

УДК 621.43

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, СОСТАВ И СТРУКТУРА ЧАСТИЦ САЖИ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

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 физические свойства, состав и структура частиц сажи, образующихся в цилиндре дизельного двигателя. Отмечено, что сажа, содержащаяся в отработавших газах (ОГ) дизеля представляет собой несгоревший в цилиндре двигателя углерод. Частицы сажи ОГ дизельных двигателей негативно влияют как на здоровье человека, так и на экосистему. Показано, что адекватное понимание физических и химических характеристик частиц ОГ дизеля необходимо как для минимизации образования частиц, так и для оптимизации их окисления. Установлено, что интерес представляют основные характеристики твердых частиц (ТЧ), такие как гранулометрический состав, микроструктура агрегатных частиц, первичных частиц, химический состав и окислительная способность ТЧ.

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

PHYSICAL PROPERTIES, COMPOSITION AND STRUCTURE OF SOOT PARTICLES FORMED IN THE DIESEL ENGINE CYLINDER

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 physical properties, composition and structure of soot particles formed in the diesel engine cylinder are considered. It is noted that the soot contained in the diesel exhaust gases is the unburned carbon in the engine cylinder. Diesel engine exhaust soot particles negatively affect both human health and the ecosystem. It is shown that the adequate understanding of physical and chemical characteristics of diesel exhaust gas particles is necessary both to minimize the particles formation and to optimize their oxidation. It has been found out that the main characteristics of solid particles (SP), such as granulometric composition,



microstructure of aggregate particles, primary particles, chemical composition and oxidizing ability of SP are of interest.

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

Сажа, содержащаяся в отработавших газах дизеля, представляет собой несгоревший в цилиндре двигателя углерод. Частицы сажи ОГ дизельных двигателей негативно влияют как на здоровье человека, так и на экосистему [1]. Адекватное понимание физических и химических характеристик частиц ОГ дизеля необходимо как для минимизации образования частиц, так и для оптимизации их окисления. Интерес представляют основные характеристики твердых частиц, такие как гранулометрический состав, микроструктура агрегатных частиц, первичных частиц, химический состав и окислительная способность ТЧ [2].

Морфология и микроструктура агрегатных частиц очень важны для глубокого понимания основных механизмов образования сажи и процессов роста. На рисунке 1 представлены снимки агломератов частиц сажи, сделанных с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ-изображения), на которых видны более или менее разветвленные агрегаты, и каждый агломерат состоит от десятков до сотен сферических или почти сферических первичных частиц [3].

Кроме того, большинство первичных частиц частично перекрываются со своими соседними первичными частицами во время слияния зародышей сажи. Для точного анализа микроструктуры агрегатных частиц определяются размер первичных частиц (d_p) и фрактальная размерность (D_f). Размер первичных частиц (d_p) – это средний диаметр первичных частиц, который может быть визуально определен с помощью ПЭМ-изображений образцов частиц [4].

Фрактальная размерность является полезным параметром для описания структуры агломератов и механизма агломерации. Как правило, более высокое значение D_f представляет собой более сферическую структуру, в то время как



меньшее значение D_f означает менее компактную и более разветвленную морфологию.

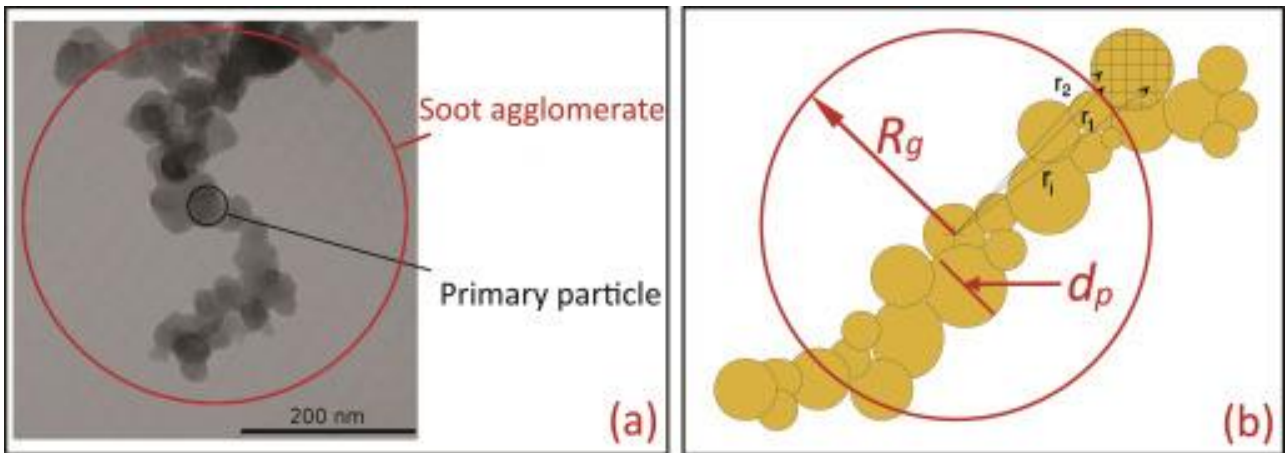


Рисунок 1 – Снимки агломератов сажи: а) с объяснением первичных частиц [3];
б) схема определения размера первичных частиц d_p [4]

На рисунке 2 на наномасштабе показаны две отдельные части первичной частицы сажи: внутреннее ядро и внешняя оболочка [5, 6].

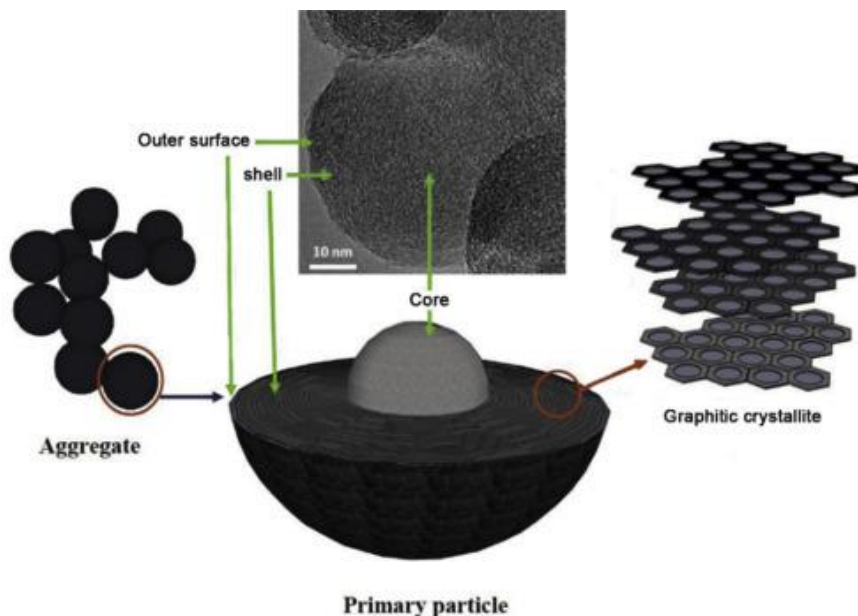


Рисунок 2 – Типичная структура «оболочка-ядро» первичной частицы сажи при сгорании дизельного топлива [5, 6]



Впервые они наблюдались Ishiguro et al. [5]. Кроме того, учеными были охарактеризованы структуры внутреннего ядра и внешней оболочки. Внутреннее ядро содержит несколько мелких частиц с ядром, покрытым углеродными слоями турбостратной структуры. Внешняя оболочка состоит из графитовых кристаллитов, ориентированных параллельно внешней поверхности [5, 6].

Это подтверждается результатами ПЭМ, как показано на рисунке 3 [7]. Таким образом, вдавливание сажи в гранулы является техническим приемом для удаления агрегатной структуры, которая в противном случае затмевает характер рассеяния первичных частиц.

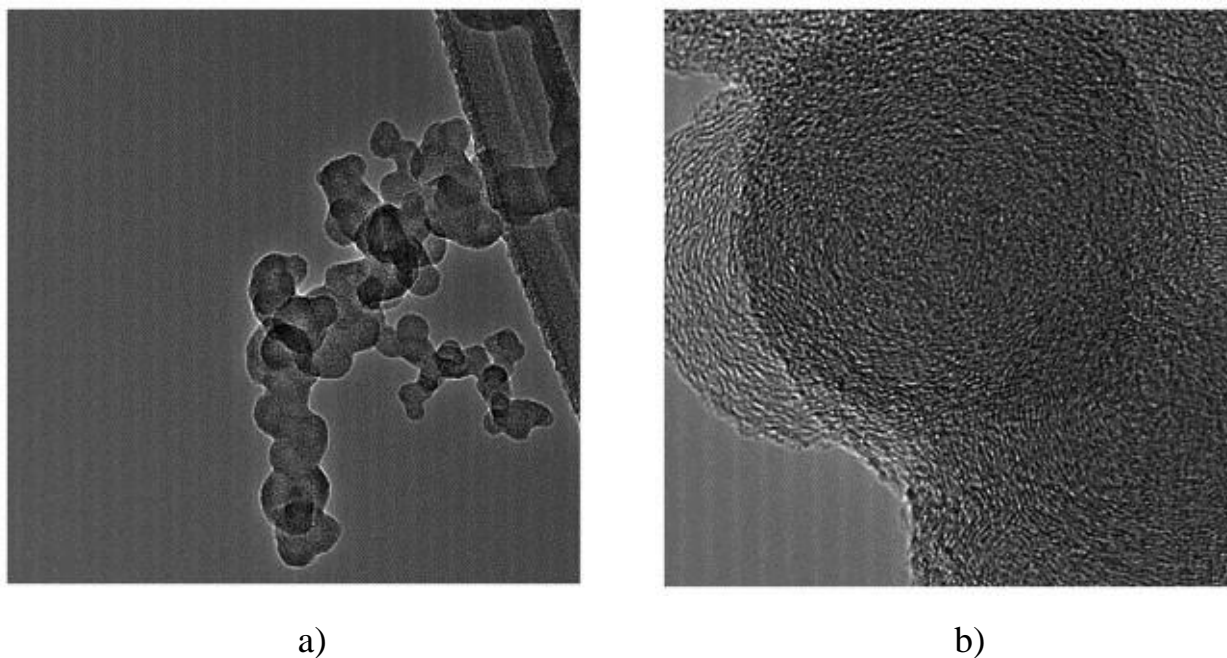


Рисунок 3 – ПЭМ-микрофотографии частиц сажи:

a) агломерат; b) первичная частица [7]

Текущая методология определения размера первичных частиц сажи основана на анализе микрофотографий ПЭМ.

Результаты ПЭМ показывают, что первичные частицы сажи представляют собой глобулы диаметром около 20 нм.



Микрофотографии ПЭМ с большим увеличением также показывают ранее описанные луковичные субъединицы, которые включены в первичные частицы. Они имеют средний размер около 5 нм, и их нелегко различить на необработанных кривых рассеяния МУРР, поскольку такие маленькие частицы будут рассеиваться только при $q \sim 0,1 \text{ \AA}^{-1}$.

Исследования показали, что частицы сажи от сгорания дизельного топлива состоят из ядра элементарного углерода (ЕС) и адсорбированного органического углерода (ОС), а также небольших количеств сульфатов, нитратов, металлов и других микроэлементов [2].

На рисунке 4 представлен общий состав твердых частиц в ОГ. По данным Sharma et al. [8] при 70% нагрузке двигателя он имеет следующее процентное соотношение элементарных компонентов частиц в ОГ (рисунок 4, а); на рисунке 4, б – при 100 %-й нагрузке на двигатель по данным Volkswagen [9].

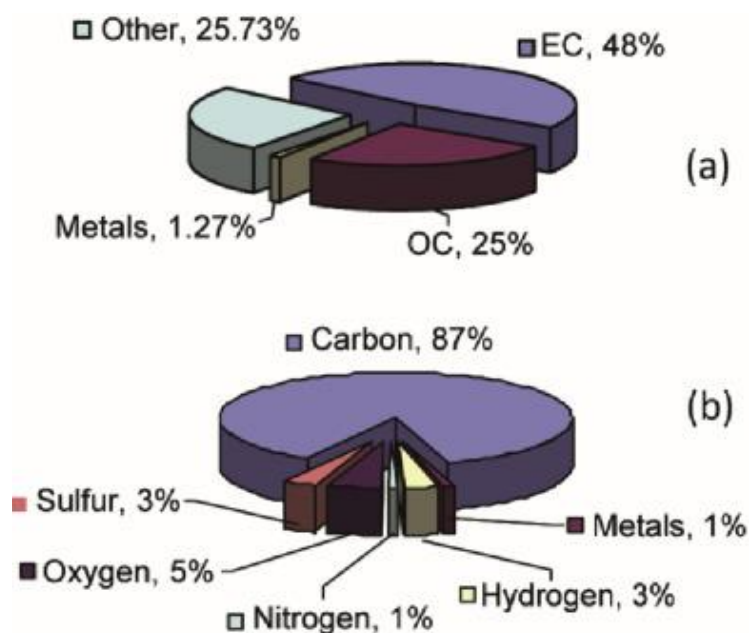


Рисунок 4 – Общий состав твердых частиц сажи: а) при сгорании дизельного топлива при 70% нагрузке двигателя [8]; б) элементы-компоненты дизельных частиц при 100%-й нагрузке двигателя [9]



В современной литературе имеются сведения, что элементный состав твердых частиц влияет на реакционную способность окисления сажи [10].

На рисунке 5 представлены типичные изображения и химический состав ТЧ, выбрасываемых при сгорании легкого дизельного топлива [11].

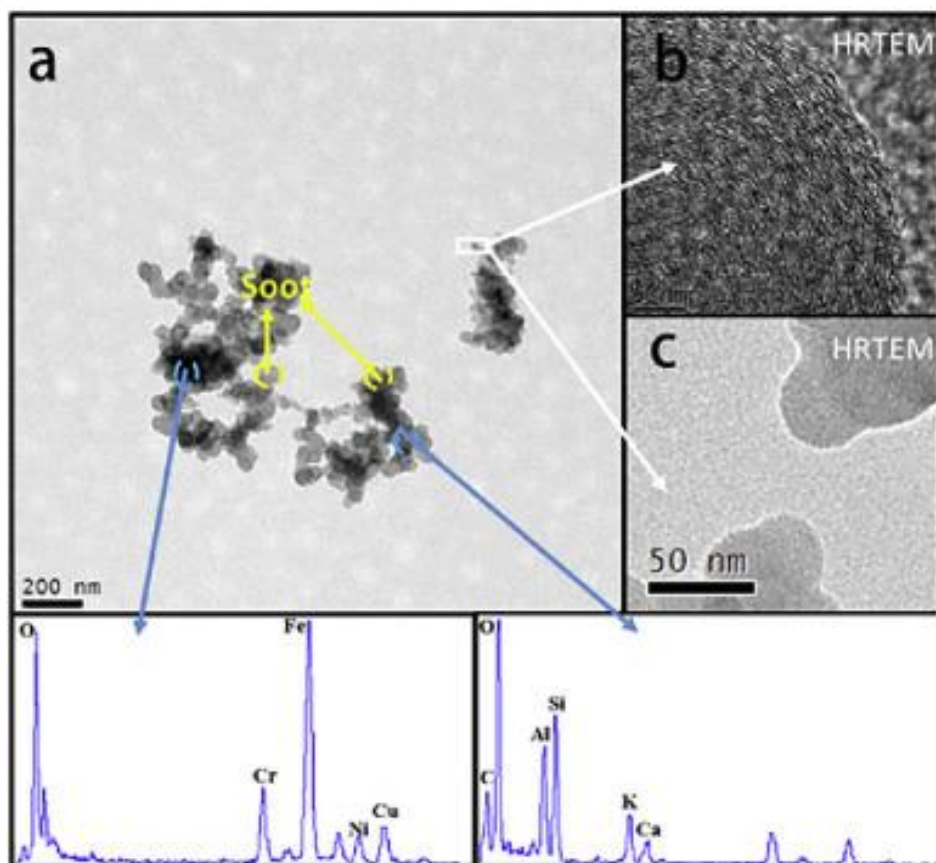


Рисунок 5 – Типичные изображения и химический состав ТЧ, выброшенных с ОГ при сжигании легкого дизельного топлива [11]

По данным Ashraful et al. [12] и других исследователей [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18], например, при работе дизельного двигателя на частотах вращения 1200, 1500, 1800, 2100 и 2400 мин⁻¹ средние концентрации неуглеродистых элементов, включая кислород (O), серу (S), кремний (Si), кальций (Ca), цинк (Zn), хром (Cr), железо (Fe), натрий (Na), магний (Mg) и свинец (Pb), составляли



19,18 мг/г, 3,7 мг/г, 29,6 мг/г, 18 мг/г, 5,34 мг/г, 3,5 мг/г, 4,58 мг/г, 32,12 мг/г, 5,082 мг/г и 0,87 мг/г соответственно.

Выводы. Морфология и микроструктура агрегатных частиц очень важны для глубокого понимания основных механизмов образования сажи и процессов роста. Результаты ПЭМ показывают, что первичные частицы сажи представляют собой глобулы диаметром около 20 нм. Микрофотографии ПЭМ с большим увеличением также показывают ранее описанные луковичные субъединицы, которые включены в первичные частицы. Они имеют средний размер около 5 нм и их нелегко различить на необработанных кривых рассеяния МУРР, поскольку такие маленькие частицы будут рассеиваться только при $q \sim 0,1 \text{ \AA}^{-1}$.

Исследования показали, что частицы сажи от сгорания дизельного топлива состоят из ядра элементарного углерода (ЕС) и адсорбированного органического углерода (ОС), а также небольших количеств сульфатов, нитратов, металлов и других микроэлементов. Имеются сведения, что элементный состав твердых частиц влияет на реакционную способность окисления сажи.

Список источников

1. Лиханов В. А., Сайкин А. М. Снижение токсичности автотракторных дизелей : монография // М. : Агропромиздат, 1991. 208 с.
2. Xiaochen Wang, Ying Wang, Yuanqi Baia, Peng Wang, Yuwei Zhaob An overview of physical and chemical features of diesel exhaust particles / Journal of the Energy Institute. Volume 92, Issue 6, December 2019, pp. 1864-1888. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.11.006>.
3. U. Leidenberger, W. Mühlbauer, S. Lorenz, S. Lehmann, D. Brüggemann Experimental studies on the influence of diesel engine operating parameters on



- properties of emitted soot particles / *Combust. Sci. Technol.*, 184 (2012), pp. 1-15, 10.1080/00102202.2011.611551.
4. K.O. Lee, J. Zhu Effects of Exhaust System Components on Particulate Morphology in a Light-duty Diesel Engine / (2005) SAE Paper 2005-01-0184.
 5. T. Ishiguro, Y. Takatori, K. Akihama Microstructure of diesel soot particles probed by electron microscopy: first observation of inner core and outer shell / *Combust. Flame*, 108 (1997), pp. 231-234, 10.1016/S0010-2180(96)00206-4 ArticleDownload PDFView Record in ScopusGoogle Scholar.
 6. L. Pahalagedara, H. Sharma, C.-H. Kuo, S. Dharmarathna, A. Joshi, S.L. Suib, et al. Structure and oxidation activity correlations for carbon blacks and diesel soot / *Energy Fuels*, 26 (2012), pp. 6757-6764, 10.1021/ef301331b.
 7. Artur Braun, Frank E.Huggins, Sönke Seifert, Jan Ilavsky, Naresh Shah, Kerry E.Kelly, Adel Sarofim, Gerald P.Huffman Size-range analysis of diesel soot with ultra-small angle X-ray scattering / *Combustion and Flame*. Volume 137, Issues 1–2, April 2004, pp. 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.01.003>.
 8. M. Sharma, A. Agarwal, K. Bharathi Characterization of exhaust particulates from diesel engine / *Atmos. Environ.*, 39 (2005), pp. 3023-3028, 10.1016/j.atmosenv.2004.12.047.
 9. Volkswagen / *Unregulated Motor Vehicle Exhaust Gas Components* // (1989). Germany: Volkswagen AG, Research and Development (Physicochemical Metrology).
 - 10.W. Mühlbauer, C. Zöllner, S. Lehmann, S. Lorenz, D. Brüggemann Correlations between physicochemical properties of emitted diesel particulate matter and its reactivity / *Combust. Flame*, 167 (2016), pp. 39-51, 10.1016/j.com-bustflame.2016.02.029.
 - 11.D. Wu, F. Zhang, W. Lou, D. Li, J. Chen Chemical characterization and toxicity assessment of fine particulate matters emitted from the combustion of



- petrol and diesel fuels / *Sci. Total Environ.*, 605–606 (2017), pp. 172-179, 10.1016/j.scitotenv.2017.06.058.
12. А.М. Ashraful, Н.Н. Masjuki, М.А. Kalam Particulate matter, carbon emissions and elemental compositions from a diesel engine exhaust fuelled with diesel-biodiesel blends / *Atmos. Environ.*, 120 (2015), pp. 463-474, 10.1016/j.atmosenv.2015.09.028.
13. 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.
14. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование показателей рабочего процесса быстроходного малоразмерного дизеля при работе на этаноле и рапсовом масле // *Двигателестроение*. 2022. № 2(288). С. 61–71. DOI 10.18698/jec.2022.2.61-71. EDN КАЕРУО.
15. 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.
16. 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.
17. 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>.
18. 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>.

