

УДК 621.43

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ
КОНЦЕНТРАЦИЙ ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА В АВТОМОБИЛЬНОМ
БЕНЗИНЕ**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR MEASURING
CONCENTRATIONS OF IRON PARTICLES IN AUTOMOBILE
GASOLINE**

Лошаков А.С. аспирант, Сохань В.В. студент 4-го курса (ФГБОУ ВО
«Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г.
Луганск, Российская Федерация).

Аннотация. В данной статье рассмотрено влияние железосодержащих частиц в бензине на двигатель и топливную систему автомобиля. Были проанализированы существующие лабораторные методы контроля концентрации частиц железа. В ходе рассмотрения изложены краткие основные характеристики и способы проведения испытаний каждого из методов. Для получения фактической концентрации частиц железа было предложено использовать метод атомно-абсорбционной спектроскопии.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, частицы, бензин, транспортные средства, двигатель.

Annotation. This article examines the effect of iron-containing particles in gasoline on the engine and fuel system of a car. The existing laboratory methods for monitoring the concentration of iron particles were analyzed. During the review, brief main characteristics and methods of testing each of the methods are outlined. It was proposed to use atomic absorption spectrometry to obtain the actual concentration of iron particles.

Keywords: maintenance and repair, particles, gasoline, vehicles, engine

В современном обществе наблюдается ярко выраженная тенденция к использованию транспортных средств и технологического оборудования, оснащенных двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Данное предпочтение обусловлено комплексом причин, среди которых выделяются их доказанная эксплуатационная надежность, продолжительный срок службы, широкая доступность топлива, а также оперативность процесса заправки. Основная масса таких двигателей функционирует на бензине или дизельном топливе, лишь в редких случаях используя газовое топливо. Согласно прогнозам Международного энергетического агентства (МЭА), ожидается, что до 2035–2040 годов доля автомобилей с ДВС в общем мировом парке будет оставаться на уровне приблизительно 70–80 %. Следовательно, дальнейшее совершенствование и развитие технологий,

связанных с двигателями внутреннего сгорания, сохраняют свою актуальность в обозримом будущем.[7]

В соответствии с техническими нормами Таможенного союза, предельно допустимое содержание механических включений в различных типах топлива должно быть минимизировано. Железо, будучи одним из главных элементов зольных загрязнений, является основным виновником образования подобных примесей. Следовательно, обнаружение частиц железа в бензине для автомобилей рассматривается как многоаспектная задача, находящаяся на пересечении дисциплин, изучающих моторные топлива, трибологию (науку о трении, износе и смазке) и физику процессов горения. Истоки появления железа могут быть разнообразными: как результаты абразивного износа и коррозии компонентов оборудования (представляющие собой механические частицы), так и преднамеренно добавляемые металлоорганические присадки, используемые для повышения детонационной стойкости и созданные на основе ферроцена или его производных. [1]

Применение железосодержащих соединений в качестве антидетонационных добавок к топливу, в частности, ферроцена и его аналогов, а также железа карбоксилатов, направлено на увеличение октанового показателя бензина. Проведенные А.В. Голоуниным и О.В. Захаровой изыскания продемонстрировали, что даже малые, каталитические объемы железа, независимо от его степени окисления, стимулируют более эффективное сгорание топливной смеси. Существенным результатом этих исследований стало выявление негативного аспекта данного явления. Увеличение содержания железа в топливе приводит к экспоненциальному нарастанию отложений нагарного типа на свечах зажигания и выпускных клапанах двигателя. Формируясь на керамической части свечи и ее электродах, нагар создает проводящий мост, способствующий утечке электрического тока. Это, в свою очередь, провоцирует пропуски зажигания и нарушение стабильности работы силового агрегата, особенно при запуске в условиях низких температур, когда конденсирующаяся влага увеличивает электропроводность образующихся отложений. [5]

Абразивное воздействие частиц железа, присутствующих в топливе как исходные механические включения или образующихся в результате процесса сгорания, существенно влияет на топливную систему. Особую угрозу они несут для высокоточных элементов топливной аппаратуры, таких как плунжерные пары топливных насосов высокого давления и пары игла-распылитель форсунок, где минимальные зазоры составляют всего несколько микрон. Проникновение твердых абразивных частиц железа в эти узкие пространства приводит к ускоренному механическому

износу, искажению формы топливного факела и снижению давления впрыска. Следует также учитывать, что присадки сами по себе могут служить источником образования твердого осадка еще до этапа сгорания. Результаты исследований демонстрируют, что ферроцен, являясь чистым веществом, имеет ограниченную растворимость в бензине. При снижении температуры он склонен к выпадению в осадок. Это явление может способствовать засорению топливопроводов и фильтров, нарушая тем самым нормальное функционирование топливной системы.

Частицы оксидов железа, образующиеся в результате сгорания присадок или поступающие с топливом, откладываются на поверхностях камеры сгорания, днищах поршней и тарелках клапанов. Образующийся нагар, обладая теплоизоляционными свойствами, препятствует нормальному отводу тепла, что вызывает перегрев компонентов двигателя. Наиболее серьезным проявлением данной проблемы становится калильное воспламенение – самопроизвольное возгорание топливно-воздушной смеси от раскаленных частиц нагара. Это приводит к нестабильной работе двигателя, детонации и может повлечь за собой механические повреждения, такие как прогар поршней и клапанов. Для минимизации этих нежелательных явлений разработаны различные методики определения содержания железа в бензине. Выбор конкретного метода обуславливается поставленной задачей: проводится ли контроль качества реализуемого топлива на предмет соответствия нормативным требованиям или осуществляется количественное измерение концентрации присадок. [6]

Атомно-абсорбционная спектроскопия представляет собой высокоточный, чувствительный и устойчивый к спектральным наложениям способ анализа элементного состава объектов. Национальным стандартом РФ ГОСТ Р 8.783-2012 утвержден прямой вариант данного метода, применяемый для количественного установления содержания свинца, железа и марганца в бензиновых топливах. Данный стандарт распространяется как на автомобильные, так и на прямогонные бензины. Он позволяет определять массовую концентрацию железа в следующих пределах: для прямогонных бензинов — от 0,01 до 3,0 мг/кг, для автомобильных бензинов — от 3,0 до 50,0 мг/кг. Существенным преимуществом метода является возможность проведения измерений без предварительной обработки образца и использования окислителей. Это значительно сокращает затраты труда и время, необходимое для анализа, а также уменьшает риск потери определяемого вещества и контаминации пробы, которые часто возникают при многоступенчатой подготовке образцов. [3]

Определение концентрации железа в товарных бензинах в настоящее время осуществляется преимущественно с применением

фотоколориметрического подхода, который является признанным и стандартизированным. Действующий межгосударственный стандарт, ГОСТ 32514-2023, регламентирует эту процедуру. Данный нормативный документ применим к автомобильным бензинам, в состав которых входят ферроценовые присадки и/или добавки, и предписывает методики определения массовой доли железа в пределах от 10 до 100 мг/дм³. Суть методики заключается в экстракционном извлечении соединения железа, входящего в состав присадки, непосредственно из бензина. Затем следует этап минерализации, то есть разрушения органической составляющей присадки, которое осуществляется при помощи смеси концентрированной серной кислоты и пероксида водорода. В ходе этого процесса железо переходит в водную фазу в виде трехвалентных ионов (Fe^{3+}). Далее, в присутствии аммиака и с добавлением сульфосалициловой кислоты, формируется стабильный окрашенный комплекс желтого оттенка. Интенсивность полученной окраски, которая находится в прямой зависимости от концентрации железа, определяется путем измерения с использованием спектрофотометра или фотоколориметра. Измерения проводятся при длине волны 400 ± 20 нм, используя кюветы с оптической длиной пути 30 мм. [2]

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) представляет собой высокоэффективный мультиэлементный метод, который все шире используется для непосредственного исследования жидких углеводородных продуктов, в том числе бензинов. Суть данного подхода заключается в облучении образца рентгеновскими лучами, исходящими от рентгеновской трубки или радиоактивного изотопа, что приводит к возбуждению атомных структур исследуемого вещества. По мере того как возбужденные атомы возвращаются в свое стабильное, основное состояние, они испускают вторичное, или флуоресцентное, рентгеновское излучение. Характер энергии этого вторичного излучения уникален для каждого химического элемента, в то время как его интенсивность прямо коррелирует с концентрацией данного элемента в анализируемом образце. Преимущество РФА заключается в его способности обеспечивать как быстрый, так и комплексный анализ содержания металлов в нефтепродуктах, требуя при этом минимального объема пробоподготовки. Как правило, достаточно лишь удалить присутствующие механические включения и поместить подготовленный образец в специальную кювету для проведения анализа. [6]

Атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) обладает рядом фундаментальных достоинств, которые делают ее востребованным подходом для решения разнообразных аналитических задач, особенно в сферах контроля качества горючих материалов и обнаружения минорных количеств металлов. Основным отличием ААС от фотоколориметрического метода является ее существенно более высокая чувствительность,

позволяющая анализировать крайне низкие концентрации. В то время как фотоколориметрия успешно применяется для определения содержания железа в пределах от 10 до 100 мг/дм³, что достаточно для анализа бензинов с антидетонационными присадками, она становится малоэффективной при необходимости выявления следовых количеств железа, измеряемых в миллиграммах на килограмм. ААС, в частности при использовании прямого метода, обеспечивает точное определение концентраций железа начиная с 0,01 мг/кг. Это позволяет идентифицировать загрязнения на ранних этапах, когда они еще не детектируются фотоколориметрией. Дополнительным преимуществом атомно-абсорбционного метода перед колориметрией является отсутствие необходимости в трудоемкой и продолжительной пробоподготовке, включающей экстракцию и минерализацию. Прямое введение образца в аппарат не только сокращает время анализа, но и минимизирует вероятность потерь или контаминации определяемого элемента на этапе подготовки, тем самым повышая надежность получаемых результатов.

При сравнении с рентгенофлуоресцентным методом ключевым преимуществом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) считается её высочайшая избирательность. Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), безусловно, является эффективным многокомпонентным инструментом, однако достоверность его данных может существенно снижаться из-за матричных эффектов, обусловленных химическим составом и физическими свойствами изучаемого образца. Для обеспечения точных количественных измерений с помощью РФА необходима скрупулёзная калибровка, зачастую требующая эталонных образцов, чей состав максимально близок к составу анализируемых проб. В противоположность этому, принцип атомно-абсорбционной спектроскопии базируется на измерении поглощения оптического излучения атомами аналита на уникальной для каждого элемента резонансной длине волны. Данная фундаментальная особенность делает методику практически невосприимчивой к присутствию посторонних компонентов в матрице пробы. Формирование атомного пара в пламени или графитовой печи позволяет осуществлять анализ в условиях, где мешающее влияние матрицы минимизировано. Вследствие этого ААС регулярно применяется в ситуациях, когда данные, полученные иными аналитическими подходами, признаются сомнительными и возникает необходимость в их проверке методом, гарантирующим наибольшую степень достоверности.

Следовательно, атомно-абсорбционная спектроскопия демонстрирует преимущество над фотоколориметрией в параметрах чувствительности и оперативности проведения измерений, что обусловлено минимизацией стадий подготовки пробы. Рентгенофлуоресцентный метод, в свою очередь, уступает ААС в аспектах селективности и воспроизводимости получаемых

данных, что становится критически важным при исследовании сложных многокомпонентных сред, к которым относятся продукты переработки нефти. Указанная комбинация выдающейся чувствительности, избирательности и правильности результатов определяет статус атомно-абсорбционной спектрометрии как необходимого метода при проведении сертификационного контроля и в исследовательской практике. Его применение становится ключевым в тех случаях, когда необходимо обеспечить максимальную достоверность информации о концентрации металлических элементов, в том числе железа, в автомобильных бензинах и иных видах горючего.

Список литературы

1. **ТР ТС 013/2011.** Оценка соответствия. Порядок обязательного подтверждения соответствия продукции требованиям технического регламента Таможенного союза «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту» = Conformity assessment. Procedure for obligatory confirmation of product compliance to requirements of technical regulation of the Customs union «On requirements for automobile and aviation gasoline, diesel and marine fuel, jet fuel and heating oil» : национальный стандарт Российской Федерации / Разработан Всерос. научно-исследоват. ин-т сертификации. — Изд. офиц. : — Москва : Стандартинформ, 2014.
2. **ГОСТ 32514-2023.** Бензины автомобильные. Фотокolorиметрический метод определения железа = Automotive gasolines. Photocolorimetric method of iron determination : межгосударственный стандарт : издание официальное : Введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 июля 2023 г. N 499-ст : введен в замен ГОСТ 32514-2013 : дата введения 2024-07-01 / разработан Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 031 "Нефтяные топлива и смазочные материалы". — Москва : Российский институт стандартизации, 2023. — Текст : непосредственный.
3. **ГОСТ Р 8.783-2012.** Государственная система обеспечения единства измерений. Бензин автомобильный. Прямой метод определения свинца, железа и марганца = State system for ensuring the uniformity of measurements. Automobile gasoline. Direct method of lead, iron and manganese determination : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 ноября 2012 г. № 876-ст : введен впервые : дата введения 2014-01-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием Всероссийским научно-исследовательским институтом расходомерии (ФГУП ВНИИР). — Москва : Стандартинформ, 2019. — Текст : непосредственный.

4. ГОСТ Р 7.0.100-2018. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления = System of standards on information, librarianship and publishing. Bibliographic record. Bibliographic description. General requirements and rules : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 декабря 2018 г. № 1050-ст : введен впервые : дата введения 2019-07-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Информационное телеграфное агентство России (ИТАР-ТАСС)», филиал «Российская книжная палата», Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российская государственная библиотека», Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российская национальная библиотека». — Москва : Стандартинформ, 2018. — Текст : непосредственный.

5. Голоунин А. В., Захарова О. В. Топливные композиции с железосодержащими добавками // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 2012. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/toplivnye-kompozitsii-s-zhelezosoderzhaschimi-dobavkami> (дата обращения: 10.03.2026).

6. Худашова Анастасия Ивановна, Пуляев Николай Николаевич, Пильщиков Владимир Львович К вопросу об определении содержания металлов в нефтепродуктах // Наука без границ. 2020. №3 (43). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-opredelenii-soderzhaniya-metallov-v-nefteproduktah> (дата обращения: 10.03.2026).

7. Коршунова Татьяна Евгеньевна, Волынец Роман Дмитриевич Инновационные технологии в области двигателей внутреннего сгорания // Научные труды Дальрыбвтуза. 2023. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-tehnologii-v-oblasti-dvigatelye-vnutrennego-sgoraniya> (дата обращения: 10.03.2026).