

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 665.7.035.9 + 001.891.53

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-4-3-16

МЕТОД КОНТРОЛЯ СКЛОННОСТИ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ К НАГАРООБРАЗОВАНИЮ

Адгамов ¹И.Ф., Шаталов ¹К.В., Зверева ²Э.Р.

¹25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России, г. Москва, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
1499090@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Развитие процессов нефтепереработки, появление альтернативных видов топлив для дизельных двигателей, высокая эксплуатационная значимость обуславливают объективную потребность в контроле склонности к нагарообразованию. ЦЕЛЬ. Научное обоснование и разработка высокоинформативного метода контроля, обеспечивающего получение достоверной информации о склонности дизельных топлив к нагарообразованию при их применении в дизелях современной конструкции. МЕТОДЫ. Разработанный метод реализуется на моторной установке ИДТ-90 оснащенной одноцилиндровым дизельным двигателем с разделенной камерой сгорания. Сущность метода заключается в определении массы нагара, образующегося на нагарнике, размещаемом в предкамере, при работе двигателя со степенью сжатия 18,0 ед. в течение 5 мин. Для повышения информативности метода предложен новый оценочный показатель «коэффициент нагарообразования», который характеризует уровень склонности испытуемого топлива к нагарообразованию по отношению к контрольному топливу, имеющему минимально возможное значение данного свойства. РЕЗУЛЬТАТЫ. Экспериментально подтверждена чувствительность разработанного метода к изменению компонентного и углеводородного состава топлива - значение коэффициента нагарообразования повышается по мере роста содержания ароматических углеводородов и «утяжеления» фракционного состава дизельного топлива. Расчет критериев подобия и экспериментально установленная корреляция между результатами испытаний топлив на одноцилиндровом дизеле моторной установки ИДТ-90 с разделенной камерой сгорания и в условиях полноразмерного дизеля Д-245.12С с неразделенной камерой сгорания, доказывают адекватность и достоверность результатов, получаемых по разработанному методу. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. С 2022 г. разработанный метод используется при проведении лабораторно-стендовых испытаний новых и модернизированных марок дизельных топлив для контроля их склонности к нагарообразованию.

Ключевые слова: метод контроля; дизельное топливо; нагар; склонность к образованию отложений в камере сгорания; дизель с разделенной камерой сгорания; критерий подобия.

Для цитирования: Адгамов И.Ф., Шаталов К.В., Зверева Э.Р. Метод контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 4. С. 3-16. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-3-16.

A METHOD FOR CONTROLLING THE PROPENSITY OF DIESEL FUELS TO CARBON FORMATION

Adgamov ¹I.F., Shatalov ¹K.V., Zvereva ²E.R.

¹ 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow, Russia

² Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: *RELEVANCE.* The development of oil refining processes, the emergence of alternative fuels for diesel engines, and their high operational importance determine the objective need to control the propensity of diesel engines to form carbon deposits. *PURPOSE.* Scientific substantiation and development of a highly informative control method that provides reliable information about the propensity of diesel fuels to form carbon deposits when used in modern diesel engines. *METHODS.* The developed method is implemented on the basis of a single-cylinder diesel engine with a variable compression ratio and a divided combustion chamber, designed to determine the cetane numbers of diesel fuels. The essence of the method is to determine the mass of carbon deposits formed on the evaluation element, additionally installed in the pre-chamber, when the engine is operating with a compression ratio of 18.0 units. within 5 minutes, with the calculation of the "carbonation coefficient", which characterizes the level of propensity of the test fuel to carbonation in relation to the control fuel, which has the lowest possible value of this property. *RESULTS.* The sensitivity of the developed method to changes in the component and hydrocarbon composition of fuel has been experimentally confirmed. The value of the carbonation coefficient increases as the content of aromatic hydrocarbons increases and the fractional composition of diesel fuel becomes heavier. The calculation of similarity criteria and the experimentally established correlation between the results of fuel tests on a single-cylinder diesel engine IDT-90 with a divided combustion chamber and in conditions of a full-size diesel engine D-245.12C with an undivided combustion chamber, prove the adequacy and reliability of the results obtained by the developed method. *CONCLUSION.* Since 2022, the method has been used in conducting laboratory and bench tests of new and upgraded brands of diesel fuels to control their tendency to carbonation.

Keywords: control method; diesel fuel; carbon deposits; tendency to deposit in the combustion chamber; diesel engine with a split combustion chamber; similarity criterion.

For citation: Adgamov I.F., Shatalov K.V., Zvereva E.R. A method for controlling the propensity of diesel fuels to carbon formation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (4): 3-16. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-3-16.

Введение (Introduction)

Производство дизельных топлив в настоящее время характеризуется многообразием используемых технологий, вовлечением в их состав фракций вторичной переработки, содержащих повышенное количество непредельных и ароматических углеводородов, что способствует повышенному нагарообразованию на днище поршня и стенках камеры сгорания. Вовлечение в состав дизельного топлива компонентов биологического происхождения (эфиров жирных кислот, масел растительного происхождения и т.п.) также приводит к росту склонности топлив к нагарообразованию [1-3].

Увеличение количества нагара в камере сгорания приводит к целому ряду отрицательных последствий, снижающих эффективность и надежность работы двигателя [4,5]. Во-первых, нагар ухудшает теплоотвод от деталей цилиндропоршневой группы и приводит к увеличению интенсивности их нагрева, в отдельных случаях это может приводить к оплавлению и растрескиванию поршней, перегреву и деформации головки блока цилиндров. Во-вторых, образовавшийся нагар уменьшает геометрические размеры камеры сгорания, что приводит к увеличению степени сжатия, изменению максимального давления цикла и средней скорости нарастания давления. Расчеты показывают, что при отложениях нагара на днище поршня толщиной 0,75 - 1,00 мм среднее давление цикла и средняя скорость нарастания давления увеличиваются более чем на 20 %, что приводит к повышению «жесткости» работы дизеля [6,7]. В-третьих, нагар, образующийся на верхней кромке поршня и его огневом пояске имеет повышенную твердость, что приводит к повышенному износу цилиндров.

Известно, что образование нагара и сажи в камере сгорания являются взаимосвязанными процессами [8,9]. Соответственно, повышенная склонность топлива к нагарообразованию приводит к увеличению количества сажи, образующейся при сгорании топлива, что оказывает непосредственное влияние на дымность отработавших газов и экологические характеристики техники.

Из приведенных данных следует, что склонность к образованию отложений является важной характеристикой дизельных топлив, оказывающей непосредственное влияние на надежность работы и экологические характеристики техники. Поэтому при разработке новых (совершенствовании существующих) составов дизельного топлива, в том числе с вовлечением биокomпонентов, необходимо контролировать склонность топлив к нагарообразованию. В связи с этим, актуальными являются работы, направленные на разработку методов контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию.

Цель исследований заключается в разработке высокоинформативного метода контроля, обеспечивающего получение достоверной информации о склонности дизельных топлив к нагарообразованию при их применении в дизелях современной конструкции.

Литературный обзор (Literature Review)

Известные методы контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию можно разделить на лабораторные и моторные. К широко известным лабораторным относятся методы определения зольности по ГОСТ 1461 (ASTM D 482) «Нефть и нефтепродукты. Метод определения зольности» и коксуемость 10 %-ного остатка по ГОСТ 19932 (ASTM D 189) «Нефтепродукты. Определение коксуемости методом Конрадсона» [10,11]. Указанные методы лишь косвенно характеризуют склонность дизельных топлив к нагарообразованию, не учитывают механизм и условия образования нагара в двигателе внутреннего сгорания, а, следовательно, не позволяют достоверно характеризовать, то какое реальное количество нагара образует испытуемое топливо в условиях реального применения. Так, в работе [11 С.302] отмечено – «ранее считалось, что существует определенная корреляция между коксуемостью и образованием отложений на соплах форсунок, но сегодня эта точка зрения считается чрезмерным упрощением».

В литературе описан лабораторный способ оценки склонности дизельных топлив к образованию высокотемпературных отложений, который предусматривает подачу топлива в капельножидком состоянии при атмосферном давлении в воздух, нагретый до температуры рабочего заряда двигателя, с интервалом, равным времени свободного падения капли, в течение которого происходит нагрев, испарение, воспламенение, горение и термоокислительное превращение капли топлива, последующее измерение массы отложений на выполненной из каталитически активного материала нагреваемой пластине, установленной под углом 15-45° к горизонтальной поверхности [12]. Основным недостатком данного способа является его теоретический характер, фактическое отсутствие лабораторно-стендового оборудования для его реализации на практике.

Известны моторные методы контроля склонности дизельных топлив к образованию отложений на одноцилиндровых моторных установках ИТ9-3, НАМИ-2ДК [10] и на двухцилиндровом дизельном двигателе воздушного охлаждения Д-21 [13]. К настоящему времени указанные моторные установки и стенды утратили работоспособность и были демонтированы. Наиболее удачным из них был метод, реализованный на моторной установке ИТ9-3, оснащенной одноцилиндровым дизелем с разделенной камерой сгорания (далее – метод ПЗИ) [10]. В отличие от других моторных методов метод ПЗИ позволял получать нагар на оценочном элементе, размещаемом в предкамере, только за счет сгорания топлива¹. Конструктивное исполнение двигателей с раздельной камерой сгорания полностью исключает попадание моторного масла в предкамеру. Моторная установка ИТ9-3, на которой основан метод ПЗИ, была предназначена для определения цетановых чисел дизельных топлив и массово изготавливалась в 50 – 70-ые годы XX века. С 1973 г. их заменили более совершенные моторные установки ИДТ-69, а затем ИДТ-90. Выработка ресурса и демонтаж моторных установок ИТ9-привели к фактической утрате метода ПЗИ.

Методы (Methods)

Идея контроля склонности дизельных топлив к образованию отложений в двигателях с разделенной камерой сгорания, реализованная в методе ПЗИ, является наиболее перспективной, т.к. без дополнительных усилий позволяет получать нагар, образованный только в результате сгорания топлива, полностью исключая влияние моторного масла. В настоящее время для исследователей наиболее доступным двигателем с разделенной камерой сгорания является одноцилиндровый дизель с переменной степенью сжатия моторной установки для определения цетановых чисел типа ИДТ-90 (Россия), Waukesha CFR F-5 (США), SKY 2303 (Китай), который имеет рабочий объем 0,65 дм³, диаметр цилиндра 85 мм, ход поршня 115 мм и степень сжатия от 7 до 23 (далее – двигатель ИДТ-90). Конструктивной особенностью такого двигателя является наличие предкамеры, в

¹ В двигателях с «традиционной» неразделенной камерой сгорания на образование нагара, оказывает влияние как топливо, так и моторное масло. В результате насосного действия поршневых колец моторное масло попадает на днище поршня, что увеличивает образование нагара на поверхности камеры сгорания.

которую осуществляется впрыск топлива. В предкамере начинается процесс воспламенения топлива. Далее горящая топливовоздушная смесь по специальному тангенциально расположенному каналу перетекает в основную камеру сгорания, в которой происходит ее догорание.

Однако такая конструкция камеры сгорания не является характерной для современных дизелей, поэтому для подтверждения возможности контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию в условиях двигателя ИДТ-90 был проведен расчет подобия процесса нагарообразования в разделенной камере (модельные условия) и в «традиционной» неразделенной камере сгорания (реальные условия). В качестве объекта сравнения был выбран четырехцилиндровый быстроходный дизель Д-245.12С (рабочий объем 4,75 дм³, диаметр цилиндра 110 мм, ход поршня 125 мм, степень сжатия 15,1).

В соответствии с положениями теории подобия [14], если модель и реальный объект подобны, то они описываются одинаковыми критериальными уравнениями (критериями подобия), при этом критерии подобия должны быть тождественны. Так как аналитический вид уравнения процесса нагарообразования неизвестен, то для получения критериев подобия был использован метод анализа размерностей, позволяющий получить обобщенные переменные на основе определительных уравнений (формул размерности).

Изучение механизма образования нагара в камере сгорания дизельного двигателя позволило определить факторы в наибольшей степени, влияющие на данный процесс:

- 1) время работы двигателя – t , с;
- 2) давление впрыска топлива – $P_{впр}$, МПа;
- 3) давление в цилиндре в конце такта сжатия – P_c , МПа;
- 4) температура в цилиндре в конце такта сжатия – T_c , К;
- 5) температура поверхности днища поршня – $T_{п}$, К;
- 6) масса топлива, поступившего в цилиндр двигателя за один рабочий цикл – m_T , кг;
- 7) масса воздуха поступившего в цилиндр двигателя за один рабочий цикл – m_B , кг;
- 8) положение поршня относительно верхней мертвой точки (далее – ВМТ) в момент впрыска топлива – расстояние между ВМТ и поршнем в момент впрыска топлива в камеру сгорания – Δ , мм до ВМТ;
- 9) угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя – ω , с⁻¹;
- 10) коэффициент поверхностного натяжения топлива – $\sigma_{пов}$, Н/м²;
- 11) динамическая вязкость топлива – μ , Па·с;
- 12) средний диаметр топливных капель, распыленных в камере сгорания – $d_{ср}$, м).

Соотношение, отражающее существенные связи между влияющими факторами, имеет вид:

$$f(t, P_{впр}, P_c, T_c, T_{п}, m_T, m_B, \Delta, \omega, \sigma_{пов}, \mu, d_{ср}) = 0, \quad (1)$$

Размерности выбранных параметров в системе единиц СИ имеют вид:

$$\begin{aligned} \dim t &= [T], & \dim P_{впр} &= [M][L]^{-1}[T]^{-2}, & \dim P_c &= [M][L]^{-1}[T]^{-2}, & \dim T_c &= [Q], \\ \dim T_{п} &= [Q], & \dim m_T &= [M], & \dim m_B &= [M], & \dim \Delta &= [L], \\ \dim \omega &= [T]^{-1}, & \dim \sigma_{пов} &= [M][T]^{-2}, & \dim \mu &= [M][L]^{-1}[T]^{-1}, & \dim d_{ср} &= [L], \end{aligned}$$

где $[T]$, $[M]$, $[L]$, $[Q]$ – размерности основных единиц в системе СИ: время, с; масса, кг; длина, м; термодинамическая температура, К.

Из представленных 12 параметров были выбраны 4 независимых параметров ($k = 4$), имеющих размерности основных единиц в системе СИ [L – длина, M – масса, T – время, Q – температура]:

$$k = f(d_{ср}, m_T, t, T_c). \quad (2)$$

Тогда группа зависимых параметров будет включать в себя 8 параметров ($m = 12 - 4 = 8$):

$$f(P_{впр}, P_c, T_{п}, m_B, \Delta, \omega, \sigma_{пов}, \mu) = 0. \quad (3)$$

По результатам расчетов получены следующие критерии подобия:

$$\begin{aligned} \pi_{P_{впр}} &= \frac{P_{впр} \cdot d_{ср} \cdot t^2}{m_T}; & \pi_{P_c} &= \frac{P_c \cdot d_{ср} \cdot t^2}{m_T}; & \pi_{T_{п}} &= \frac{T_{п}}{T_c}; & \pi_{m_B} &= \frac{m_B}{m_T}; \\ \pi_{\Delta} &= \frac{\Delta}{d_{ср}}; & \pi_{\omega} &= \omega \cdot t; & \pi_{\sigma_{пов}} &= \frac{\sigma_{пов} \cdot t^2}{m_T}; & \pi_{\mu} &= \frac{\mu \cdot d_{ср} \cdot t}{m_T}. \end{aligned}$$

Произведя математические преобразования путем перемножения и деления критериев, в соответствии с положениями, изложенными в работах [15,16], получаем обобщенный критерий подобия:

$$\pi_{об} = \frac{P_{впр} \cdot m_B \cdot \sigma_{пов} \cdot T_{п}}{P_c \cdot m_T \cdot \Delta \cdot \omega \cdot \mu \cdot T_c}. \quad (4)$$

Для приближенного подобия процесса нагарообразования в одноцилиндровом дизеле с разделенной камерой сгорания (моторной установки ИДТ-90) и четырехцилиндровом дизеле с неразделенной камерой сгорания (Д-245.12С) в качестве условий однозначности выбраны следующие параметры:

$$\frac{\sigma_{\text{пов}}}{\sigma_{\text{пов}}^*} = idem, \quad \frac{\mu}{\mu^*} = idem,$$

где $\sigma_{\text{пов}}$, $\sigma_{\text{пов}}^*$ – коэффициент поверхностного натяжения топлива в натурных и модельных условиях, Н/м²; μ , μ^* – динамическая вязкость топлива в натурных и модельных условиях, Па·с.

Исходные данные для расчета обобщенного критерия подобия (таблица 1) были получены расчетным путем с использованием программного комплекса «Дизель-РК» [17]. Подстановкой в формулу (4) данных из таблицы 1 были получены значения обобщенного критерия подобия для сравниваемых двигателей:

- для одноцилиндрового дизеля с разделенной камерой сгорания (ИДТ-90):

$$\pi_{\text{об}}^{\text{ИДТ-90}} = 1428,0 \dots 1728,8;$$

- для четырехцилиндровом дизеля с неразделенной камерой сгорания (Д-245.12С):

$$\pi_{\text{об}}^{\text{Д-245}} = 1483,5 \dots 1696,0.$$

Таблица 1

Table 1

Исходные данные для расчета обобщенного критерия подобия

The initial data for calculating the generalized similarity criterion

Наименование параметра	Значение	
	Одноцилиндровый дизель ИДТ-90	Четырехцилиндровый дизель Д-245.12С
Давление впрыска топлива, $P_{\text{впр}}$, кг·м ⁻¹ ·с ⁻²	$10,0 \cdot 10^6 - 10,6 \cdot 10^6$	$21,6 \cdot 10^6 - 22,4 \cdot 10^6$
Давление в цилиндре в конце такта сжатия, P_c , кг·м ⁻¹ ·с ⁻²	$5,0 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^6$
Температура в цилиндре в конце такта сжатия, T_c , К	800-840	1040-1080
Средняя температура поверхности поршня, T_p , К	570-620	650-690
Масса топлива, поступившего в цилиндр двигателя за один рабочий цикл, m_f , кг	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$
Масса воздуха поступившего в цилиндр двигателя за один рабочий цикл m_a , кг	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Расстояние между ВМТ и поршнем в момент впрыска топлива в камеру сгорания Δ , м	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
Угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя ω , с ⁻¹	94,2	209,3
Коэффициент поверхностного натяжения топлива, $\sigma_{\text{пов}}$, кг·с ⁻²	$28,4 \cdot 10^{-3}$	$28,4 \cdot 10^{-3}$
Динамическая вязкость топлива, μ , кг·м ⁻¹ ·с ⁻²	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании проведенного расчета обобщенного критерия подобия (4) можно сделать следующие выводы.

1) Диапазон значений обобщенного критерия подобия для дизеля Д-245 входит в диапазон значений обобщенного критерия подобия для дизеля ИДТ-90. Следовательно, одноцилиндровый дизель ИДТ-90 с разделенной камерой сгорания (модель) подобен полноразмерному дизелю Д-245.12С с неразделенной камерой сгорания (реальный объект), также следует признать подобными и процессы нагарообразования в модели (двигателе моторной установки ИДТ-90) и реальном объекте (полноразмерном дизеле).

2) Отличия в конструкции модели и реального объекта не носят принципиального характера и не влияют на процесс нагарообразования, следовательно, одноцилиндровый дизель ИДТ-90 с разделенной камерой сгорания может использоваться для исследования процесса нагарообразования в полноразмерных дизелях с неразделенной камерой сгорания.

Следующим этапом работ было обоснование режима испытаний при контроле склонности дизельных топлив к нагарообразованию. Опираясь на опыт применения метода ПЗИ и учитывая технические возможности моторной установки ИДТ-90, в качестве базовых были приняты стандартные условия, используемые при контроле цетановых чисел дизельных топлив:

частота вращения коленчатого вала	$15 \pm 0,15 \text{ с}^{-1}$;
угол опережения впрыска топлива	13 град. до ВМТ;
расход топлива	$0,22 \pm 0,08 \text{ см}^3/\text{с}$;
температура воздуха на впуске в двигатель	$65 \pm 1^\circ\text{C}$;
температура воды, охлаждающей цилиндр	$100 \pm 2^\circ\text{C}$;

температура воды, охлаждающей форсунку $38\pm 3^{\circ}\text{C}$;
температура масла в картере двигателя $50\text{--}65^{\circ}\text{C}$.

Исходя из технических характеристик современных и перспективных автотранспортных дизелей, для проведения испытания было выбрано значение степени сжатия равное 18,0 ед., что соответствует максимальному значению степени сжатия в современных дизелях повышенной литровой мощности.

При определении продолжительности испытания учитывали тот факт, что на постоянном режиме работы двигателя количество нагара вначале постоянно увеличивается, затем его рост прекращается и устанавливается равновесное состояние. Причиной является постоянный контакт слоя нагара с раскаленными газами, имеющими температуру 1200 – 1300 $^{\circ}\text{C}$, в результате которого избыточная часть нагара выгорает и с отработавшими газами удаляется из камеры сгорания. Поэтому было необходимо экспериментально найти продолжительность работы двигателя моторной установки ИДТ-90, при которой достигается равновесие между накоплением и выгоранием нагара. Эксперимент проводился на летнем дизельном топливе сорта С экологического класса 5 (ДТ-Л-К5 по ГОСТ 32511–2013), результаты представлены на рисунке 1.

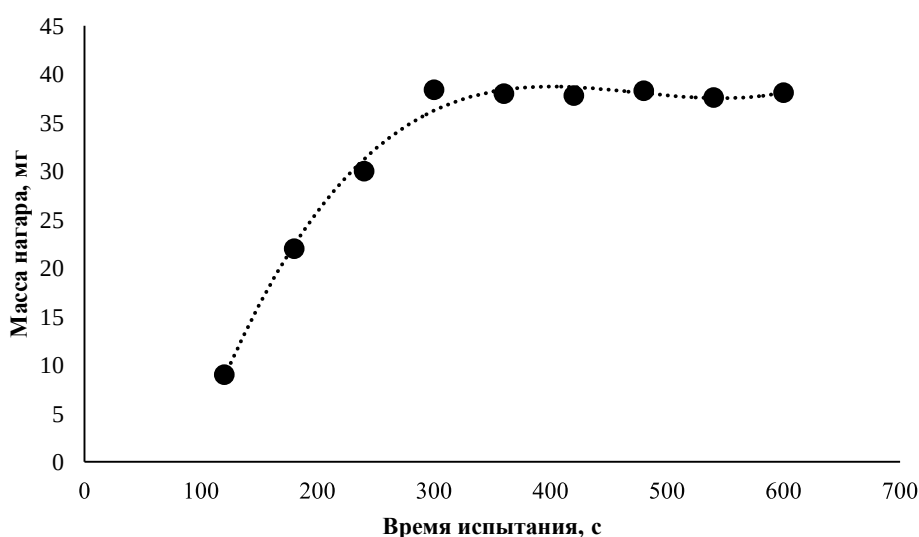


Рис.1. Изменение массы нагара в зависимости от времени испытания
Fig.1. Change in the mass of carbon deposits depending on the test time

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Установлено, что накопление нагара идет в течении первых 300 секунд испытания, затем его количество практически не изменяется. При продолжительности испытаний от 300 до 600 секунд масса нагара колеблется в пределах от 37,6 до 38,4 мг. Следовательно, после 300 секунд сгорания топлива наступает равновесие между накоплением и выгоранием нагара, и данное значение целесообразно принять в качестве продолжительности испытания.

Таким образом, для контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию обоснованы параметры работы моторной установки ИДТ-90, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Параметры работы моторной установке ИДТ-90 при контроле склонности дизельных топлив к нагарообразованию

Operating parameters of the IDT-90 engine unit when controlling the propensity of diesel fuels to carbon formation

Показатель	Значение
Частота вращения коленчатого вала, с^{-1}	$15\pm 0,15$
Степень сжатия двигателя, ед.	18,0
Угол опережения впрыска топлива, град. до ВМТ	13
Расход топлива, $\text{см}^3/\text{с}$	$0,22\pm 0,08$
Температура воздуха на впуске в двигатель, $^{\circ}\text{C}$	65 ± 1
Температура воды, охлаждающей цилиндр, $^{\circ}\text{C}$	100 ± 2

Температура воды, охлаждающей форсунку, °С	38±3
Температура масла в картере двигателя, °С	50-65
Продолжительность испытаний, мин	5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Важным вопросом при разработке метода контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию является выбор контролируемых показателей. Объективной характеристикой, описывающей склонность топлив к нагарообразованию, является масса нагара (m_n), образующаяся в камере сгорания в регламентированных условиях испытания:

$$m_n = m_{\text{итог}} - m_{\text{исх}} \quad (5)$$

где $m_{\text{итог}}$ – масса нагарника с нагаром (после работы двигателя на топливе), мг; $m_{\text{исх}}$ – масса чистого нагарника, мг.

Для определения массы нагара использован способ, ранее применявшийся в методе ПЗИ – в предкамеру двигателя моторной установки ИДТ-90 дополнительно устанавливается быстросъемный оценочный элемент (далее – нагарник), а масса нагара рассчитывается как разность массы нагарника до и после испытания. Нагарник представляет собой алюминиевый диск, в котором на наружной и боковой сторонах выточены концентрические канавки для увеличения площади поверхности, контактирующей с продуктами сгорания топлива (рис. 2). Нагарник 6 крепится винтом к днищу поршня 7 механизма изменения степени сжатия 8 и при установке вместе с механизмом в предкамеру 5 располагается напротив форсунки 4 (рис.3).

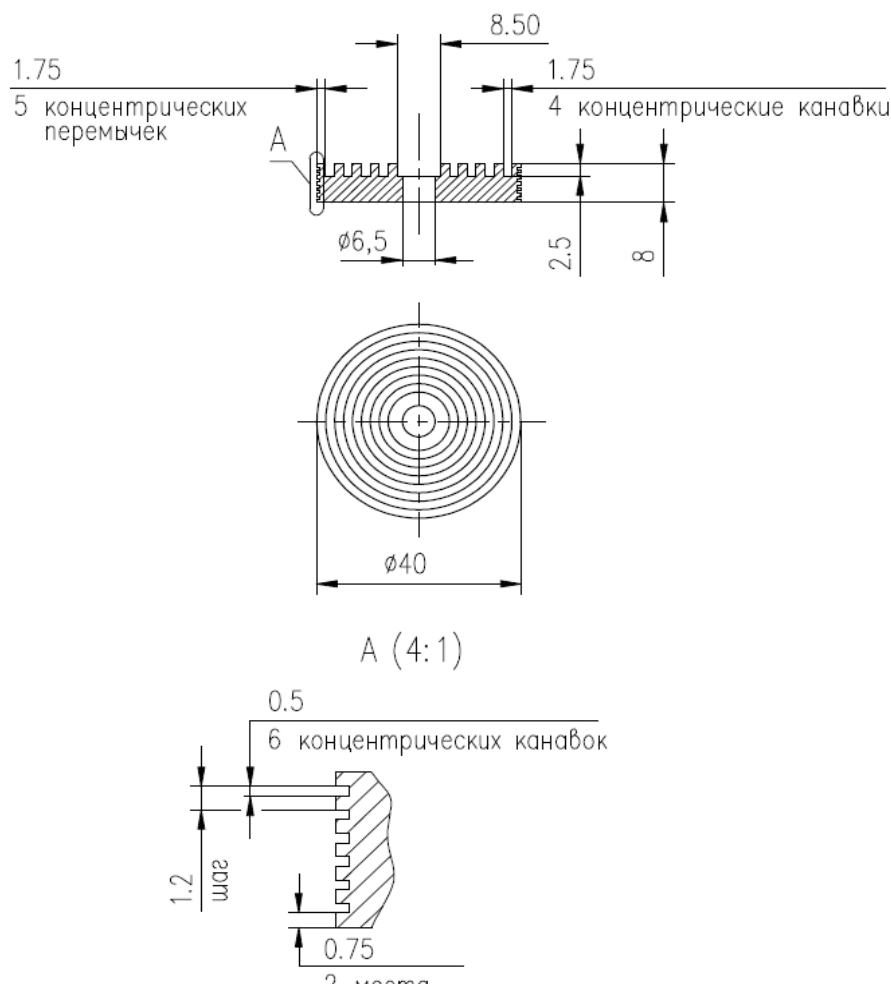


Рис.2. Чертеж нагарника

Fig.2. Plan of the evaluation element to be installed in the combustion chamber

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Минусом показателя «масса нагара» является его недостаточная информативность, затруднения в сравнительной оценке полученных результатов. Например, образование 50 мг нагара это много или мало? Для повышения информативности метода контроля склонность дизельного топлива к нагарообразованию предложен относительный показатель – коэффициент нагарообразования, (K_n), который позволяет оценить во сколько раз склонность к нагарообразованию испытуемого топлива выше аналогичной характеристики

контрольного топлива, имеющего минимально возможное значение склонности к нагарообразованию для современных дизельных топлив. Например, если $K_n = 2,5$ ед., то склонность испытуемого топлива к нагарообразованию в 2,5 раза превышает минимально возможное значение аналогичного показателя для товарных дизельных топлив. Переход от абсолютной формы выражения результата испытания (масса нагара) к относительной (коэффициент нагарообразования) позволяет четко ранжировать дизельные топлива друг относительно друга по склонности к нагарообразованию и облегчить пользователю интерпретацию наблюдаемых результатов. Значение коэффициента нагарообразования рассчитывается как отношение массы нагара на испытуемом топливе к массе нагара на контрольном топливе:

$$K_n = \frac{m_1}{m_2}, \quad (6)$$

где m_1 – масса нагара, образованная на нагарнике при работе на испытуемом топливе, мг;
 m_2 – масса нагара, образованная на нагарнике при работе на контрольном топливе, мг.

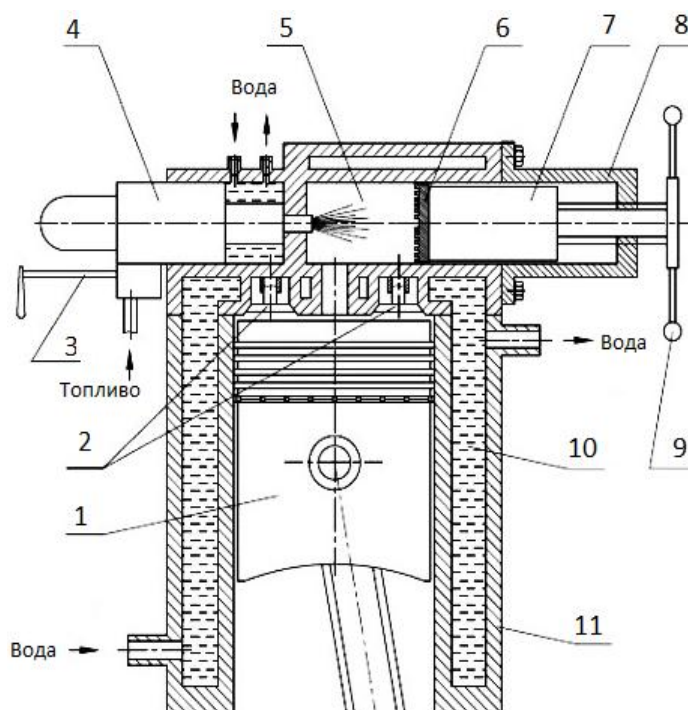


Рис.3. Схема установки нагарника в камеру сгорания: 1 – поршень двигателя; 2 – клапаны; 3 – кран отключения подачи топлива в форсунку; 4 – форсунка; 5 – предкамера; 6 – нагарник; 7 – поршень; 8 – механизм изменения степени сжатия; 9 – штурвал регулировки степени сжатия; 10 – рубашка охлаждения; 11 – цилиндр двигателя

Fig.3. Installation diagram of the evaluation element in the combustion chamber: 1 – engine piston; 2 – valves; 3 – fuel supply shut-off valve to the nozzle; 4 – nozzle; 5 – pre-chamber; 6 – evaluation element; 7 – piston; 8 – mechanism for changing the compression ratio; 9 – steering wheel for adjusting the compression ratio; 10 – cooling jacket; 11 – engine cylinder

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Использование в качестве контрольного топлива того или иного товарного дизельного топлива, выпускаемого отечественной нефтеперерабатывающей промышленностью нецелесообразно из-за наличия стохастических изменений в значениях показателей, характеризующих склонность к нагарообразованию, по причине вариаций в составе сырья, поступающего на переработку, и технологических режимов нефтепереработки. Стабильные, постоянные значения показателей, характеризующих склонность к нагарообразованию, могут иметь только индивидуальные углеводороды или их смеси. Экспериментально было установлено, что минимальную склонность к нагарообразованию имеет двухкомпонентная смесь, состоящая из декагидронафталина (декалина) и н-гексадекана (цетана) в объемном соотношении 4:1. Учитывая большую важность значения массы нагара m_2 , образующегося при работе на контрольном топливе, был проведен специальный эксперимент с привлечением двух операторов, работавших на двух разных моторных установках ИДТ-90. Каждый оператор провел по 20 испытаний, включающих по два параллельных определения. Статистическая обработка полученных

результатов позволила с высоким уровнем достоверности установить, что для контрольного топлива, состоящего из 80% декалина и 20 % цетана, $m_2 = 17,1 \pm 0,6$ мг. Соответственно, формулу (6) можно представить в упрощенном виде:

$$K_n = \frac{m_1}{17,1}. \quad (7)$$

Необходимо отметить, что аналогичное количество нагара, практически совпадающее с $m_2 = 17,1 \pm 0,6$ мг, характерно для товарных арктических дизельных топлив с предельной температурой фильтруемости ниже минус 45 °С.

Таким образом, был разработан метод контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию [18], который включает два основных этапа работы – подготовка к испытанию и собственно испытание на моторной установке ИДТ-90. Подготовка к испытаниям предусматривает следующее:

- отбор пробы дизельного топлива в количестве 1,0 дм³ и его фильтрация через фильтровальную бумагу;

- очистка нагарников;

- контроль технического состояния моторной установки ИДТ-90К

Очистка нагарников проводится путем выдержки их в муфельной печи при температуре 400 – 450 °С в течение 4 часов, с последующим удалением остатков нагара путем обработки в ультразвуковой ванне в дистиллированной воде в течение 30 минут.

Контроль технического состояния моторной установки ИДТ-90 осуществляется путем испытания контрольного топлива. Если полученное значение массы нагара находится в интервале от 16,5 до 17,7 мг, то моторная установка ИДТ-90 считается пригодной к проведению испытаний.

Испытание проводят следующим образом. С использованием вспомогательного топлива (любое дизельное топливо) запускают двигатель моторной установки ИДТ-90 и прогревают его до достижения температуры охлаждающей жидкости (100±2) °С. Переводят двигатель на работу на контрольном топливе, на котором необходимо отработать не менее 10 мин для полной замены вспомогательного топлива в топливной системе, после чего проводят необходимые регулировки и останавливают двигатель. Отсоединяют от предкамеры механизм изменения степени сжатия. Удаляют (кистью или медным скребком) нагар с внутренней поверхности предкамеры, днища поршня механизма изменения степени сжатия и форсунки. Закрепляют винтом подготовленный нагарник и устанавливают собранный механизм изменения степени сжатия на место. Затем выставляют степень сжатия, равную 18,0 ед., и приступают непосредственно к проведению испытаний. Запускают двигатель и одновременно включают секундомер. Через 300 секунд отключают подачу контрольного топлива и останавливают двигатель. Отсоединяют от предкамеры механизм изменения степени сжатия, демонтируют нагарник и помещают его в эксикатор. Запускают двигатель, переводят на работу на испытуемом топливе, на котором необходимо отработать не менее 10 мин для полной замены контрольного топлива в топливной системе. После чего останавливают двигатель, демонтируют механизм изменения степени сжатия и устанавливают нагарник. Повторяют вышеперечисленные действия на испытуемом топливе, получают второй нагарник и помещают его в эксикатор. После охлаждения нагарники взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,1 мг и проводят расчеты по формулам (5) и (7). Изменение внешнего вида нагарников в ходе испытаний показано на рисунке 4.

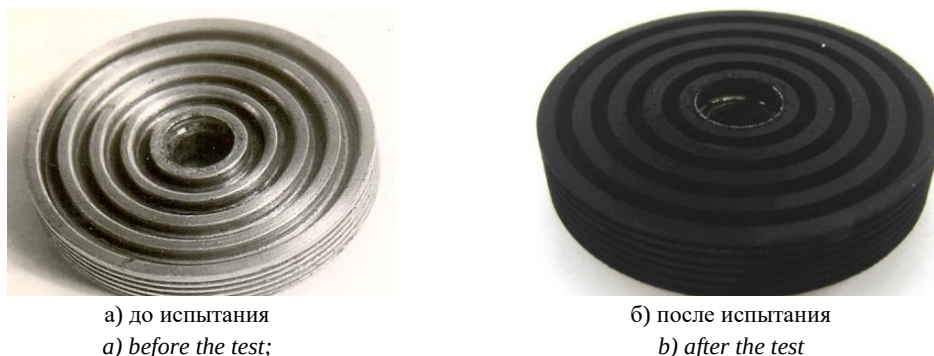


Рис. 4. Общий вид нагарника: а) до испытания;
б) после испытания

Fig.4. General view of the evaluation element:
a) before the test; b) after the test

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

В ходе валидации было установлено, что разработанный метод контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию чувствителен к изменению компонентного и углеводородного состава топлива. В качестве объектов исследования использовались основные марки дизельного топлива ЕВРО экологического класса К5 по ГОСТ 32511, производимые в РФ (таблица 3). Отобранные образцы топлива отличаются по низкотемпературным свойствам (предельной температуре фильтруемости и температуре помутнения), физическим свойствам (плотности, фракционному составу), воспламеняемости (цетановому числу) и углеводородному составу (массовой доле полициклических ароматических углеводородов).

Установлено, что склонность топлив к нагарообразованию снижается по мере «облегчения» фракционного состава, снижения плотности, воспламеняемости, содержания полициклических ароматических углеводородов (таблица 4). Так, летнее топливо ДТ-Л-К5, как самое «тяжелое» топливо, имеет максимальное значение коэффициента нагарообразования ($K_n = 2,95$), а самое «легкое» арктическое топливо имеет минимальное значение коэффициента нагарообразования ($K_n = 1,0$).

Таблица 3

Table 3

Характеристика объектов исследования

Characteristics of research objects

Наименование показателя	Топливо ДТ-Л-К5	Топливо ДТ-З-К5	Топливо ДТ-А-К5
Цетановое число	54,0	51,0	47,0
Плотность при 15°C, кг/м ³	837,1	823,5	813,2
Фракционный состав:			
- при температуре 250°C перегоняется, % об.	26	54	-
- до 180 °C перегоняется, % об.	-	-	5,0
- при температуре 350°C перегоняется, % об.	93	-	-
- до 340 °C перегоняется, % об.	-	-	более 98,0
- 95 % об. перегоняется при температуре, °C	357	318	-
- до 360 °C перегоняется, % об.	-	-	более 98,0
Массовая доля полициклических ароматических углеводородов, %	3,7	1,4	менее 1,0
Массовая доля серы, мг/кг	10,0	9,6	менее 5,0
Температура вспышки в закрытом тигле, °C	75	64	53
Кинематическая вязкость, при 40°C, мм ² /с	3,20	3,17	1,47
Предельная температура фильтруемости, °C	минус 23	минус 31	минус 47
Температура помутнения, °C	минус 3	минус 20	минус 43

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 4

Table 4

Результаты испытаний дизельных топлив различных марок

Test results of diesel fuels of various brands

Марка дизельного топлива ЕВРО экологического класса К5 по ГОСТ 32511	Масса нагара, мг		Коэффициент нагарообразования, K_n , ед.
	на испытуемом топливе, m_1	на контрольном топливе, m_2	
летнее, сорт С (ДТ-Л-К5)	50,4	17,1	2,95
зимнее, класс 2 (ДТ-З-К5)	30,0	17,1	1,75
арктическое, класса 4 (ДТ-А-К5)	17,1	17,1	1,00

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Необходимо отметить, что результаты, получаемые с помощью разработанного метода, не противоречат имеющимся литературным данным о том, что с увеличением содержания ароматических углеводородов и «утяжелением» фракционного состава склонность дизельного топлива к нагарообразованию повышается [10-12].

С целью оценки достоверности результатов, получаемых по разработанному методу, были проведены дополнительные исследования по установлению взаимосвязи между результатами, наблюдаемыми на моторной установке ИДТ-90 и полноразмерном дизеле.

Для этого были испытаны два вида товарных дизельных топлив – летнее (сорт С экологического класса К5) и зимнее (класса 2 экологического класса К5) по ГОСТ 32511 (табл. 3).

В качестве полноразмерного двигателя был выбран дизель Д-245.12С, установленный на моторном стенде с динамометрической машиной, оснащенным контрольно-измерительными приборами. Выбор дизеля Д-245.12С для исследований корреляционной взаимосвязи результатов испытаний обусловлен тем, что данный двигатель не оснащен электронным блоком управления рабочего процесса. По этой причине все изменения в уровне качества испытуемых топлив оказывают существенное влияние на протекание рабочего процесса в целом и на нагарообразование в частности.

Испытания дизельных топлив на моторном стенде с дизелем Д-245.12С проводились в течении 75 ч, на режимах наиболее характерных для условий эксплуатации данного двигателя.

Дизель Д-245.12С оснащен разделенной камерой сгорания (камера сгорания типа ЦНИДИ), поэтому в процессе нагарообразования, непосредственное участие помимо топлива принимает и моторное масло. В этой связи для обеспечения максимальной достоверности получаемых результатов испытания летнего и зимнего дизельных топлив проводились на одной марке моторного масла одного производителя, отобранного из одной партии. Для испытаний была выбрана штатная марка моторного масла – М-10Г₂к. В ходе испытаний смена и долив моторного масла не проводилась. По окончании испытаний двигатель был разобран с целью оценки количества нагара, накопленного на поршнях за время испытаний.

В связи с конструктивной невозможностью размещения в камере сгорания дизеля Д-245.12С специального оценочного элемента, на котором накапливался бы нагар (нагарника), склонность топлива к нагарообразованию оценивалось по средней массе нагара, суммарно накопленного на днище одного поршня, включая камеру сгорания и огневой пояс.

Результаты испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5

Table 5

Результаты контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию на моторной установке ИДТ-90 и полноразмерном дизеле Д-245.12С
The results of monitoring the propensity of diesel fuels to carbon formation on the IDT-90 engine unit and the full-size diesel engine D-245.12S

Марка топлива	Масса нагара на моторной установке ИДТ-90, мг	Масса нагара на двигателе Д-245.12С, мг
зимнее, класс 2 (ДТ-З-К5)	30,0	387,5
летнее, сорт С (ДТ-Л-К5)	50,4	727,5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Установлено, что результаты контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию, наблюдаемые на моторной установке ИДТ-90 и полноразмерном дизеле Д-245.12С подчиняются ранее установленной качественной зависимости - с увеличением содержания ароматических углеводородов и «утяжелением» фракционного состава склонность дизельного топлива к нагарообразованию повышается. В условиях дизеля Д-245.12С средняя масса нагара, накопленного при работе в течении 75 часов, на «тяжелом» летнем дизельном топливе составила 727,5 мг, что в 1,88 раза больше, чем при работе в тех же условиях на «более легком» зимнем топливе (средняя масса нагара 387,5 мг). Аналогичный характер нагарообразования наблюдается и в условиях моторной установки ИДТ-90 – масса нагара на «тяжелом» летнем дизельном топливе составила 50,4 мг, что в 1,68 раза больше, чем при работе в тех же условиях на «более легком» зимнем топливе (масса нагара 30,0 мг).

Полученные результаты свидетельствуют о наличии корреляции между результатами контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию на модельном одноцилиндровом дизеле моторной установки ИДТ-90 и в условиях полноразмерного дизеля Д-245.12С. Следовательно, можно обоснованно утверждать, что в условиях реальной эксплуатации дизелей характер проявления данного эксплуатационного свойства у применяемого топлива будет точно такой же, который наблюдается в лабораторно-стендовых условиях при испытаниях на моторной установке ИДТ-90. Также необходимо отметить, что проведенный эксперимент подтвердил справедливость теоретического расчета подобия процесса нагарообразования на модельном одноцилиндровом дизеле

моторной установки ИДТ-90 и в условиях полноразмерного дизеля Д-245.12С, проведенного по формуле (4).

Заключение (Conclusions)

В результате проведенных исследований разработан высокоинформативный метод контроля, обеспечивающий получение достоверной информации о склонности дизельных топлив к нагарообразованию при их применении в дизелях современной конструкции. Сущность метода заключается в определении массы нагара, образующегося на специальном нагарнике, размещаемом в предкамере, при работе одноцилиндрового дизельного двигателя моторной установки ИДТ-90 на установленном режиме работы. Для повышения информативности метода предложен новый оценочный показатель «коэффициент нагарообразования», который позволяет оценить во сколько раз склонность к нагарообразованию испытуемого топлива выше аналогичной характеристики контрольного топлива, имеющего минимально возможное значение данного свойства для современных дизельных топлив. Новизна технических решений, использованных при разработке метода, подтверждена патентом РФ на изобретение [18].

Экспериментально подтверждена чувствительность разработанного метода к изменению компонентного и углеводородного состава топлива - значение коэффициента нагарообразования повышается по мере роста содержания ароматических углеводородов и «утяжеления» фракционного состава дизельного топлива.

Расчет критериев подобию и экспериментально установленная корреляция между результатами испытания топлива на одноцилиндровом дизеле моторной установки ИДТ-90 с разделенной камерой сгорания и в условиях полноразмерного дизеля Д-245.12С с неразделенной камерой сгорания, доказывают адекватность и достоверность результатов, получаемых по разработанному методу.

С 2022 г. разработанный метод используется при проведении лабораторно-стендовых испытаний новых и модернизированных марок дизельных топлив для контроля их склонности к нагарообразованию.

Литература

1. Wang Z., Li X., Xiang L., et al. Potential of kerosene-diesel blends as alternative fuels for diesel engines: Perspectives from spray combustion characteristics // *Fuel*. 2023. Vol. 335. p. 127112. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127112>.
2. Bhangwar S., Memon L., Luhur M., et al. Experimental investigation of effects of tertiary fuel on carbon deposition and emissions level of compression ignition engine // *South African Journal of Chemical Engineering*. 2024. Vol. 47. pp. 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.11.012>.
3. Solangi F., Noonari A., Hussain F., et al. Study of deposit accumulation and tribological degradation in diesel engine utilizing blend fuels // *Energy Conversion and Management: X*. 2025. Vol. 26. p. 100999. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100999>.
4. Высоцкий Я.Д., Прокопов С.П., Союнов А.С. Влияние качества топлива на образование нагара на деталях двигателей внутреннего сгорания (ДВС) // *Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях. Сборник XII Международной научно-практической конференции*. Омск. 2024. С. 127-131.
5. Карташов А.А., Успенский И.А., Юхин И.А., и др. Снижение нагарообразования в дизельных двигателях // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2023. № 4 (15). С. 193-197.
6. Qasem M., Mutairi E., Jameel A. Sooting propensity of gasoline/diesel-ether blends: Experimental assessment and artificial neural network modeling // *Journal of the Energy Institute*. 2025. Vol. 123. p. 102311. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.102311>.
7. Zahid M., Syed K.S. Investigation of pollutants formation in a diesel engine using numerical simulation // *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*. 2021. Vol. 8, 19. <https://doi.org/10.1186/s40323-021-00204-6>.
8. Jiaqiang E., Wanrong X., Yinjie M., et al. Soot formation mechanism of modern automobile engines and methods of reducing soot emissions: A review // *Fuel Processing Technology*. 2022. Vol. 235. p. 107373. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107373>.
9. Hiroyasu H., Arai M., Nakanishi K. Soot Formation and Oxidation in Diesel Engines // *SAE Transactions*. 1980. Vol. 89. pp. 1148–1162. <http://www.jstor.org/stable/44632485>.
10. Гуреев А.А., Серегин Е.П., Азев В.С. Квалификационные методы испытаний нефтяных топлив. М.: Химия, 1984. 200 с.

11. Тоттен Дж., Шах Р., Форестер Д. Топлива и смазочные материалы. Технологии, эксплуатационные свойства и методы испытаний: справочник / пер. с англ. под ред. Новикова Е.А. в 2-х томах. СПб.: ЦОП «Профессия», 2024. Том 1. 928 с.

12. Пименов Ю.М., Улитко А.В. Метод исследования склонности дизельных топлив к образованию высокотемпературных отложений // Химия и технология топлив и масел. 2019. № 3 (613). С. 16-21.

13. Николаенко А.Н., Картошкин А.П., Сомов В.А., и др. Способ испытания дизеля на нагарообразование в поршневых кольцах. Авторское свидетельство на изобретение СССР. № 1114813. 22.05.1984.

14. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1963. 256 с.

15. Маньшев Д.А., Кондратенко В.В., Сузиков В.В., и др. Применение планирования эксперимента для оптимизации условий испытания при оценке противоизносных свойств авиакеросинов // Химия и технология топлив и масел. 2020. № 5. С. 51-56.

16. Маньшев Д.А., Иванов А.В., Куявяк В.А. Методика исследования склонности компрессорных масел к образованию высокотемпературных отложений // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. 2024. Вып. 62. С. 327-338.

17. Программный комплекс «Дизель-РК». Доступно по: <http://disel-rk.ru/Rus/index.php>. Ссылка активна на 2 апреля 2025 г.

18. Волгин С.Н., Шаталов К.В., Адгамов И.Ф., и др. Способ оценки склонности дизельных топлив к нагарообразованию. Патент РФ на изобретение № 2784043. 23.11.2022. Бюл. № 33.

Авторы публикации

Адгамов Ирфан Фярхатович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела квалификационных испытаний топлив и масел 25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России.

Шаталов Константин Васильевич – канд. техн. наук, доцент, начальник отдела квалификационных испытаний топлив и масел 25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России.

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Wang Z., Li X., Xiang L., et al. Potential of kerosene-diesel blends as alternative fuels for diesel engines: Perspectives from spray combustion characteristics. *Fuel*. 2023; 335: 127112. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127112>

2. Bhangwar S., Memon L., Luhur M., et al. Experimental investigation of effects of tertiary fuel on carbon deposition and emissions level of compression ignition engine. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2024; 47: 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.11.012>.

3. Solangi F., Noonari A., Hussain F., et al. Study of deposit accumulation and tribological degradation in diesel engine utilizing blend fuels. *Energy Conversion and Management: X*. 2025; 26: 100999. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100999>.

4. Vy`soczkij Ya.D., Prokopov S.P., Soyunov A.S. Vliyanie kachestva topliva na obrazovanie nagara na detalyax dvigatelej vnutrennego sgoraniya (DVS). *Innovacionny'e texnologii v APK, kak faktor razvitiya nauki v sovremenny'x usloviyax. Sbornik XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Omsk, Russia*. 2024. pp. 127-131. (In Russ).

5. Kartashov A.A., Uspenskij I.A., Yukhin I.A., et al. Snizhenie nagaroobrazovaniya v dizel'nykh dvigatelyakh. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2023; 4(15): 193-197. (In Russ).

6. Qasem M., Mutairi E., Jameel A. Sooting propensity of gasoline/diesel-ether blends: Experimental assessment and artificial neural network modeling. *Journal of the Energy Institute*. 2025; 123: 102311. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.102311>.

7. Zahid M., Syed K.S. Investigation of pollutants formation in a diesel engine using numerical simulation. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*. 2021; 8: 19. <https://doi.org/10.1186/s40323-021-00204-6>

8. Jiaqiang E., Wanrong X., Yinjie M., et al. Soot formation mechanism of modern automobile engines and methods of reducing soot emissions: A review. *Fuel Processing Technology*. 2022; 235: 107373. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107373>
9. Hiroyasu H., Arai M., Nakanishi K. Soot Formation and Oxidation in Diesel Engines. *SAE Transactions*. 1980; 89: 1148–1162. <http://www.jstor.org/stable/44632485>.
10. Gureev A.A., Seregin E.P., Azev V.S. *Kvalifikacionnye metody ispytaniy neftyanykh topliv*. Moscow: Khimiya, 1984. (In Russ).
11. Totten G., Editor, Shah R., Forester D., Section Editors *Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing*. 2nd ed. ASTM Stock Number: MNL 37-2ND. ASTM INTERNATIONAL, 2019.
12. Pimenov Y.M., Ulit'ko A.V. A Method for Investigating Tendency of Diesel Fuels to form High-Temperature Deposits. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2019; 55 (3): 232-242.
13. Nikolaenko A.N., Kartoshkin A.P., Somov V.A., et al. *Sposob ispytaniya dizelya na nagaroobrazovanie v porshnevnykh kol'cakh*. Patent SU № 1114813. 22.05.1984. (In Russ).
14. Guhman A.A. *Vvedenie v teoriyu podobiya*. Moscow: Vysshaya shkola, 1963. (In Russ).
15. Man'shev D.A., Kondratenko V.V., Suzikov V.V., et al. Primenenie planirovaniya ehksperimenta dlya optimizatsii uslovij ispytaniya pri ocenke protivoznosnykh svoystv aviakerosinov. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 2020; 5: 51-56. (In Russ).
16. Man'shev D.A., Ivanov A.V., Kuyavyak V.A. Metodika issledovaniya sklonnosti kompressornykh masel k obrazovaniyu vysokotemperaturnykh otlozhenij. *Trudy 25 GoSNII MO RF*. 2024; 62: 327-338. (In Russ).
17. *Programmnyj kompleks «Dizel'-RK»*. Available at: <http://disel-rk.ru/Rus/index.php>. Accessed: 2 Apr 2025. (In Russ).
18. Volgin S.N., Shatalov K.V., Adgamov I.F., et al. *Sposob ocenki sklonnosti dizel'nykh topliv k nagaroobrazovaniyu*. Patent RUS № 2784043. 23.11.2022. Byul. № 33. (In Russ).

Authors of the publication

Irfan F. Adgamov – 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defence of the Russian Federation. Moscow, Russia.

Konstantin V. Shatalov – 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defence of the Russian Federation. Moscow, Russia.

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University. Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено 03.01.2026 г.

Отредактировано 02.03.2026 г.

Принято 17.03.2026 г.