теории Я. Б. Зельдовича в качестве

общепринятой. Поскольку на сегодняшний день считается достоверным, что термический механизм образования оксидов азота доминирует при температурах порядка 4000 К и выше, значительно превышающих максимальную температуру в цикле дизельного двигателя. В работе [8] отмечается возрастание оксидов азота в отработавших газах на 8% при работе на биотопливе.

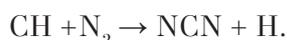
Известно, что процессу горения при работе на обычном дизельном топливе предшествует испарение углеводородов из капель аэрозоля, диаметр которых обычно составляет 15–70 мкм [10]. Рапсовое масло представляет собой смесь триглицеридов, в состав молекул которых входят три углеродные цепи жирных кислот. Его молекулярная масса более чем в 3 раза превышает среднюю массу молекул дизельного топлива, чем обусловлена повышенная вязкость растительных масел. Анализ, представленный в работе [3], показал, что в составе имеющихся в нашем распоряжении образцов рапсового масла доминируют следующие жирные кислоты: олеиновая (64–90%), линолевая (8–20%), линоленовая (8–10%) и пальмитиновая (1–5%). Их молекулы содержат от 16 до 18 атомов углерода. В отличие от молекул углеводородов, составляющих основу ДТ, молекулы жирных кислот обладают дипольным моментом. Поскольку прочность молекулы глицерина невелика (разложение активно происходит уже при $t=570$ К), можно предположить, что испарению предшествует термодеструкция молекулы. При температурах порядка 800 К, характерных для момента впрыскивания топлива в цилиндр, молекула масла разлагается на три фрагмента (жирные кислоты), после чего происходит их испарение и окисление. Теплота сгорания растительных масел и дизельного топлива мало различаются, тогда как теплота парообразования жирных кислот по сравнению с ДТ значительно выше. Это обстоятельство позволяет однозначно констатировать, что при использовании смесового топлива средняя и максимальная температура цикла будут ниже. С другой стороны, наличие атомов кислорода в молекулах жирных кислот должно приводить к лучшему окислению топливной смеси. Видно, что однозначных прогнозов относительно изменения концентрации выбросов при добавлении масла в топливо сделать невозможно. Требуется экспериментальная проверка.

Одними из наиболее вредных считаются выбросы оксидов азота [11–13]. На сегодняшний день считается доказанным, что

при температурах, характерных для цикла дизеля, «классический» механизм окисления азота [14] будет давать содержание оксидов азота в несколько раз меньшее наблюдаемого. Предполагается, что основной вклад в их образование при работе дизеля вносит так называемый «быстрый» или низкотемпературный механизм Фенимора [15]. Предполагается, что реакции окисления азота предшествует образование промежуточного продукта, образующегося в результате реакции молекулы азота с фрагментом органической молекулы. С теоретической точки зрения низкотемпературный процесс окисления азота был исследован в работе [16]. В частности, было показано, что основная реакция в механизме Фенимора:



не может служить основной причиной образования оксида азота, поскольку является спин-запрещённой. Показано также, что низкотемпературное окисление азота должно происходить в основном через посредство промежуточной спин-разрешённой реакции:



Для указанной реакции была рассчитана константа скорости (в обозначениях работы [16]):

$$k^3 = 2,22 \cdot 10^7 \cdot T^{1,48} \exp(-11760/T) \text{ см}^3 \text{ (ммол}\cdot\text{с)} \quad (1)$$

Видно, что с уменьшением температуры T , вследствие экспоненциальной зависимости, скорость образования соединений азота должна резко уменьшаться.

Наличие углерода в отработавших газах, по-видимому, представляет меньшую опасность для окружающей среды, чем оксиды азота, но в любом случае нежелательно, поскольку означает, с одной стороны, снижение КПД двигателя вследствие неполного сгорания топлива и, с другой стороны, осаждение копоти на окружающих объектах. Здесь результат добавления РМ в топливо не столь очевиден и не столь однозначен.

Так, согласно данным работы [17], максимальная концентрация сажи имеет место при среднемассовой температуре газов в цилиндре около 1700 К. Имея в виду, что характерная температура в процессе сгорания топлива

составляет 2600–2800 К, можно ожидать возрастания дымности при понижении температуры. С другой стороны, на процесс образования сажи оказывают влияние другие факторы, приводящие к обратному эффекту. Установлено [17], что концентрация сажи в отработавших газах находится в прямой зависимости от размера распыляемых форсункой капель топлива. В свою очередь, размер капель зависит также прямым образом от коэффициента поверхностного натяжения топливной смеси, который в зависимости от содержания рапсового масла в топливной смеси возрастает на 5–12% [18]. Таким образом, указанный фактор должен приводить к увеличению дымности отработавших газов. С другой стороны, молекулы жирных кислот менее прочны по сравнению с углеводородами, и стадия диссоциации на более мелкие фрагменты, предшествующая окислению, должна начинаться при более низких температурах и в более ранний момент времени. Так, в [19] обнаружено, что при термодеструкции рапсового масла выделяются два температурных диапазона: при 360–420 °С происходит предположительно разрушение сложноэфирных связей, а при более высоких температурах расщепляются углеродные цепи жирных кислот. Отмечается также некоторое снижение характерной температуры термодеструкции тяжёлых углеводородов в присутствии рапсового масла. Имея в виду, что окислению углеводородного топлива предшествует расщепление углеводородной цепи на более мелкие фрагменты, можно ожидать более полного сгорания топливной смеси за время соответствующего такта двигателя и уменьшения содержания сажи в выхлопе. К той же тенденции должно приводить вышеупомянутое наличие кислорода в жирных кислотах [20].

Цель исследования – оценка значимости факторов в образовании токсичных компонентов при работе дизеля на биотопливах.

Объекты и методы исследований

Испытания топливных смесей проводились на дизельном двигателе Д 245.5S2, размерностью 4ЧН 11,0/12,5 согласно ГОСТ 18509-88. Содержание рапсового масла в смеси топлива достигало 55% по массе.

Были проведены три серии испытаний.

1. Регулировочные характеристики дизеля снимались при номинальной частоте вращения коленчатого вала $n=1800 \text{ мин}^{-1}=\text{const}$; часовой расход топлива при этом также оста-

вался постоянным: $G_T = \text{const}$. Угол опережения впрыска топлива изменялся в пределах от 10° до 36° до верхней мёртвой точки (ВМТ). Изменение частоты вследствие изменения угла компенсировалось нагрузкой стенда.

2. Нагрузочные характеристики снимались при постоянной частоте $n = 1800 \text{ мин}^{-1} = \text{const}$ и определённом оптимальном угле опережения впрыска $\theta_{\text{впр}} = 18^\circ$. Для варьирования нагрузочного момента изменялась подача топлива от минимального значения до максимально возможного (и наоборот). Стремление дизеля увеличить частоту вращения (вследствие увеличения подачи топлива) компенсировалось увеличением тормозного момента стенда.

3. Для снятия скоростных характеристик дизеля были установлены: угол опережения впрыска $\theta_{\text{впр}} = 18^\circ$, номинальная частота 1800 мин^{-1} и номинальная подача (нагрузка). Рычаг управления подачей топлива фиксировался. Далее менялась величина тормозного момента в меньшую сторону (дизель разбегается), затем в большую (дизель тормозится), и двигатель возвращался к номинальному режиму. Затем величина тормозного момента увеличивалась (дизель тормозится) до разумных пределов и снова снижалась – дизель приходит в исходное состояние.

Состав отработавших газов анализировался газоанализатором MGT 5 (фирма «МАНА Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG», Германия) с типичной относительной погрешностью 5%.

Для измерения дымности использовался дымомер MDO 2 LON (фирма «МАНА Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG», Германия).

Дымность определялась как часть светового потока от источника света, не достигшая приёмника света из-за поглощения, отражения и рассеяния отработавшими газами (главным образом частицами сажи), проходящими через измерительную камеру дымомера, выражалась в процентах.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний приведены на рисунках 1–4. Для построения линии тренда использовались линейная и, в случаях явного отклонения, экспериментальных данных от линейной зависимости – квадратичная аппроксимация. Коэффициент детерминации R^2 во всех случаях был не ниже 0,88.

Согласно регулировочным характеристикам (рис. 1) наблюдается выраженный рост

концентрации оксидов азота при увеличении установочного угла опережения впрыскивания топлива. По-видимому, это связано с тем, что при более раннем впрыскивании топливо сгорает более полным образом, в результате чего возрастает максимальная температура цикла и как следствие – скорость образования оксидов азота. Из данных рисунка 3 (скоростные характеристики) видно, что изменение частоты вращения коленчатого вала почти не влияет на концентрацию NO_x в отработавших газах. Можно предположить, что в такой ситуации более быстрое нарастание температуры в цилиндре в результате увеличения частоты вращения компенсируется уменьшением времени горения топливной смеси.

Из полученных экспериментальных результатов видно, что гипотеза относительно снижения содержания оксидов азота в отработавших газах при работе на смесевом топливе, в основном, подтвердилась. Согласно формуле (1), при снижении характерной температуры с 2820 до 2610 К скорость образования соединений азота должна уменьшаться приблизительно в 1,57 раза и аналогичным образом должно измениться содержание оксидов азота в отработавших газах.

Реальный эффект оказался более значительным. Измерения показали, что при увеличении угла опережения впрыска $\theta_{\text{впр}}$ содержание оксидов азота, как правило, монотонно возрастает. При $\theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ концентрация суммарных оксидов азота NO_x уменьшилась с 2630 ppm при работе на чистом ДТ до 1150 ppm при работе на топливной композиции с содержанием рапсового масла 55%. Уменьшение, таким образом, составило 2,3 раза. Из сопоставления расчётных и экспериментальных результатов можно заключить, что, во-первых, температурный фактор играет определяющую роль в образовании оксидов азота и, во-вторых, рассмотренный выше механизм их образования не является вполне адекватным, хотя его теория пригодна для численных оценок.

Содержание сажи в отработавших газах при работе дизеля на смесевом топливе также обнаруживает выраженную тенденцию к уменьшению с увеличением содержания рапсового масла в смеси (рис. 4). Так, при оптимальном, с точки зрения экономичности, угле опережения впрыскивания $\theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ показатель дымности уменьшился с 38,0% в случае чистого ДТ до 16,8% в случае смеси, содержащей 45% РМ, т. е. более, чем в 2 раза.

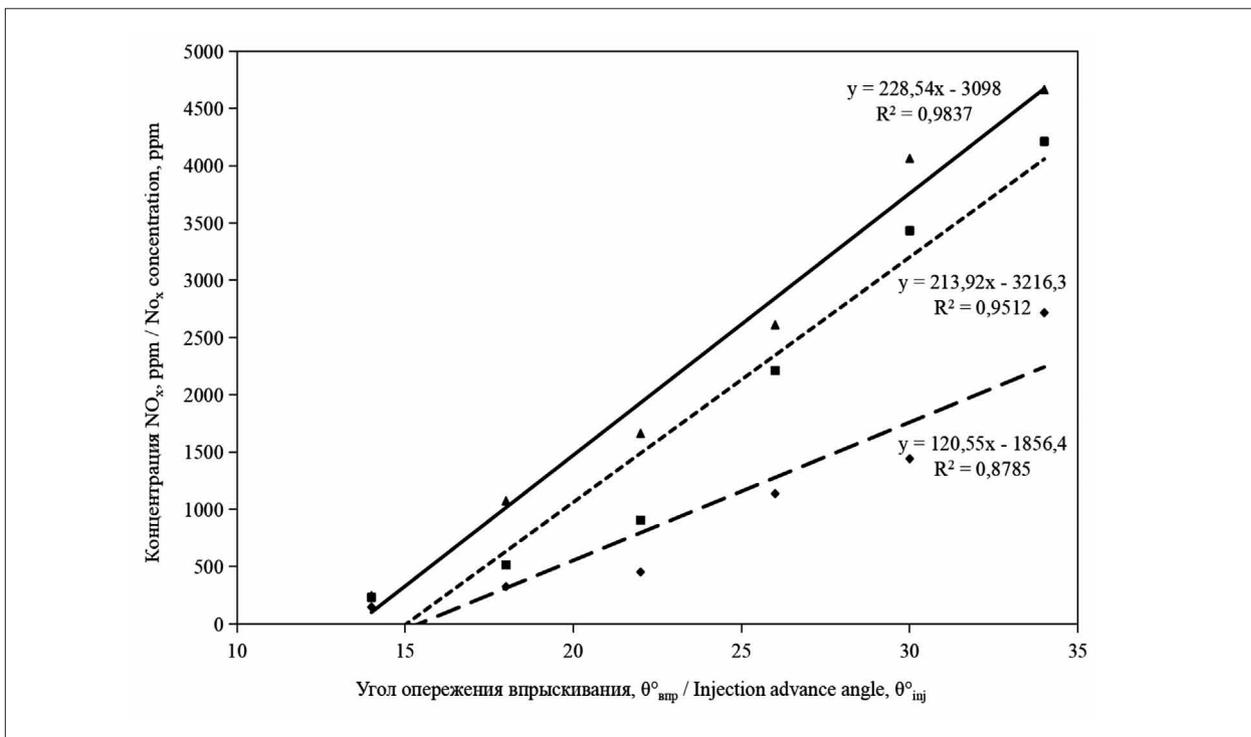


Рис. 1. Концентрация оксидов азота в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания и состава топлива (регулирующая характеристика) при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$
 Условные обозначения для рисунков 1–4: ▲, — — — — 100% дизельное топливо (ДФ), ■, - - - - 20% рапсовое масло (РМ) + 80% ДТ, ◆, — — — — 55% РМ + 45% ДТ
Fig. 1. Nitrogen oxides concentration depending on the injection advance angle and fuel composition (control characteristic) at $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ Notations for Figures 1–4: ▲, — — — — 100% diesel fuel (DF), ■, - - - - 20% rapeseed oil (RO) + 80% DF, ◆, — — — — 55% RO + 45% DF

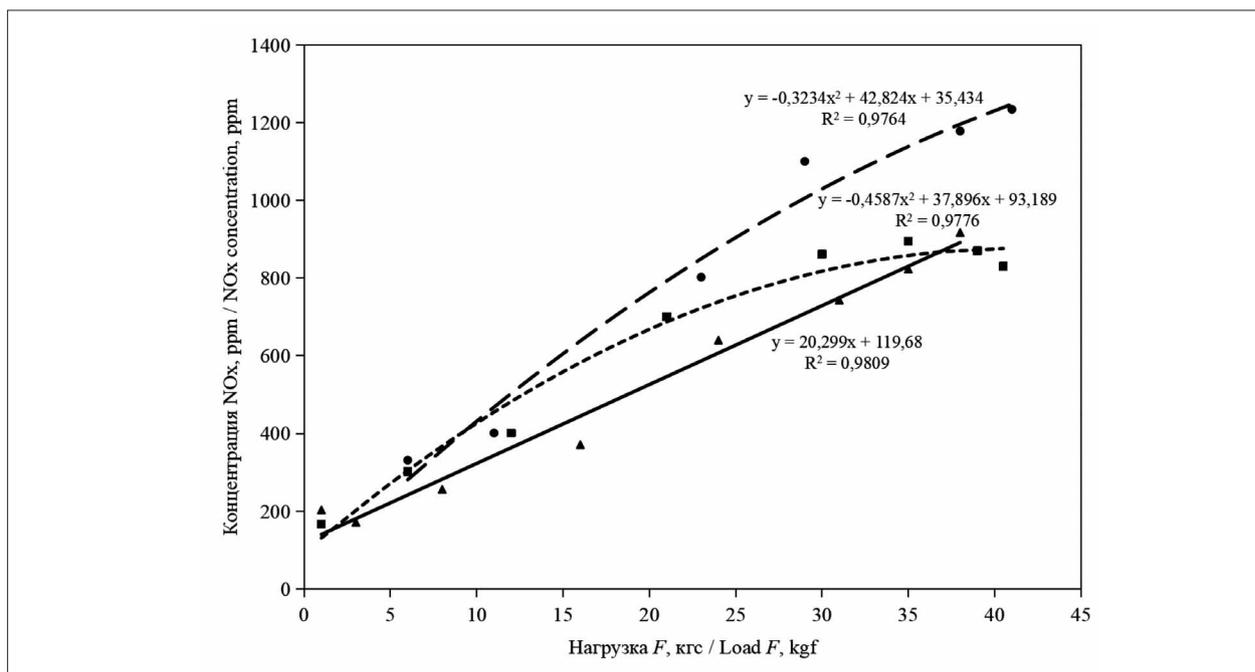


Рис. 2. Концентрация оксидов азота в зависимости от нагрузки и состава топлива (нагрузочная характеристика) при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ и $\theta_{\text{инп}} = 18^\circ$
Fig. 2. Concentration of nitrogen oxides depending on the load and fuel composition (load characteristic) at $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ and $\theta_{\text{инп}} = 18^\circ$

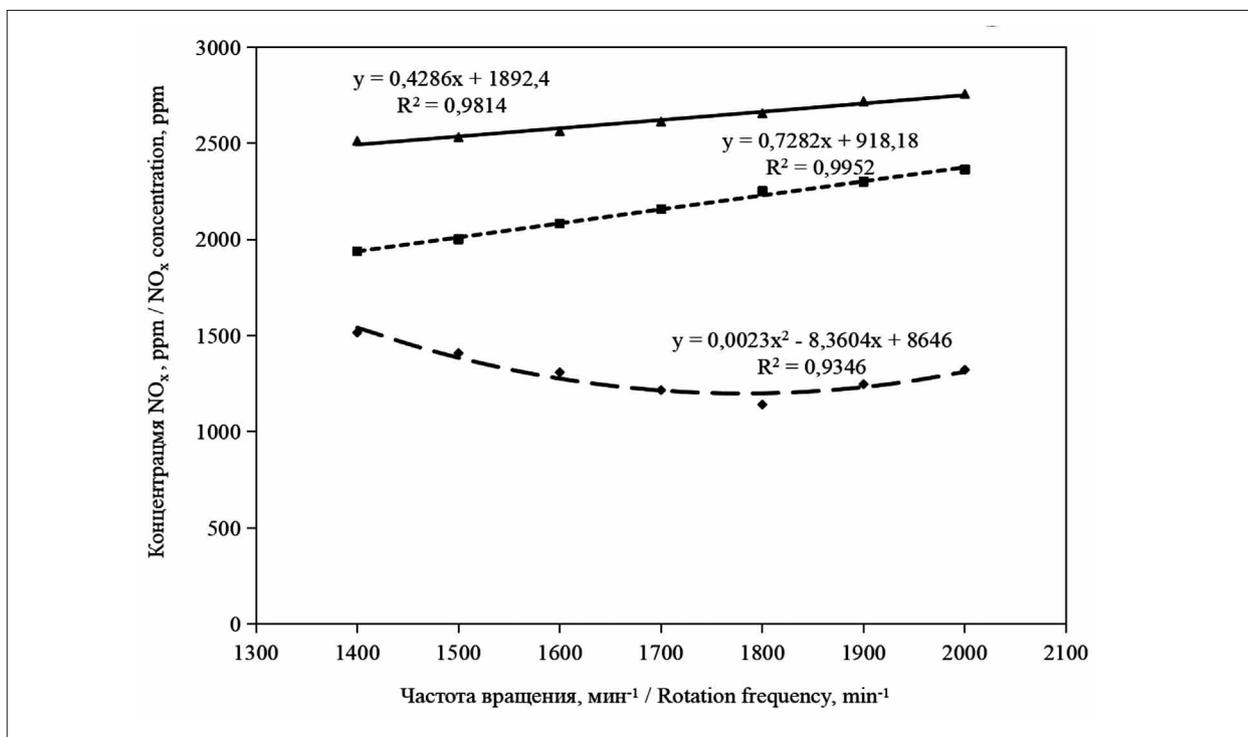


Рис. 3. Концентрация оксидов азота в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и состава топлива (скоростная характеристика) при $\theta_{впр} = 18^\circ$
 Fig. 3. Concentration of nitrogen oxides depending on the crankshaft speed and fuel composition (speed characteristic) at $\theta_{inj} = 18^\circ$

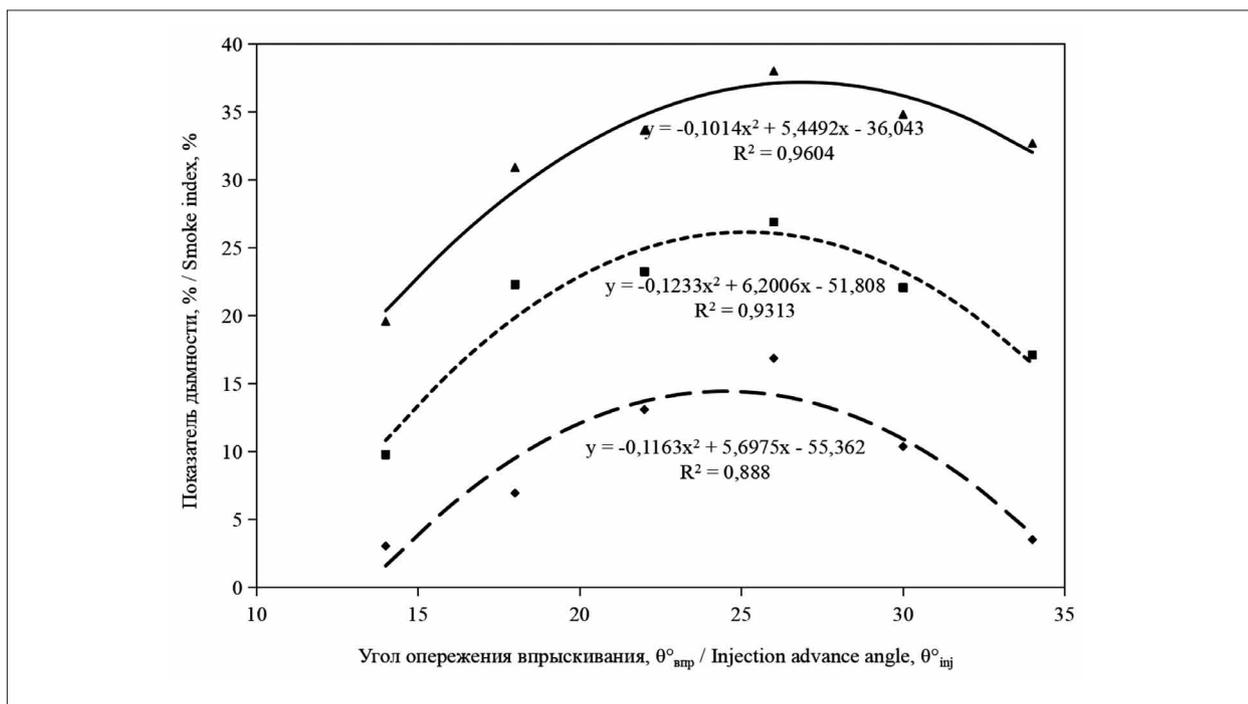


Рис. 4. Показатель дымности отработавших газов в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания и состава топлива (регулирующая характеристика) при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$
 Fig. 4. Exhaust gas smoke index depending on the setting injection advance angle and fuel composition (regulation characteristic) at $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

Заключение

Теоретическая оценка влияния состава смесового дизельного топлива, содержащего растительный компонент, на образование токсичных продуктов сгорания представляет собой сложную задачу, в процессе решения которой необходимо учитывать множество факторов. Их относительная значимость не всегда очевидна. В любом случае приходится пользоваться теми или иными модельными представлениями о характере процессов, происходящих при сгорании топлива в цилиндре дизеля. Наши оценки показывают, что при режимах работы дизеля, близких к номинальным, добавка к углеводородному дизельному рапсового масла не должна приводить к ухудшению экологических показателей. Оценочные расчёты, базирующиеся на низкотемпературном механизме образования оксидов азота, приводят к выводу, что при содержании рапсового масла порядка 50% следует ожидать снижения их концентрации в отработавших газах приблизительно на треть.

В результате экспериментальной проверки установлено, что при некоторых режимах работы дизеля на смесовом топливе концентрация оксидов азота уменьшается более чем в 2 раза. Можно заключить, что полученные результаты не противоречат гипотезе о доминировании температурного фактора в изменении эмиссии токсичных компонентов.

Увеличение содержания рапсового масла в смесовом топливе определённо приводило к снижению дымности отработавших газов, что свидетельствует об уменьшении концентрации свободного углерода (сажи).

В целом можно констатировать, что добавка рапсового масла в дизельное топливо на большинстве режимов работы дизеля приводит к снижению уровня эмиссии токсичных компонентов.

Мы констатируем также наличие ряда нерешённых проблем, связанных с заменой части углеводородного топлива растительными компонентами и её экологическими последствиями, что обусловлено многообразием физико-химических процессов в цилиндре дизеля и сложностью их теоретического описания. Предполагается продолжение исследований с другими топливными добавками биологического происхождения и улучшение теоретической модели процессов образования токсичных компонентов при сгорании смесового топлива.

Литература

1. Исаева А.Ю., Хрипков Ю.И., Поклонский Д.Л., Зыгин Д.А., Семёнов Е. А., Лагуткина Е.Е. Совместное действие экологически опасных факторов // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 4. С. 25–31. doi: 10.25750/1995-4301-2017-4-025-031
2. Булаткин Г.А., Митенко Г.В., Гурьев И.Д. Альтернативная энергетика: новые ресурсы биотоплива из растительного сырья // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 88–92. doi: 10.25750/1995-4301-2017-2-088-092
3. Плотников С.А., Кантор П.Я., Козлов И.С., Втюрина М.Н. Оценка экологических свойств рапсовых масел для применения в качестве моторного топлива сельскохозяйственного трактора // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30. № 1. С. 43–59. doi: 10.15507/2658-4123.030.202001.043-059
4. Заболотских Г.Э., Плотников С.А., Кантор П.Я., Смольников М.В., Втюрина М.Н. Влияние кинематической вязкости растительных масел на низшую удельную теплоту сгорания // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. Горки: БГСХА, 2023. Вып. 8. С. 274–277.
5. Плотников С.А., Кантор П.Я., Пляго А.В., Плотникова Ю.А. Обоснование и разработка метода точного регулирования высококонцентрированных составов альтернативных топлив для автотракторного дизеля // Вестник РГАТУ. 2022. Т. 14. № 2. С. 157–165. doi: 10.36508/RSATU.2022.54.2.019
6. Плотников С.А., Бузиков Ш.В., Козлов И.С., Зыков Е.Г., Андреев В.Л. Исследование токсичности при работе тракторного дизеля на топливах с добавками рапсового масла // Вестник НГИЭИ. 2024. № 1 (152). С. 29–40. doi: 10.24412/2227-9407-2024-1-29-40
7. Карташевич А.Н., Белоусов В.А., Товстыка В.С., Астапенко И.М., Бурков Г.Н. Техничко-экономические и экологические показатели работы двигателя Д-243 на смесях рапсового масла и дизельного топлива // Энергосберегающие технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве: доклады Международной научно-практической конференции. Минск: БГАТУ, 2008. Ч. 1. С. 87–92.
8. Уханов А.П., Уханов Д.А., Шеменев Д.С. Дизельное смесовое топливо. Пенза: РИО ПГСХА, 2012. 148 с.
9. Фомин В.М., Платунов А.С. Исследование кинетического механизма окисления азота в автомобильном двигателе с послойным смесеобразованием // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 1(14). С. 96–106.
10. Klyus O., Labeckas G., Slavinskas S., Mažeika M. Распределение капель в процессе распыливания дизельного топлива в его смеси с биокомпонентами // Zeszyty Naukowe. 2013. V. 36 (108). No. 2. P. 93–97.
11. Райкова С.В., Гусев Ю.С., Мазилев С.И., Поздняков М.В., Комлева Н.Е., Микеров А.Н. Влияние пол-

лютантов атмосферного воздуха на здоровье человека (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 6–15. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-006-020

12. Байбарин В.А., Божко А.В. Влияние отработавших газов двигателей МЭС на экологию и их состав // Вестник аграрной науки Дона. 2014. № 4 (28). С. 81–86.

13. Васильев А.В., Ларцев А.М., Зеленский Ю.О. Влияние регулировочных параметров на токсичность отработавших газов дизеля воздушного охлаждения // Вестник Волгогр. гос. ун-та. Сер. 10. Иннов. деят. 2014. № 2 (11). С. 47–56.

14. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д. А. Окисление азота при горении. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 148 с.

15. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames // Symposium (International) on Combustion. 1971. V. 13. No. 1. P. 373–380. doi: 10.1016/S0082-0784(71)80040-1

16. Moskaleva L.V., Lin M.C. The spin-conserved reaction $\text{CH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{H} + \text{NCN}$: a major pathway to prompt not studied by quantum/statistical theory calculations and kinetic modeling of rate constant // Proc. Combust. Inst. 2000. V. 28. No. 2. P. 2393–2401. doi: 10.1016/S0082-0784(00)80652-9

17. Глазков Д.Ю., Одинцов В.И. Некоторые закономерности образования сажи в цилиндрах судовых дизелей // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2014. № 3. С. 83–88.

18. Krause P., Klyus O. Application of surface tension parameter for estimation of fuel atomization process in Diesel engines // Zeszyty Naukowe. 2013. V. 36 (108). No. 2. P. 98–101.

19. Юсевич А.И., Тимошкина М.А., Добыш В.А. Термодеструкция гудрона в присутствии рапсового масла // Молодежь в науке – 2007: прил. к журн. Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Ч. 3: Серия физико-математических наук, Серия физико-технических наук, Серия химических наук. Минск: Беларуская навука, 2008. С. 343–346.

20. Марков В.А., Чайнов Н.Д., Лобода С.С. Физико-химические свойства нефтяных моторных топлив с добавками растительных масел и их влияние на показатели дизеля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 5. С. 108–122. doi: 10.18698/0236-3941-2018-5-108-122

References

1. Isaeva A.Yu., Khripkov Yu.I., Poklonsky D.L., Zygin D.A., Semenov E.A., Lagutkina E.E. Joint impact of ecologically dangerous factors // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 4. P. 25–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-4-025-031

2. Bulatkin G.A., Mitenko G.V., Guryev I.D. Alternative power engineering: new resources vegetation materials // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 2. P. 88–92 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-2-088-092

3. Plotnikov S.A., Kantor P.Ya., Kozlov I.S., Vtyurina M.N. Estimating ecological properties of rapeseed oils for using as agricultural tractor motor fuel // Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems. 2020. V. 30 (1). P. 43–59 (in Russian). doi: 10.15507/2658-4123.030.202001.043-059

4. Zabolotskikh G.E., Plotnikov S.A., Kantor P.Ya., Smolnikov M.V., Vtyurina M.N. Influence of kinematic viscosity of vegetable oils on the lower specific heat of combustion // Innovative solutions in technologies and mechanization of agricultural production. Gorki, BGSKhA, 2023. No. 8. P. 274–277 (in Russian).

5. Plotnikov S.A., Kantor P.Ya., Plyago A.V., Plotnikova Yu.A. Justification and development of a method for precise regulation of highly concentrated alternative fuel compositions for automotive diesel // Vestnik RGATU. 2022. V. 14. No. 2. P. 157–165 (in Russian). doi: 10.36508/RSATU.2022.54.2.019

6. Plotnikov S.A., Buzikov S.V., Kozlov I.S., Zykov E.G., Andreev V.L. Study of toxicity during operation of tractor diesel on fuels with the addition of rapeseed oil // Bulletin NGIEI. 2024. No. 1 (152). P. 29–40 (in Russian). doi: 10.24412/2227-9407-2024-1-29-40

7. Kartashevich A.N., Belousov V.A., Tovstyka V.S., Astapenko I.M., Burkov G.N. Technical, economic and environmental performance indicators of the D-243 engine running on mixtures of rapeseed oil and diesel fuel // Energy-saving technologies and technical means in agricultural production: reports of the International scientific and practical conference. Minsk: BGATU, 2008. No. 1. P. 87–92 (in Russian).

8. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Shemenov D.S. Diesel mixed fuel. Penza: RIO PGSKhA, 2012. 148 p. (in Russian).

9. Fomin V.M., Platonov A.S. Study of the kinetic mechanism of nitrogen oxidation in an automobile engine with layered mixture formation // Izvestiya MGTU “MAMI”. 2011. No. 1(11). P. 96–106 (in Russian).

10. Klyus O., Labeckas G., Slavinskas S., Mažeika M. Распределение капель в процессе распыливания дизельного топлива в его смеси с биокомпонентами // Zeszyty Naukowe. 2013. V. 36 (108). No. 2. P. 93–97.

11. Raikova S.V., Gusev Yu.S., Mazilov S.I., Pozdnyakov M.V., Komleva N.E., Mikerov A.N. Effects of atmospheric air pollutants on human health (overview) // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 4. P. 6–15 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-006-020

12. Baibarin V.A., Bozhko A.V. Influence of exhaust gases of MES engines on ecology and their composition // Don agrarian science bulletin. 2014. V. 4 (28). P. 81–86 (in Russian).

13. Vasiliev A.V., Lartsev A.M., Zelensky Yu.O. The influence of adjustment parameters on toxicity of exhaust gases of air-cooled diesel // Science journal of VolSU. Technology and innovations. Ser. 10. 2014. No. 2 (11). P. 47–56 (in Russian).

14. Zeldovich Ya.B., Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamenetsky D.A. Nitrogen Oxidation during Combustion. Moskva, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1947. 148 p. (in Russian).

15. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames // Symposium (International) on Combustion. 1971. V. 13. No. 1. P. 373–380. doi: 10.1016/S0082-0784(71)80040-1

16. Moskaleva L.V., Lin M.C. The spin-conserved reaction $CH+N_2 \rightarrow H+NCN$: a major pathway to prompt not studied by quantum/statistical theory calculations and kinetic modeling of rate constant // Proc. Combust. Inst. 2000. V. 28. No. 2. P. 2393–2401. doi: 10.1016/S0082-0784(00)80652-9

17. Glazkov D.Yu., Odintsov V.I. Some patterns of soot formation in the cylinders of marine diesel engines // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. 2014. No. 3. P. 83–88 (in Russian).

18. Krause P., Klyus O. Application of surface tension parameter for estimation of fuel atomization process in Diesel engines // Zeszyty Naukowe. 2013. V. 36 (108). No. 2. P. 98–101.

19. Yusevich A.I., Timoshkina M.A., Dobysh V.A. Thermal destruction of tar in the presence of rapeseed oil // Youth in Science – 2007: pril. k zhurn. Vesci Nacyyanal'naj akademii navuk Belarusi. Ch. 3: Seriya fiziko-matematicheskikh nauk; seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk; seriya khimicheskikh nauk. Minsk: Belarusian Science, 2008. P. 343–346 (in Russian).

20. Markov V.A., Chainov N.D., Loboda S.S. Physical and chemical properties of petroleum motor fuels with additives of vegetable oils and their influence on diesel performance // Herald of Bauman Moscow State Tech. Univ. Mech. Eng. 2018. No. 5. P. 108–122 (in Russian). doi: 10.18698/0236-3941-2018-5-108-122