

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Georgogianni K.G. et al. Transesterification of rapeseed oil for the production of biodiesel using homogeneous and heterogeneous catalysis // Fuel Process. Technol. Elsevier. – 2009. – Vol. 90, № 7–8. – P. 1016–1022.
2. Nigam P.S., Singh A. Production of liquid biofuels from renewable resources // Prog. Energy Combust. Sci. Elsevier. – 2011. – Vol. 37, № 1. – P. 52–68.
3. Singh A. et al. Key issues in life cycle assessment of ethanol production from lignocellulosic biomass: challenges and perspectives // Bioresour. Technol. Elsevier. – 2010. – Vol. 101, № 13. – P. 5003–5012.
4. Agarwal A.K., Gupta J.G., Dhar A. Potential and challenges for large-scale application of biodiesel in automotive sector // Prog. Energy Combust. Sci. Elsevier. – 2017. – Vol. 61. – P. 113–149.
5. Alsaiari M. et al. Efficient application of newly synthesized green Bi₂O₃ nanoparticles for sustainable biodiesel production via membrane reactor // Chemosphere. Elsevier. – 2023. – Vol. 310. – P. 136838.
6. Mathiyazhagan M., Ganapathi A. Factors affecting biodiesel production // Res. plant Biol. – 2011. – Vol. 1, № 2.
7. ГОСТ Р 53605-2009. Топливо для двигателей внутреннего сгорания. Метилловые эфиры жирных кислот (FAME) для дизельных двигателей. Общие технические требования. – Введ. 2009-12-15.
8. Hoekman S.K. et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications // Renew. Sustain. energy Rev. Elsevier. – 2012. – Vol. 16, № 1. – P. 143–169.
9. Karaosmanoğlu F., Akdağ A., Cigizoğlu K.B. Biodiesel from rapeseed oil of Turkish origin as an alternative fuel // Appl. Biochem. Biotechnol. Springer. – 1997. – Vol. 61. – P. 251–265.
10. Rashid U., Anwar F. Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil // Fuel. Elsevier. – 2008. – Vol. 87, № 3. – P. 265–273.
11. Mamat R. et al. Effect of fuel temperature on performance and emissions of a common rail diesel engine operating with rapeseed methyl ester (RME). SAE Technical Paper, 2009.

АНАЛИЗ ГОРЕНИЯ И СОСТАВА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ПРИ СЖИГАНИИ БИОТОПЛИВА, ПОЛУЧАЕМОГО НАНОМЕМБРАННЫМ СПОСОБОМ

А.А. Дюпин, А.Е. Ашихмин, Д.А. Верхованов

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, ТуТ, гр. 5Б01, А2-11, 5БМ23*

Научный руководитель: М.В. Пискунов, доцент, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ

Биотопливо рассматривается как один из источников энергии для транспортного и энергетического секторов, так как в данный момент актуальна тема перехода на возобновляемые источники энергии и сокращение выбросов углерода [1, 2]. Ввиду невозобновляемости и истощения нефтяных ресурсов биотопливо стало неизбежным выбором в качестве альтернативного топлива. Учитывая, что производство топлива не должно конкурировать с продуктами питания, производство биотоплива ориентировано на увеличение доли альтернативных источников [3]. Преимуществами использования биотоплива являются: доступность (так как оно может быть изготовлено из широкого ряда ресурсов, таких как масла, жиры, сельскохозяйственные отходы и др.), нейтральность углерода, утилизация отходов, энергетическая и экономическая безопасность, меньшая зависимость от нефтяных ресурсов [4]. Значительный интерес к биодизельному топливу связан с возможностью сокращения парниковых газов. Кроме того, его использование уменьшает выбросы углеводородов (НС), монооксида углерода (СО) и твердых частиц (РМ) [5]. В сравнении с традиционным топливом, биодизель является более экологичным, однако не в отношении NO_x. Как правило, концентрация NO_x в продуктах сгорания выше при использовании биодизеля [6]. В данном исследовании с помощью анализа дымовых газов выполнено сравнение эмиссионных характеристик (СО, NO_x) образцов биодизелей и оценено влияние рециркуляции отработавших газов на изменение концентрации основных газообразных продуктов сгорания. Анализ концентраций химиче-

ских веществ, содержащихся в отработанных газах, при сжигании биотоплива является важным аспектом, позволяющим охарактеризовать целесообразность использования биотоплива, а также эффективность работы энергетической установки. Полученные результаты исследования на испытательном стенде с вихревой горелкой позволили выделить оптимальный состав смесового биотоплива.

Исследуемое биотопливо произведено путем экологически устойчивого подхода – этерификации и наночистоты в наномембранном реакторе, произведенном методом электроспиннинга из поливинилиденфторида и сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом. В качестве исследуемых жидкостей используются метиловые эфиры жирных кислот (МЭЖК) рапсового масла (В100), соответствующие смеси дизеля с МЭЖК (В6 и В12 т. е. примесь МЭЖК составляет 6 и 12 % от массы дизеля) и дизельное топливо. Для приготовления МЭЖК используется рафинированное рапсовое масло фирмы «Орелмасло», метиловый спирт (химически чистый) в качестве этерифицирующего агента и едкий калий (химически чистый) в качестве катализатора. Выбор веществ связан с тем, что метиловые эфиры, в отличие от этиловых, демонстрируют более высокую выходную мощность и вращающий момент в испытаниях на двигателях. Физические свойства данных жидкостей представлены в табл. 1. Они определялись следующим образом: цетановое число измерялось на портативном октанометре, значение температуры вспышки получены по методу Пенски-Мартенса, вязкость измерялась при 40 °С на вискозиметре Brookfield DV3T-LV, значения коэффициента поверхностного натяжения измерены с помощью тензиометра цифрового Kruss K20. Более подробно методика определения свойств жидкостей представлена в работах [7, 8].

Таблица 1. Свойства используемых жидкостей

Параметр	Топливо			
	Дизель	В6	В12	В100 (МЭЖК)
Цетановое число (ЦИ), ед.	53	55,7	57,6	141
Температура вспышки в закрытом тигле ($T_{вс}$), °С	66	62	63	>170*
Вязкость при 40 °С (ν), мм ² /с	3,07	2,53	2,54	3,81
Плотность (ρ), кг/м ³	841	830	834	869
Коэффициент поверхностного натяжения (σ), мН/м	28,1	27,4	27,5	30,5

*Верхний предел измерения термометра 170 °С. До этой температуры вспышки зафиксировано не было.

Экспериментальное исследование проводилось на лабораторной установке с вихревой горелкой, оборудованной камерой сгорания с оптическим доступом и системой рециркуляции дымовых газов. Данный стенд позволяет определять характеристики распыления (количество, размеры, скорости и траектории движения капель жидкости), горения (температура и структура пламени) и эмиссионные характеристики (концентрации CO, NO, CO₂, O₂) жидких топлив. Испытания по сжиганию топлива и анализу продуктов сгорания топлив проводились с включенной системой рециркуляции отработавших газов (EGR) и без неё, давление на впрыске (P) составляло 0,6 и 1,2 МПа. Система EGR представляет собой устройство, которое позволяет вернуть часть отработанных газов в камеру сгорания для смешивания с воздухом и топливом, в результате чего снижается образование и выброс в атмосферу оксидов азота (NO_x). На лабораторном стенде роль системы EGR выполняет дроссель клапан и тракт рециркуляции, при открытии клапана часть отработанных газов по тракту подаётся в камеру сгорания для повторного сжигания. Для анализа газо-воздушной смеси используется газоанализатор «Тест 1» с диапазоном измерения компонентов: 0–16 % (CO), 0–20 % (CO₂), 0–2000 ppm (NO), 0–21 % (O₂). Зонд – шуп газоанализатор располагается в кожухе теплообменника. Выбор места расположения зонда определяется в зависимости от скорости потока отработавших газов, для наиболее достоверного измерения необходимо место расположения с наименьшей скоростью потока. При проведении опытов газоанализатор в реальном време-

ни строит кривую изменения компонентов дымовых газов. Коэффициент эквивалентности λ (определяется как отношение массового расхода топлива к массовому расходу воздуха, разделенное на такое же отношение при стехиометрии рассматриваемой реакции) во время исследования поддерживался на уровне 1.

При исследовании горения топливных композиций на лабораторном стенде с вихревой горелкой получены концентрации основных газообразных продуктов сгорания (CO , NO_x). Для оценки влияния таких факторов как P , массовой доли МЭЖК в составе топлива и EGR представлены рисунки осредненных значений концентраций компонентов при квазистационарном режиме горения при P , равном 0,6 и 1,2 МПа (рис. 1).

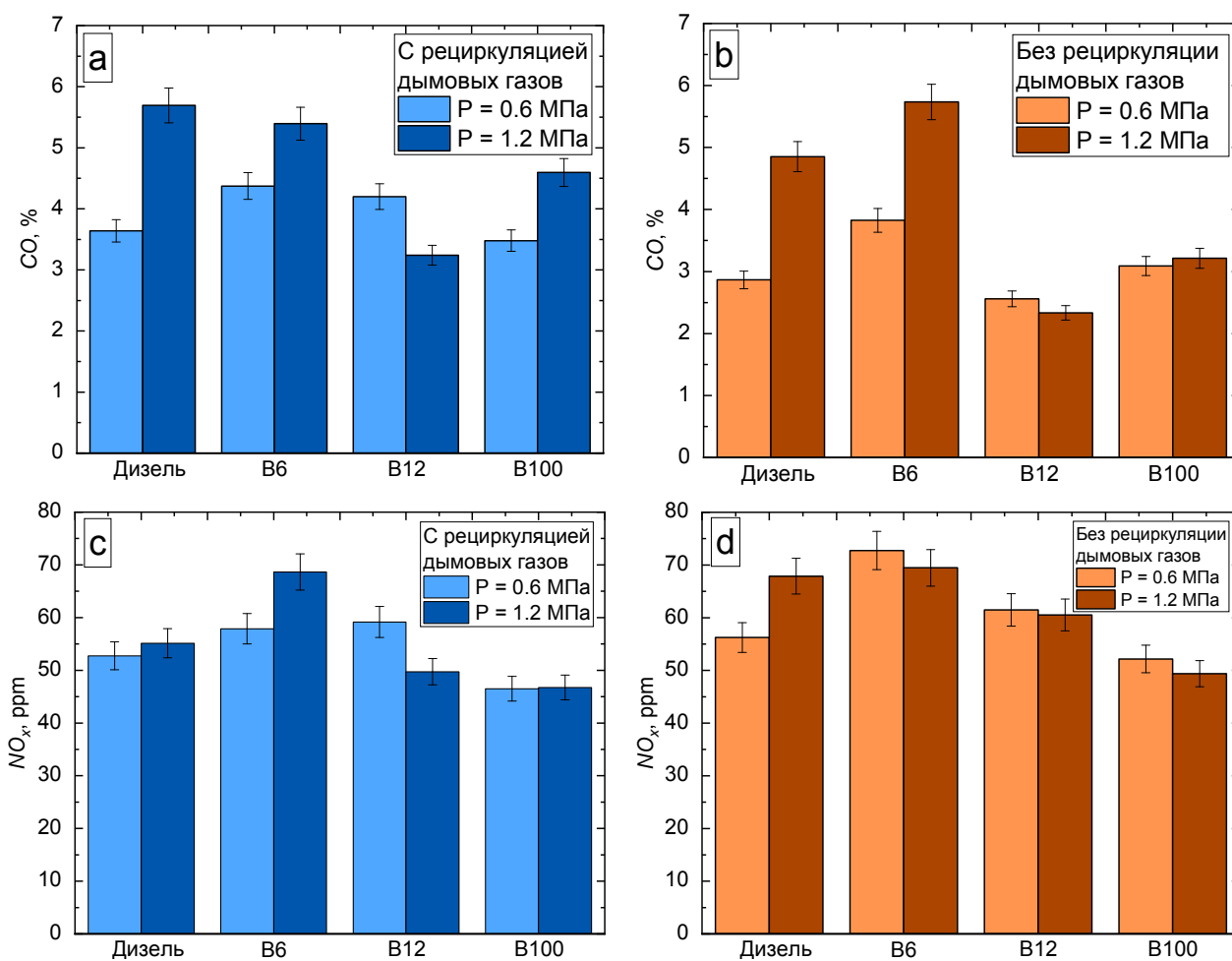


Рис. 1. Средние значения концентраций компонентов отработавших газов в условиях EGR и без нее при коэффициенте эквивалентности $\lambda = 1$: CO (a–b), NO_x (c–d)

Анализ изменения концентрации NO_x в отработанных газах позволил сформулировать заключение о снижении концентрации этих газов на 3–20 % при применении системы EGR (рис. 1, c–d). Однако, заметно несущественное увеличение концентрации NO_x в составах с МЭЖК относительно дизельного топлива [5]. Проявляется “biodiesel NO_x effect”. Он заключается в высоком уровне ненасыщенных соединений при сжигании МЭЖК, вследствие чего образуется больше углеводородных радикалов, чем при сжигании дизельного топлива, приводя к более высокому образованию NO_x [6]. Также можно заметить, что при увеличении P растет концентрация CO (рис. 1, a–b), что говорит о недожоге топлива [9]. Применение EGR также повышает концентрацию CO в отработавших газах. Однако, при горении состава B12 происходит снижение концентрации CO как при увеличении P , так и при применении EGR.

Исходя из этого можно сделать вывод о положительном влиянии МЭЖК на полноту сгорания топлива. Это связано с углеродной нейтральностью МЭЖК и содержанием окислителя в самом составе МЭЖК. На основе анализа полученных результатов можно отметить положительное влияние EGR на концентрацию вредных выбросов, содержащихся в отработавших газах. Концентрация NO_x в отработавших газах снижается в среднем на 11 %. Однако, в отношении генерации CO EGR увеличивает его концентрацию на ~14 % из-за недостатка окислителя.

Биодизель демонстрирует близкие к дизельному топливу характеристики и при этом позволяет снизить количество вредных выбросов в отработавших газах. Приготовление биодобавки в дизельное топливо с использованием оптимизированной по трудовым и временным затратам наномембранной технологии показало эффективность в испытаниях по горению. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что биотопливо демонстрируют уверенный задел для простой и доступной технологии получения зеленой энергии для отдельных секторов малой энергетики при децентрализованном производстве энергии.

Работа выполнена при поддержке программы развития «Приоритет 2030» (Приоритет 2030-НИИ/ЕБ-038-1308-2022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bonenkamp T.B., Middelburg L.M., Hosli M.O., Wolffenbittel R.F. From bioethanol containing fuels towards a fuel economy that includes methanol derived from renewable sources and the impact on European Union decision-making on transition pathways // *Renew Sustain Energy Rev.* – 2020. – Vol. 120. – P. 109667. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109667>.
2. Chen Y., Ma J., Han B., Zhang P., Hua H., Chen H. et al. Emissions of automobiles fueled with alternative fuels based on engine technology: A review // *J Traffic Transp Eng (English Ed).* – 2018. – Vol. 5. – P. 318–334. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.05.001>.
3. Kuznetsov G., Antonov D., Piskunov M., Yanovsky L., Vysokomornaya O. Alternative Liquid Fuels for Power Plants and Engines for Aviation, Marine, and Land Applications // *Energies.* – 2022. – Vol. 15. – P. 1–21. <https://doi.org/10.3390/en15249565>.
4. Johnson T.V. Review of Vehicular Emissions Trends // *SAE Int J Engines.* – 2015. – Vol. 8. – P. 1152–1167. <https://doi.org/10.4271/2015-01-0993>.
5. Robbins C., Hoekman S.K., Cenicerros E., Natarajan M. Effects of biodiesel fuels upon criteria emissions // *SAE Tech Pap.* – 2011. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1943>.
6. Hoekman S.K., Robbins C. Review of the effects of biodiesel on NO_x emissions // *Fuel Process Technol.* – 2012. – Vol. 96. – P. 237–249. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.12.036>.
7. Ashikhmin A., Khomutov N., Piskunov M., Strizhak P., Yanovsky V. Synergistic effect of the fuel microemulsion characteristics on drop interaction with a hot wall // *Energy and Fuels.* – 2021.
8. Ashikhmin A., Andropov M., Piskunov M., Strizhak P., Yanovsky V. Effects of temperature on viscosity, stability, and microstructure of water-in-biodiesel microemulsions. – 2021. <https://doi.org/10.1080/01932691.2021.1984939>.
9. Liu H., Lee C.F.F., Huo M., Yao M. Combustion characteristics and soot distributions of neat butanol and neat soybean biodiesel // *Energy and Fuels.* – 2011. – Vol. 25. – P. 3192–3203. <https://doi.org/10.1021/ef1017412>.