

УДК 621.43

ВЛИЯНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЦ САЖИ

Юрлов А.С., кандидат технических наук, доцент

E-mail: amadeus_92@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Вятский государственный агротехнологический университет»,
г. Киров, Россия

Аннотация. Рассмотрены влияние частоты вращения и нагрузки двигателя, давления впрыска, времени впрыска на физико-химические характеристики твердых частиц при сгорании дизельного топлива в дизельном двигателе. Показано, что при увеличении времени впрыска количество наночастиц увеличивается. Кроме того, численная концентрация твердых частиц снижается при увеличении времени впрыска при более высоком давлении впрыска, в то время как численная концентрация твердых частиц сначала увеличивается, а затем уменьшается при замедлении времени впрыска при более низком давлении впрыска. При постоянной частоте вращения двигателя с увеличением нагрузки длина цепи агрегатов была больше и частицы имели более отчетливую морфологию.

Ключевые слова: дизельный двигатель, сажа, твердые частицы, микроструктура агрегатных частиц, первичные частицы, морфология.

THE INFLUENCE OF DIESEL OPERATING PARAMETERS ON THE SOOT PARTICLES CHARACTERISTICS

Yurlov A.S., candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: amadeus_92@mail.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Vyatka State Agrotechnological University», Kirov, Russia

Annotation. The article considers the influence of engine speed and load, injection pressure, injection time on the physical and chemical characteristics of solid particles during the diesel fuel combustion in a diesel engine. It is shown that as the injection time increases, the number of nanoparticles increases. In addition, the numerical concentration of solid particles decreases as the injection time increases at a higher injection pressure, while the numerical concentration of solid particles first increases and then decreases as the injection time slows down at the lower injection pressure. At the constant engine speed with the increasing load, the length of the chain of aggregates was longer and the particles had a more distinct morphology.



Keywords: diesel engine, soot, solid particles, microstructure of aggregate particles, primary particles, morphology.

Рабочие параметры, включающие частоту вращения и нагрузку двигателя, давление впрыска, время впрыска, оказывают сильное влияние на физико-химические характеристики твердых частиц при сгорании дизельного топлива (ДТ). Как правило, при работе дизеля с разными частотами вращения и нагрузками условия сгорания в цилиндрах сильно различаются, что может вызвать разницу в характеристиках твердых частиц (ТЧ). Параметры впрыска, включающие давление и время впрыска, влияют на формирование капель топлива в камере сгорания. Как известно, топливная струя играет чрезвычайно важную роль в процессах сгорания в двигателе внутреннего сгорания и, следовательно, влияет на функции ТЧ.

Исследовав влияние частоты вращения двигателя и нагрузки на гранулометрический состав, Lu et al. [1] сообщили, что с увеличением числа оборотов двигателя массовая концентрация частиц (PMС) и средний геометрический диаметр (GMD) уменьшились, в то время как общая концентрация (число TNC) увеличена в соответствии с постоянным топливо/воздух условием, как показано на рисунке 1, а. Аналогичные результаты наблюдались Di et al. [2], которые проводили испытания двигателя на частотах вращения 1800 и 2400 мин⁻¹. Известно, что как более высокая локальная температура, так и более богатые топливом зоны в фазе диффузионного горения способствуют образованию сажи.

При более высоких оборотах двигателя продолжительность сгорания становится короче, особенно для продолжительности диффузионного горения, что приводит к снижению PMС и GMD. Из-за меньшего времени, доступного при более высоких оборотах двигателя, меньшее количество первичных частиц образует агрегаты, что приводит к увеличению TNC.



Помимо частоты вращения двигателя, нагрузка двигателя также оказывает значительное влияние на гранулометрический состав ТЧ от сгорания дизельного топлива.

Согласно Lu et al. [1], РМС, GMD и ТНС значительно снизились по мере уменьшения нагрузки двигателя, как показано на рисунке 1, в.

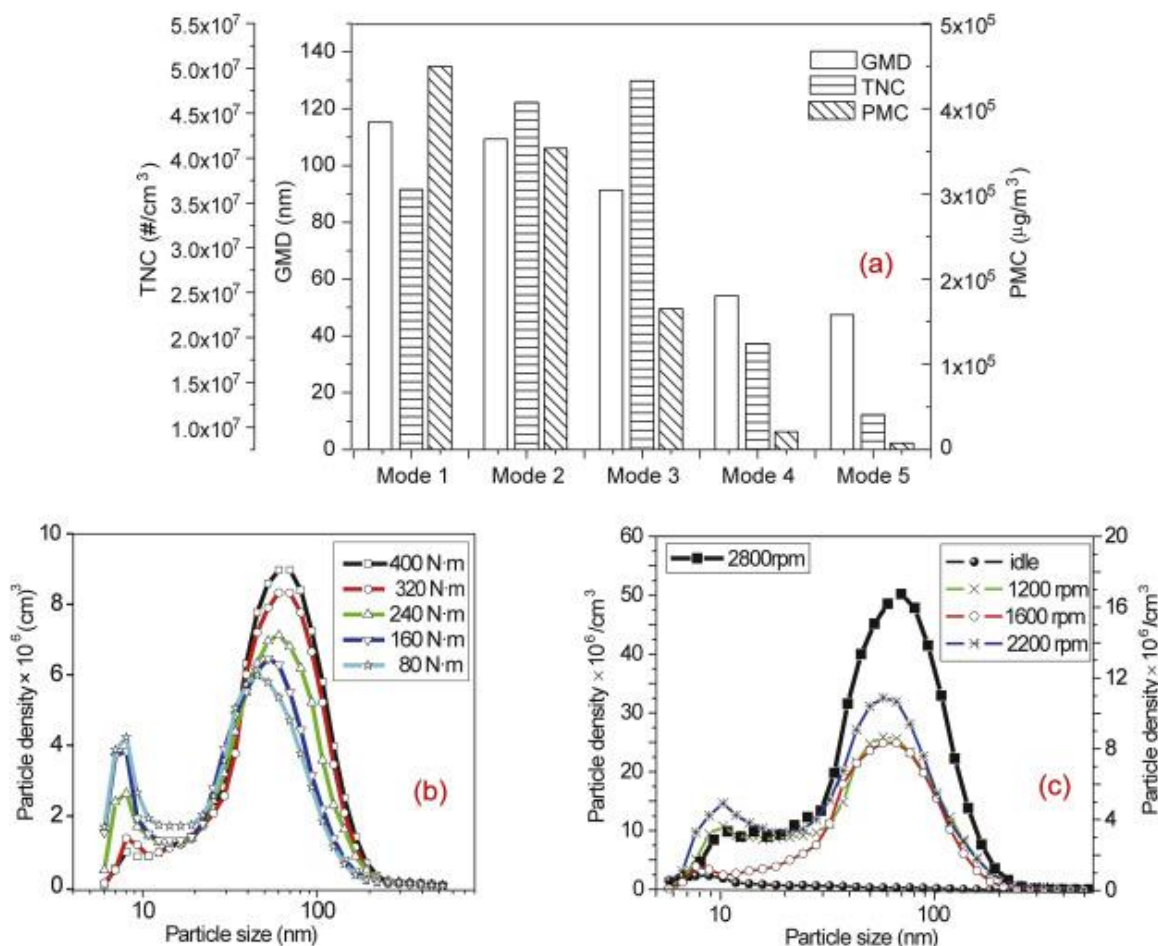


Рисунок 1 – а) влияние условий работы двигателя на ТНС, РМС и GMD; б) влияние нагрузок двигателя на РМС, GMD и ТНС; в) влияние частоты вращения двигателя на числовую концентрацию частиц (PNC) [3]

Аналогичные тенденции в GMD и ТНС в отношении нагрузок на двигатель также наблюдаются в работах [2, 3]. Это явление можно объяснить тем, что по мере увеличения нагрузки двигателя в камеру сгорания



впрыскивается больше топлива и увеличивается количество топлива, сжигаемого в фазе диффузионного сгорания, что приводит к увеличению TNC и GMD. Кроме того, большая продолжительность диффузионного горения и высокая температура горения при высоких нагрузках также снижают скорость окисления сажи в такте расширения из-за меньшего времени и кислорода после окончания диффузионного горения. Кроме того, количественные концентрации частиц дизельного топлива были измерены Нао [3] при различных нагрузках двигателя (рисунок 1, б) с постоянной скоростью 1600 мин^{-1} , а также на холостом ходу и других оборотах двигателя с постоянным крутящим моментом $320 \text{ Н} \cdot \text{м}$, как показано на рисунке 1, с.

Xu et al. [4] при испытаниях двигателя выяснили, что общие массовые концентрации (ОМК) уменьшаются с увеличением давления впрыска, что может быть связано с уменьшением количества частиц в режиме накопления. По данным Desantes et al. [5], в условиях испытаний как GMD, так и частицы в режиме накопления уменьшались при высоком давлении впрыскивания. В отличие от частиц с режимом зародышеобразования, частицы с режимом накопления в основном содержат углеродистые агломераты и адсорбированные на них материалы. Благодаря лучшему смешиванию и распылению топлива при высоком давлении впрыска более полное сгорание в цилиндре приводит к снижению режима накопления частиц. Уменьшение численных концентраций твердых частиц с увеличением давления впрыскивания также было обнаружено Mathis et al. [6]. Кроме того, Mathis et al. [6] далее пришли к выводу, что влияние давления нагнетания на распределение частиц по размерам в режиме накопления при низких нагрузках было более значительным, чем при высоких. При уменьшении количества углеродистых агломератов углеводородам и сульфатным соединениям становится трудно адсорбироваться на них из-за менее доступной поверхности частиц. Следовательно, в процессе разбавления и охлаждения образуется больше ультрамелких частиц [7]. Кроме того, Lahde et



al. [8] далее исследовали, что количество нелетучих частиц в ходе зародышеобразования увеличивалось с ростом давления впрыска при средних и высоких нагрузках, тогда как при низкой нагрузке они не были обнаружены.

При дальнейшем увеличении времени впрыска количество наночастиц начало увеличиваться. Кроме того, численная концентрация твердых частиц снижается при увеличении времени впрыска при более высоком давлении впрыска, в то время как численная концентрация твердых частиц сначала увеличивается, а затем уменьшается при замедлении времени впрыска при более низком давлении впрыска [9]. Как известно, температура и давление воздуха значительно изменяются вблизи верхней мертвой точки (ВМТ) при различных условиях работы двигателя. При опережающем или замедленном времени впрыска температура и давление воздуха в цилиндре, а также задержка воспламенения изменяются, что приводит к сложной и неопределенной тенденции в распределении частиц по размерам [3].

Как правило, агрегатные частицы имеют цепочечную структуру и в значительной степени зависят от частоты вращения двигателя и нагрузки, как показано на рисунке 2 [3]. В режиме холостого хода границы между первичными частицами кажутся четкими.

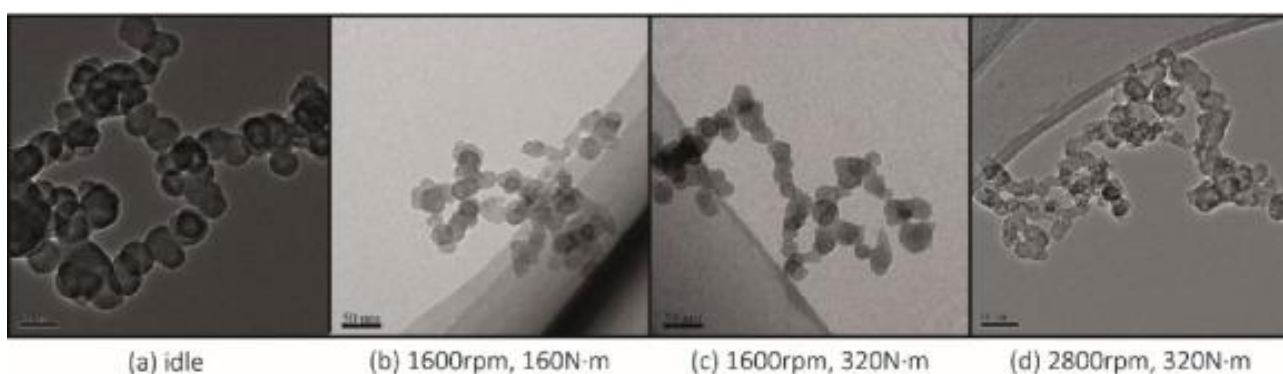


Рисунок 2 – Изображения частиц сажи в отработавших газах дизеля, полученных при различных условиях эксплуатации (увеличение 40 000 раз) [3]



Полученные результаты по морфологии указали, что частицы сажи в режиме холостого хода содержат большое количество растворимой органической фракции (SOF) и других жидких углеводов. При постоянной частоте вращения двигателя с увеличением нагрузки на двигатель длина цепи агрегатов была больше и частицы имели более отчетливую морфологию.

Кроме того, первичные частицы имеют большую степень перекрытия, чем наблюдаемые при более низких нагрузках двигателя. Как мы знаем, количество впрыскиваемого топлива больше, а температура и давление в цилиндрах выше, когда двигатель работает с высокими нагрузками. Кроме того, продолжительность сгорания увеличивается при высокой нагрузке на двигатель, особенно при продолжительности фазы диффузионного сгорания. Эти вышеуказанные факторы способствуют образованию зародышей сажи, а также поверхностному росту и первичных частиц. Кроме того, более высокое соотношение топлива и воздуха также подавляет окисление сажи. Следовательно, большее количество агрегатных частиц агломерируется в более крупные кластеры.

При более высоких нагрузках двигателя с той же скоростью образовывалось больше первичных частиц с большим диаметром, что приводило к большему среднему диаметру. Однако при более высоких оборотах двигателя при постоянной нагрузке образовывалось больше первичных частиц меньшего диаметра, что приводило к меньшему среднему диаметру. Во всех рабочих условиях распределение d_p следует нормальному распределению. На данный момент существует общее мнение, что образование сажи из газовой фазы в твердые агломерированные частицы происходит в пять этапов: пиролиз топлива, зародышеобразование, поверхностный рост, коалесценция и агломерация. Первичные частицы образуются в результате поверхностного роста и слияния зародышей сажи. Основываясь на знаниях об образовании сажи, размер первичных частиц определяется конкуренцией



между окислением сажи и ростом поверхности. В условиях как низких оборотов двигателя, так и высокой нагрузки двигателя продолжительность сгорания больше, особенно для продолжительности диффузионного сгорания, которая способствует зарождению частиц и росту поверхности, что в результате приводит к большему размеру первичных частиц.

Некоторые исследователи отметили, что D_f частиц заполнителя ниже и больше частиц заполнителя появляется в цепочечной структуре при высоких нагрузках двигателя [10, 11]. Так, Soewono et al. [11] наблюдали, что D_f частиц заполнителя уменьшилась с 1,843 до 1,703 с увеличением крутящего момента двигателя с 19,1 Н · м до 76,4 Н · м при постоянной частоте вращения двигателя 3750 мин⁻¹. Чжоу и др. [10] считают, что числовая плотность первичных частиц и скорость агломерации увеличиваются с увеличением соотношения топливо/воздух при высокой нагрузке двигателя.

На рисунке 3 приведены изображения агломератов сажи, отобранные при различных параметрах впрыскивания и EGR [12, 13, 14].

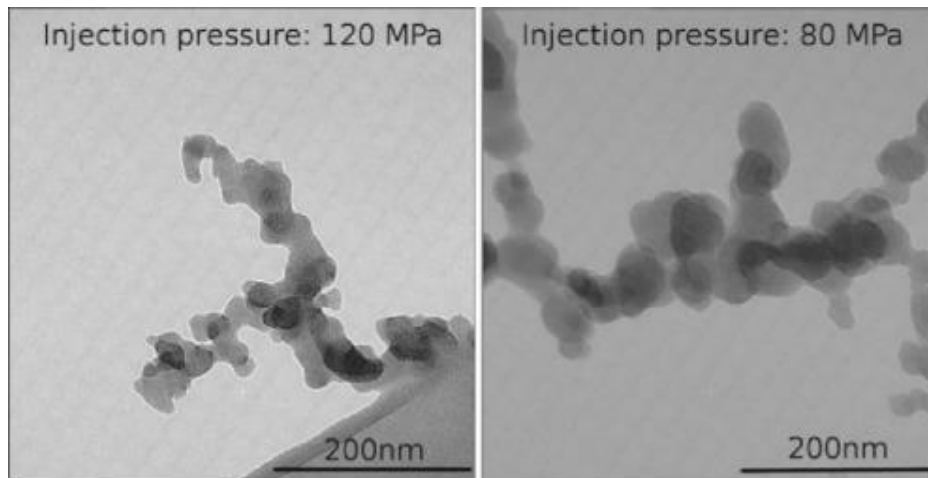
Как представлено на рисунке 3 [12], при более высоком давлении впрыска границы между первичными частицами кажутся четкими.

Кроме того, можно определить, что диаметр первичных частиц становится меньше с увеличением давления нагнетания. Агрегатные частицы, отобранные в условиях продвинутого времени впрыска, как правило, имеют структуру, напоминающую виноград. И наоборот, цепочечные формы наблюдались для агрегатных частиц для замедленного времени впрыска (рисунок 3, b) [13]. Когда время впрыска увеличивается, время пребывания частиц сажи при высоких температурах в камере сгорания увеличивается.

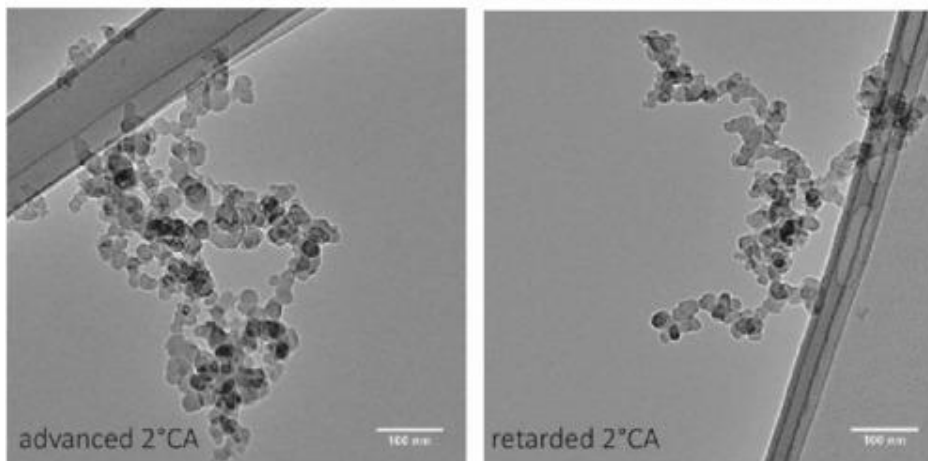
Такое длительное время благоприятно для образования агрегатных частиц, что дополнительно приводит к преобразованию агрегатных частиц из цепочечных форм в похожие на виноградные структуры. Никаких явных



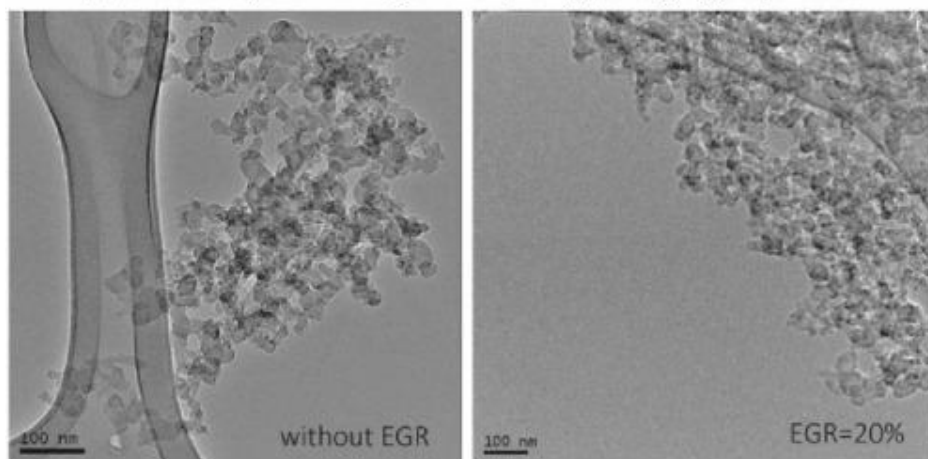
различий между морфологией агрегатных частиц, отобранных с или без EGR, нет (рисунок 3, с) [14].



(a) effect of *injection pressure* on morphology of aggregate particles



(b) effect of *injection timing* on morphology of aggregate particles



(c) effect of *EGR* on morphology of aggregate particles

Рисунок 3 – Изображения частиц сажи в отработавших газах дизеля, полученные при различных рабочих параметрах [12, 13, 14]



Исследователи единодушны относительно тенденции к снижению d_p с увеличением давления впрыскивания [15]. Более того, интерпретация этого наблюдения d_p аналогична.

Улучшенная гомогенизация топливно-воздушной смеси с более высоким давлением впрыска может не только уменьшить образование сажи, но и улучшить ее окисление [16, 17, 18].

Что касается влияния времени впрыска, обычно сообщается, что более длительное впрыскивание приводит к более мелким первичным частицам из-за более длительного времени окисления сажи и меньшей доли крупных первичных частиц сажи [19, 20, 21].

Выводы. Частота вращения и нагрузка двигателя, давление впрыска, время впрыска существенно влияют на физико-химические характеристики твердых частиц при сгорании дизельного топлива в дизельном двигателе. При увеличении времени впрыска количество наночастиц увеличивается. При постоянной частоте вращения двигателя с увеличением нагрузки длина цепи агрегатов больше и частицы имеют более отчетливую морфологию.

В условиях как низких оборотов двигателя, так и высокой нагрузки двигателя продолжительность сгорания больше, особенно для продолжительности диффузионного сгорания, которая способствует зарождению частиц и росту поверхности, что в результате приводит к большему размеру первичных частиц. Когда время впрыска увеличивается, время пребывания частиц сажи при высоких температурах в камере сгорания увеличивается.

Улучшенная гомогенизация топливно-воздушной смеси с более высоким давлением впрыска может не только уменьшить образование сажи, но и улучшить ее окисление. Более длительное впрыскивание приводит к более мелким первичным частицам из-за более длительного времени окисления сажи и меньшей доли крупных первичных частиц сажи.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. T. Lu, C.S. Cheung, Z. Huang Effects of engine operating conditions on the size and nanostructure of diesel particles / *J. Aerosol Sci.*, 47 (2012), pp. 27-38, 10.1016/j.jaerosci.2011.12.004.
2. Y. Di, C.S. Cheung, Z. Huang Experimental study on particulate emission of a diesel engine fueled with blended ethanol–dodecanol–diesel / *J. Aerosol Sci.*, 40 (2009), pp. 101-112, 10.1016/j.jaerosci.2008.09.004.
3. B. Hao Effect of Fuel Identity on the Exhaust Particles from Diesel Engine [PhD thesis] / Tianjin University (2014).
4. Z. Xu, X. Li, C. Guan, Z. Huang Effects of injection pressure on diesel engine particle physico-chemical properties / *Aerosol Sci. Technol.*, 48 (2013), pp. 128-138, 10.1080/02786826.2013.862589.
5. J.M. Desantes, V. Bermúdez, J.M. García, E. Fuentes Effects of current engine strategies on the exhaust aerosol particle size distribution from a Heavy-Duty Diesel Engine / *J. Aerosol Sci.*, 36 (2005), pp. 1251-1276, 10.1016/j.jaerosci.2005.01.002.
6. U. Mathis, M. Mohr, R. Kaegi, A. Bertola, K. Boulouchos Influence of diesel engine combustion parameters on primary soot particle diameter / *Environ. Sci. Technol.*, 39 (2005), pp. 1887-1892, 10.1021/es049578p.
7. D.B. Kittelson Engines and nanoparticles: a review / *J. Aerosol Sci.*, 29 (1998), pp. 575-588, 10.1016/S0021-8502(97)10037-4.
8. T. Lahde, T. Ronkko, M. Happonen, C. Soderstrom, A. Virtanen, A. Solla, et al. Effect of fuel injection pressure on a heavy-duty diesel engine nonvolatile particle emission / *Environ. Sci. Technol.*, 45 (2011), pp. 2504-2509, 10.1021/es103431p.
9. A.K. Agarwal, D.K. Srivastava, A. Dhar, R.K. Maurya, P.C. Shukla, A.P. Singh Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions



- and performance characteristics of a single cylinder diesel engine / *Fuel*, 111 (2013), pp. 374-383, 10.1016/j.fuel.2013.03.016.
10. J.H. Zhou, C.S. Cheung, W.Z. Zhao, Z. Ning, C.W. Leung Impact of intake hydrogen enrichment on morphology, structure and oxidation reactivity of diesel particulate / *Appl. Energy*, 160 (2015), pp. 442-455, 10.1016/j.apenergy.2015.09.036.
11. Soewono, S. Rogak Morphology and Raman spectra of engine-emitted particulates / *Aerosol Sci. Technol.*, 45 (2011), pp. 1206-1216, 10.1080/02786826.2011.587036.
12. R. Zhang, S. Kook Structural evolution of soot particles during diesel combustion in a single-cylinder light-duty engine / *Combust. Flame*, 162 (2015), pp. 2720-2728, 10.1016/j.combustflame.2015.04.008.
13. K. Yehliu, O. Armas, R.L. Vander Wal, A.L. Boehman Impact of engine operating modes and combustion phasing on the reactivity of diesel soot / *Combust. Flame*, 160 (2013), pp. 682-691, 10.1016/j.combustflame.2012.11.003.
14. K. Al-Qurashi, A.L. Boehman Impact of exhaust gas recirculation (EGR) on the oxidative reactivity of diesel engine soot / *Combust. Flame*, 155 (2008), pp. 675-695, 10.1016/j.combustflame.2008.06.002.
15. D. Lee, S.C. Choi, C.S. Lee Impact of SME blended fuel combustion on soot morphological characteristics in a diesel engine / *Int. J. Autom. Technol.*, 14 (2013), pp. 757-762, 10.1007/s12239-013-0083-2.
16. Лиханов В. А., Юрлов А. С. Улучшение экологических показателей быстроходного дизеля снижением дымности отработавших газов при работе на альтернативных топливах. Киров : ВГАТУ, 2021. 180 с. ISBN 978-5-6045024-6-4. EDN TYGUPA.
17. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование показателей рабочего процесса быстроходного малоразмерного дизеля при работе на этаноле и



- Вестник Вятского ГАТУ. 2023. № 4 (18). Агроинженерия**
- рапсовом масле // Двигателестроение. 2022. № 2(288). С. 61–71. DOI 10.18698/jec.2022.2.61-71. EDN КАЕРУО.
18. Лиханов В. А., Россохин А. В. Физико-химические свойства, морфология, структура и реакционная способность частиц сажи отработавших газов дизелей // Двигателестроение. 2022. № 3 (289). С. 64–69. DOI 10.18698/jec.2022.3.64-69. EDN XLTYRR.
19. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование токсичности дизельного двигателя при работе на различных альтернативных топливах // Двигателестроение. 2023. № 2(292). С. 54–61. DOI 10.18698/jec.2023.2.54-61. EDN RYGLTT.
20. Лиханов В. А., Козлов А. Н. Моделирование сажевыделения в дизельном двигателе // Двигателестроение. 2023. № 3 (293). С. 51–60. <https://doi.org/10.18698/jec.2023.3.51-60>.
21. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование процесса сгорания в тракторном дизеле при работе на спирте и растительном масле // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90. № 3. С. 191–200. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-320931>.

