

Научная статья
УДК 543.429.23
DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-114-128

**Исследование стабильности водотопливной эмульсии
для дизельного двигателя**

**Оксана Владимировна Сынашенко¹✉, Николай Яковлевич Синявский²,
Наталья Анатольевна Кострикова³**

^{1,2,3} Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

¹oksanasynashenko@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0009-0004-3149-0345>

²nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Аннотация. Известно, что водотопливные эмульсии, используемые в дизельных двигателях, обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными дизельными топливами, что существенно влияет на эффективность и экологичность работы двигателей. Использование водотопливных эмульсий может быть связано с рядом проблем, касающихся их стабильности, таких как разделение фаз, коалесценция и осаждение, качество компонентов и др. Данные вопросы побуждают исследователей подробно изучать свойства водотопливных эмульсий и совершенствовать методы их получения. В работе приводятся результаты исследования стабильности водотопливных эмульсий с помощью фотонной корреляционной спектроскопии и кинетики изменения времен спин-спиновой релаксации ЯМР T_2 в процессе седиментации капель воды эмульсии на примере системы «дизельное топливо Euro C + вода». Показано, что с течением времени может наблюдаться переход одномодального распределения гидродинамических радиусов капель воды в бимодальное. Это объясняется резким ростом агрегации капель и ослаблением этого процесса эмульгатором, концентрация которого в области рассеяния луча уменьшается. Измеренные времена релаксации ЯМР T_2 с помощью программы Niumag NMR Data Analysis Software V1.1 (Pore size distribution) позволили определить распределение размеров капель воды в эмульсии альтернативным методом. Установлено, что более длинный процесс расслаивания эмульсии наблюдается в образцах с большим временем эмульгирования. Эмульсия, полученная без эмульгатора, очень неустойчива из-за сильной коалесценции и быстро расслаивается. Для создания устойчивой мелкодисперсной эмульсии необходимо, главным образом, длительное взбивание смеси в присутствии эмульгатора. Представленные в данной работе результаты могут быть полезны для дисперсионного анализа любых органических эмульсий, содержащих микроразмерные капли несмешиваемой жидкости.

Ключевые слова: судовые дизельные топлива, водотопливные эмульсии, динамическое рассеяние света, ЯМР-релаксометрия.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Федерального агентства по рыболовству, рег. № 226020326858–4.

Для цитирования: Сынашенко О. В., Синявский Н. Я., Кострикова Н. А. Исследование стабильности водотопливной эмульсии для дизельного двигателя // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 114–128. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-114-128.

Original article

Study of the stability of water-fuel emulsion for diesel engine

Oksana V. Synashenko^{1✉}, Nikolay Ya. Sinyavskiy², Natal'ya A. Kostrikova³

^{1,2,3} Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹oksanasynashenko@gmail.com[✉], <https://orcid.org/0009-0004-3149-0345>

²nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Abstract. It is known that water-fuel emulsions used in diesel engines have a number of advantages over traditional diesel fuels, which significantly affects the efficiency and environmental performance of the engines. The use of water-fuel emulsions can be associated with several problems related to their stability, such as phase separation, coalescence, and sedimentation, as well as the quality of the components and others. These issues encourage researchers to thoroughly study the properties of water-fuel emulsions and improve methods for their production. This paper presents the results of a study of the stability of water-fuel emulsions using photon correlation spectroscopy and the kinetics of changes in T_2 NMR relaxation times during the sedimentation of emulsion water droplets using the example of a Euro C diesel fuel + water system. It is shown that over time, a transition from a unimodal distribution of water droplet hydrodynamic radii to a bimodal distribution can be observed. This is explained by a sharp increase in droplet aggregation and the weakening of this process by the emulsifier, the concentration of which decreases in the beam scattering region. NMR T_2 relaxation times measured using Niumag NMR Data Analysis Software V1.1 (Pore Size Distribution) made it possible to determine the size distribution of water droplets in the emulsion using an alternative method. A longer emulsion separation process was found in samples with a longer emulsification time. An emulsion obtained without an emulsifier is very unstable due to strong coalescence and quickly separates. Prolonged whisking is essential for obtaining a stable, finely dispersed emulsion. The optimal emulsifier amount is no more than 1%. The results obtained in this study can be useful for dispersion analysis of any organic emulsions containing microscopic droplets of immiscible liquid.

Keywords: marine engine fuels, water-fuel emulsion, dynamic light scattering, NMR-relaxometry.

Funding: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Fisheries Agency, reg. N 226020326858–4.

For citation: Synashenko O. V., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A. Study of the stability of water-fuel emulsion for diesel engine. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):114–128. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-114-128.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на свои преимущества, дизельные двигатели являются одними из основных источников загрязнения окружающей среды, при этом выбрасываются загрязняющие вещества – твердые частицы, черный дым, оксиды азота (NO_x), оксиды серы (SO_x), несгоревшие углеводороды, оксид углерода (CO) и диоксид углерода (CO_2).

Использование эмульсионных топлив имеет множество преимуществ, основное из которых – полное сгорание, что приводит к лучшей экономии топлива и чистому сгоранию топлива с меньшими выбросами. Водно-дизельная эмульсия – это альтернативное топливо для дизельных двигателей, которое может использоваться с существующей конфигурацией двигателя без дополнительной модернизации. Она обладает преимуществами одновременного снижения вредных выбросов и твердых частиц, а также способствует повышению эффективности сгорания, хотя это требует дальнейшего исследования.

В настоящее время важными задачами являются энергосбережение и обеспечение экологической безопасности при эксплуатации энергетических установок. В этом контексте водотопливные эмульсии (ВТЭ), т. е. смеси воды с мазутом, дизельным топливом, бензином и угольной пылью, представляют собой интересное решение для достижения этих целей [1–9]. Основные факторы для ВТЭ – содержание дисперсной фазы (вода, распределение капель воды по размерам (фракционность) и ее стабильность). Эти показатели зависят от способа приготовления эмульсий. Стабильность эмульсии состоит в постоянстве дисперсного состояния (размера капель) и способности капель не осаждаться и не соединяться.

Сложность использования воды в сочетании с легким топливом, таким как дизельное топливо (ДТ), обусловлена двумя факторами. Во-первых, это две несмешивающиеся жидкости, а во-вторых, в легких топливах отсутствуют естественные эмульгаторы, в отличие от тяжелых топлив (котельного и мазутного), в составе которых есть асфальтены и нефтяные смолы – природные поверхностно-активные вещества (ПАВ), обеспечивающие стабильность ВТЭ. Таким образом, для эмульсий типа «ДТ–вода» дополнительно применяют эмульгаторы, выполняющие функции снижения межфазного натяжения между двумя жидкостями и стабилизации дисперсной фазы для предотвращения расслоения эмульсии [3].

Об эффективности использования эмульгированного топлива свидетельствует изменение параметров процесса горения: в результате микровзрывов капель эмульсии в высокотемпературной камере сгорания факел увеличивается в объеме, равномерно заполняет камеру, что способствует выравниванию температурного поля цилиндрической втулки, увеличению средней температуры в камере сгорания и снижению недожога топлива [2]. Влияние свойств ВТЭ на состав выхлопных газов анализируется авторами работ [8] и [9].

Дорохов А. Ф., Патров Ф. В. и Кабылбекова В. В. в [4] обсуждают возможность оценки воспламеняемости топлива по значению расчетного углеродно-ароматического индекса (ССАИ) топлива. Авторами [4] обнаружена тенденция к улучшению воспламеняемости топлива вследствие изменения влагосодержания ВТЭ. Было показано, что эмульгированное топливо улучшает процессы смесеобразования и горения, позволяя на 15–25 % форсировать двигатель при сохранении его

экономичности и дымности, без заметного изменения динамических характеристик.

Многочисленные исследования показали, что стабильность эмульсии в значительной степени зависит от различных параметров обработки, типа и концентрации поверхностно-активного вещества, температуры, скорости перемешивания, времени перемешивания и др. Установлено, что увеличение скорости и продолжительности перемешивания может привести к уменьшению среднего размера частиц эмульсии и улучшению ее стабильности. Увеличение концентрации поверхностно-активного вещества, времени и скорости перемешивания, а также температуры приводит к улучшению стабильности эмульсии. Относительно высокая стабильность эмульсий при меньших размерах капель объясняется термодинамически невыгодным расслоением, или седиментацией, между мелкими каплями из-за молекулярного отталкивания.

В [10] на основе метода многократного рассеяния света изучалось влияние параметров процесса на значение индекса стабильности, также исследовалась взаимосвязь между стабильностью эмульсии и размером капель. Результаты показали, что дестабилизация эмульгированного дизельного топлива связана с гравитационной миграцией и увеличением размера капель.

В обзоре [11] рассматриваются типы эмульсий, явление микровзрыва, стабильность эмульсии и улучшение ее физико-химических свойств, а также влияние содержания воды на сгорание и выбросы топлива. В данном обзоре установлено, что топливный насос высокого давления и распылительная форсунка являются наиболее важными компонентами с точки зрения вторичного распыления, предложено сосредоточиться на дальнейшем исследовании влияния этих компонентов на микровзрыв эмульсии.

В [12] для решения проблем долговременной стабильности были разработаны методы получения эмульсии «вода в дизельном топливе без использования поверхностно-активных веществ». Метод основан на впрыскивании водяного пара в холодную порцию дизельного топлива и образовании эмульсии.

В исследовании [13] были получены наноэмульсии типа «вода в дизельном топливе с различными концентрациями поверхностно-активных веществ и воды». Размер капель наноэмульсий определяли методом динамического рассеяния света, а стабильность наноэмульсии оценивали путем измерения изменения размера капель в зависимости от времени. Результаты показали, что размер капель увеличивается с увеличением содержания воды, но, как правило, уменьшается с увеличением содержания поверхностно-активного вещества. При краткосрочном исследовании физической стабильности расслоения фаз не наблюдалось.

В публикации [14] показано, что в методе динамического рассеяния света (ДРС) при малых концентрациях частиц в растворе в распределении по размерам появляется артефактный пик, не соответствующий реально существующим частицам и обусловленный пересечением отдельными частицами границ объема рассеяния.

Целью работы [15] явилось исследование ряда свежих и отработанных масел методом ДРС для определения изменений, происходящих с маслом в процессе эксплуатации судового дизеля, и выяснения связи этих изменений с неисправностями двигателя. Установлено, что распределения гидродинамических радиусов частиц для свежих и отработанных масел существенно различаются. По характеру

распределений крупных частиц установлено, что в отработанных маслах понижается уровень агрегации, или мицеллообразования, полимера-модификатора вязкости.

В работе [16] описывается новый метод определения поверхностной релаксационности протонов на границе раздела «вода–топливо», основанный на кинетике седиментации частиц воды в поле силы тяжести и времени поперечной релаксации ЯМР-ядер ^1H в каплях воды эмульсии. Исследована кинетика изменения времен релаксации T_2 в процессе седиментации капель воды эмульсии. Для получения распределения частиц воды по размерам выполнялись преобразования массива данных $T_2(t)$. Возможности предлагаемого метода для высокодисперсных эмульсий «вода–топливо» ограничены очень медленным оседанием малоразмерных капель воды в гравитационном поле.

Анализ литературы свидетельствует об актуальности вышеперечисленных исследований как для определения стабильности топливных эмульсий, так и для энергосбережения и обеспечения экологической безопасности при эксплуатации энергетических установок.

Целью настоящей работы явилось исследование динамики деэмульгации водо-топливной смеси для дизельного двигателя и установление факторов, влияющих на стабильность эмульсии.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования стабильности эмульсий и измерения динамики изменения размеров капель воды в диапазоне нанометров использовался метод фотонной корреляционной спектроскопии. Для этой цели служил измеритель размера частиц Photocor Compact с погрешностью определения гидродинамических радиусов не более 10 %. Длина волны применяемого лазера составляла 638 нм, угол рассеяния – 90° , использованы стандартные прямоугольные кюветы. Измерения выполнялись при комнатной температуре.

Для приготовления образцов (эмульсий типа «ДТ–вода») применялись дизельное топливо Euro C и дистиллированная вода с массовым содержанием от 5 до 20 %, эмульгатором являлось поверхностно-активное вещество – моющее средство Ludwik. Процесс эмульгирования осуществлялся с применением минимиксера и занимал от 15 до 45 мин.

Для измерений средних эффективных радиусов капель воды в эмульсии как альтернатива использовались также методы седиментации и распределения времен ЯМР-релаксации T_2 [16]. Для этой цели служил ЯМР-релаксометр PQ001 Niumag Corporation Petroleum с магнитом 0,5 Тл, программное обеспечение релаксометра NMRAS (NMR Analyzing System Ver4.0) и программа Q-CPMG для определения времен релаксации T_2 . Инверсия спада сигнала намагниченности выполнялась с помощью алгоритма SIRT (Simultaneous Iterative Reconstructive Technique). Для инверсии T_2 при определении распределения размеров капель воды в эмульсии применялся метод BRD (Butler-Reeds-Dawson) с соответствующим параметром регуляризации α . Все эксперименты выполнялись при температуре 32°C (температура стабилизации магнитного поля ЯМР-релаксометра).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теоретически описание зависимости гидродинамического радиуса капель воды в эмульсии является достаточно сложной задачей, объединяющей коллоидную динамику и седиментацию. Идут два основных физических процесса:

1. Коалесценция капель воды, когда капли сталкиваются и сливаются, уменьшая общее количество капель и увеличивая их средний размер;
2. Седиментация в гравитационном поле, которая приводит к тому, что более крупные капли оседают быстрее. В результате увеличивается локальная концентрация капель у дна кюветы и эмульсия расслаивается.

Агрегация стремится увеличить размер, а гравитация «отсеивает» крупные частицы, заставляя мелкие дольше оставаться в объеме, что приводит к увеличению среднего радиуса и уменьшению концентрации крупных капель. Изменение среднего радиуса (r_h) можно разделить на 3 фазы:

1. Начальная фаза, когда r_h быстро увеличивается из-за агрегации крупных капель, которые тут же начинают оседать;
2. Промежуточная фаза, при которой радиус r_h продолжает расти, но темп роста замедляется; крупные капли уходят, мелкие – слипаются;
3. Конечная фаза, когда r_h стабилизируется или даже немного уменьшается, остается мало материала для агрегации, процесс седиментации «вычищает» систему, оставляя только мелкие, долгоживущие капли, количество которых сокращается.

На рис. 1 показано изменение во времени интенсивности рассеяния с образцом эмульсии типа «ДТ Euro C + 20 % H_2O + 0,4 % эмульгатора». Измерение радиусов капель воды в зависимости от времени выполнялось после эмульгирования мини-миксером в течение 30 мин. Изменения гидродинамических радиусов со временем иллюстрирует рис. 2. На начальном этапе при распределении наблюдается один пик, радиус капель растет за счет коалесценции от 0,3 до 1,0 мкм. Затем наблюдается второй пик, с радиусом капель около 200 мкм, обусловленный, по-видимому, резким ростом агрегации капель из-за ослабления этого процесса эмульгатором, концентрация которого в области рассеяния уменьшается. Плотность эмульгатора незначительно больше плотности воды, и процесс седиментации «вычищает» образец от эмульгатора. Радиус, соответствующий второму пику, со временем уменьшается и через 2 ч стабилизируется на уровне 20–39 мкм. Это объясняется недостатком материала для агрегации.

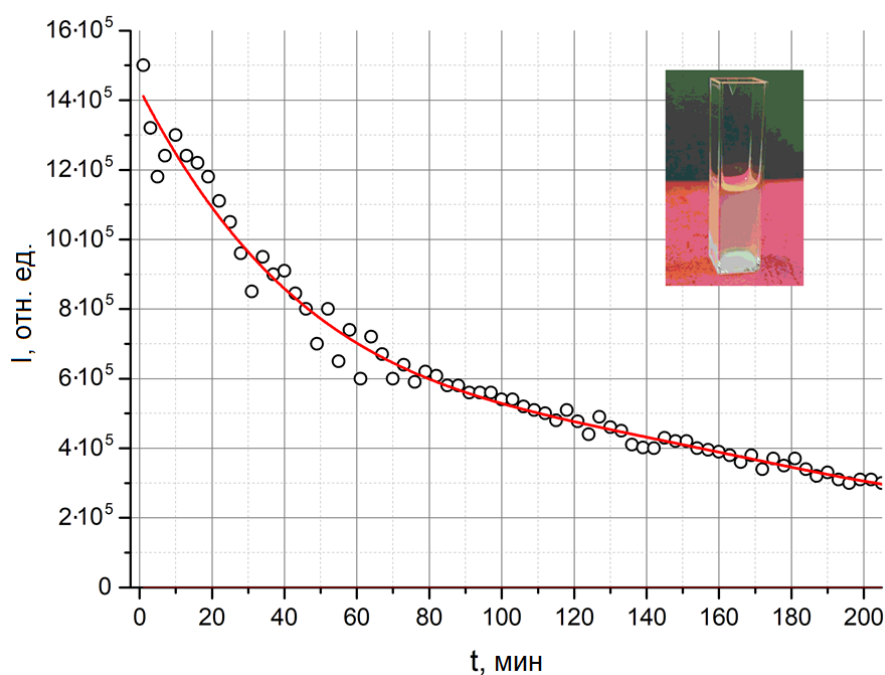


Рис. 1. Изменение интенсивности рассеяния света эмульсией типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O + 0,4 % эмульгатора»
 Fig. 1. Changing the intensity of light scattering by an emulsion diesel fuel Euro C + 20 % H₂O + 0.4 % emulsifier

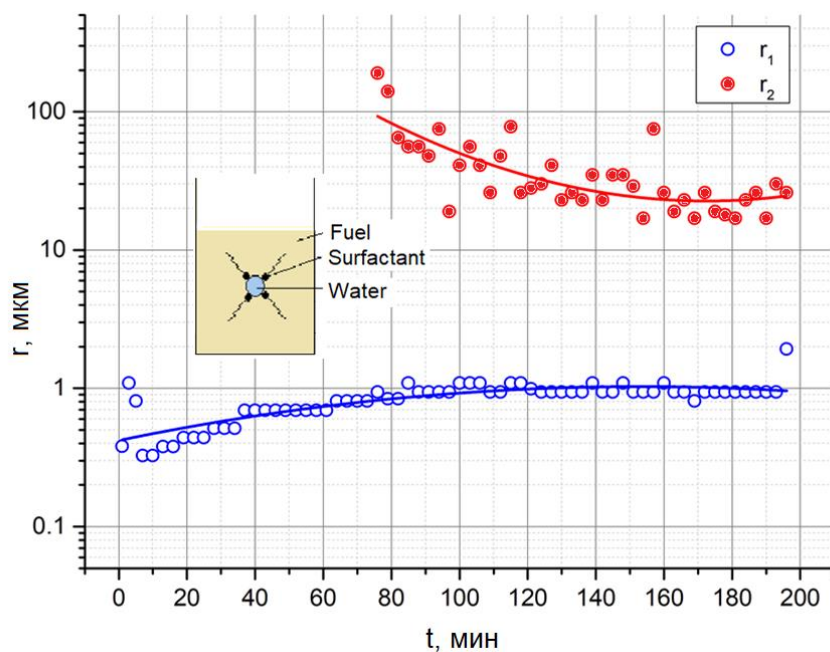


Рис. 2. Изменение распределения гидродинамических радиусов капель воды со временем в эмульсии типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O + 0,4 % эмульгатора»
 Fig. 2. Change in the distribution of hydrodynamic radii of water droplets over time in the emulsion diesel fuel Euro C + 20 % H₂O + 0.4 % emulsifier

Момент времени, когда одномодальное распределение гидродинамических радиусов становится бимодальным, иллюстрирует рис. 3.

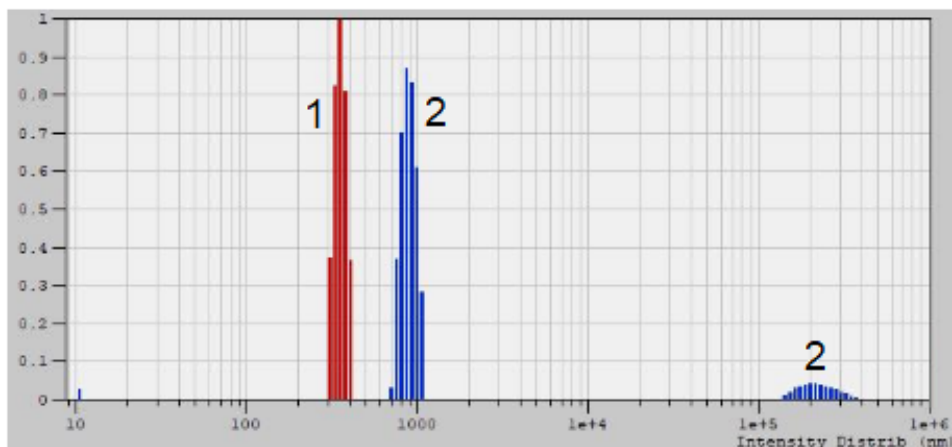


Рис. 3. Распределения размеров частиц воды в эмульсии типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O + 0,4 % ПАВ» ($t_{mix} = 30$ мин) при $t=1$ мин, $r_1=351$ нм (1) и при $t=76$ мин, $r_1=861$ нм и $r_2=200$ мкм (2)

Fig. 3. Distributed particle size of water in the emulsion diesel fuel Euro C + 20 % H₂O + 0.4 % surfactant ($t_{mix} = 30$ min) at $t=1$ min, $r_1=351$ nm (1) and at $t=76$ min, $r_1=861$ nm and $r_2=200$ mcm (2)

Взбивание миксером дизельного топлива «Euro C + 20 % H₂O без эмульгатора» приводит к неустойчивой эмульсии и быстрому уменьшению интенсивности рассеяния (рис. 4).

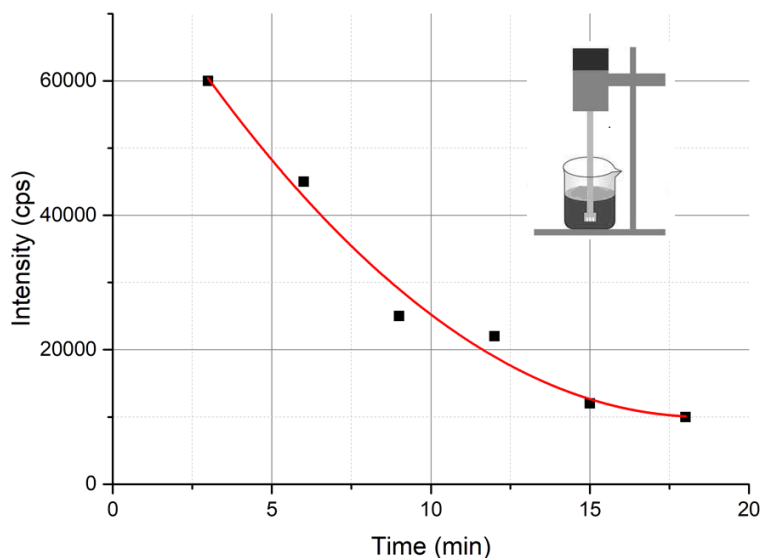


Рис. 4. Изменение со временем интенсивности рассеяния света эмульсией типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O (без эмульгатора)»

Fig. 4. Change over time in the intensity of light scattering by diesel fuel Euro C + 20 % H₂O emulsion (without emulsifier)

В этом случае распределение радиусов капель изначально является бимодальным (рис. 5) со средними радиусами 0,7 и 6,5 мкм, которые увеличиваются за счет агрегации и стабилизируются через 15 мин при 1,1 и 50 мкм.

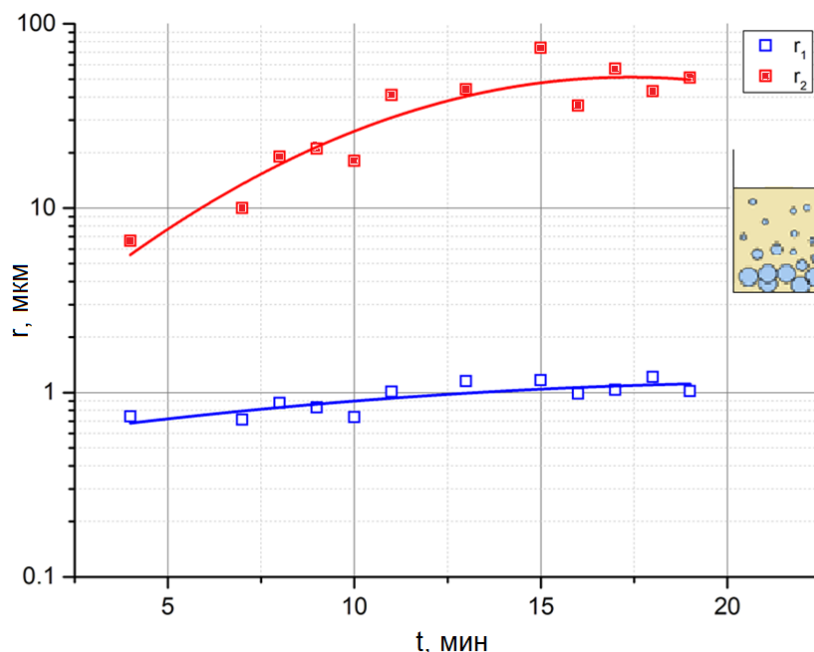


Рис. 5. Изменение со временем распределения гидродинамических радиусов капель воды в эмульсии типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O без эмульгатора»
Fig. 5. Change over time in the distribution of hydrodynamic radii of water droplets in an emulsion diesel fuel Euro C + 20% H₂O without emulsifier

Время релаксации ЯМР T_2 протонов воды в каплях эмульсии связано с размером капли и зависит от поверхностной релаксационности. Понимание поверхностной реактивности имеет большое значение при использовании T_2 -спектров в различных приложениях ЯМР. В [1] приведены наиболее вероятные радиусы капель r и поверхностные релаксационности ρ для разных значений времени эмульгирования t_{mix} , процентного содержания воды и эмульгатора (ПАВ) для водной эмульсии топлива Euro C. На рис. 6 показаны зависимости наиболее вероятных радиусов капель r от времени эмульгирования t_{mix} , полученные для эмульсий типа «ДТ EuroC + 20 % воды + 1 % ПАВ» двумя методами – с помощью программы Niumag NMR Data Analysis Software V1.1 (Pore size distribution) и седиментации. Измеренная методом седиментации поверхностная релаксационность ρ ($\mu\text{m/s}$) = 0,95 и 1,65 соответственно, «Porosity» (%) = 20, Pore Type = Sphere.

Как видно из рис. 6, форма сигнала после приготовления эмульсии существенно меняется. Во-первых, пик от ДТ (560 мс) и пик от воды (2624 мс) смещаются в область меньших времен релаксации. Во-вторых, заметно уменьшается интенсивность пика воды и проявляется его «набегание» на соседний пик топлива для образцов с большим временем микширования эмульсии. Этот факт, очевидно, коррелирует с уменьшением размера капель воды в топливе.

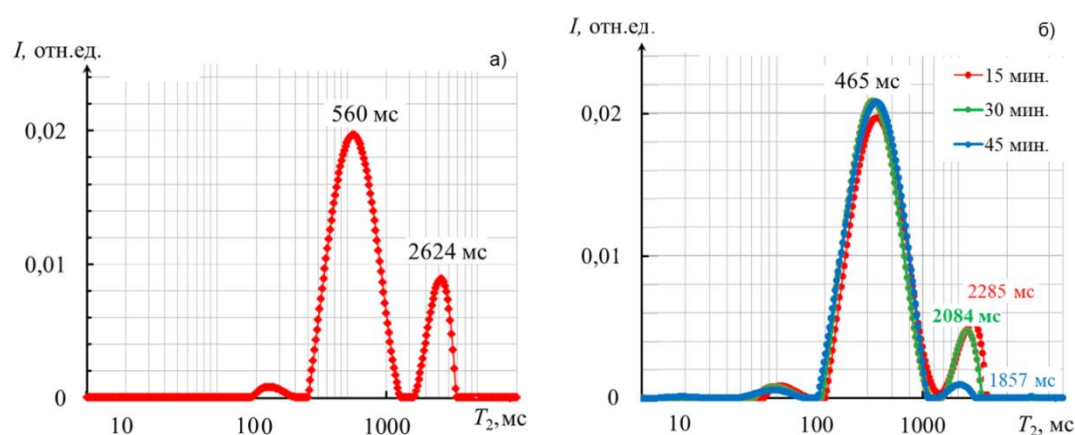


Рис. 6. Распределение времен релаксации T_2 для образцов: двухфазная система «ДТ Euro C + 20 % H₂O» (а) и эмульсия типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O + 1 % ПАВ» после эмульгирования (б)

Fig. 6. Distribution of relaxation times T_2 for samples: two-phase diesel fuel system Euro C + 20 % H₂O (a) and emulsion diesel fuel Euro C + 20 % H₂O + 1 % surfactant after emulsification (b)

Измерение времен релаксации T_2 через каждые 3 мин в течение 3-х ч сопровождается стремлением T_2 к своему значению в отслоившейся воде (рис. 7). Более длинный процесс расслаивания эмульсии наблюдается в образцах с большим временем эмульгирования.

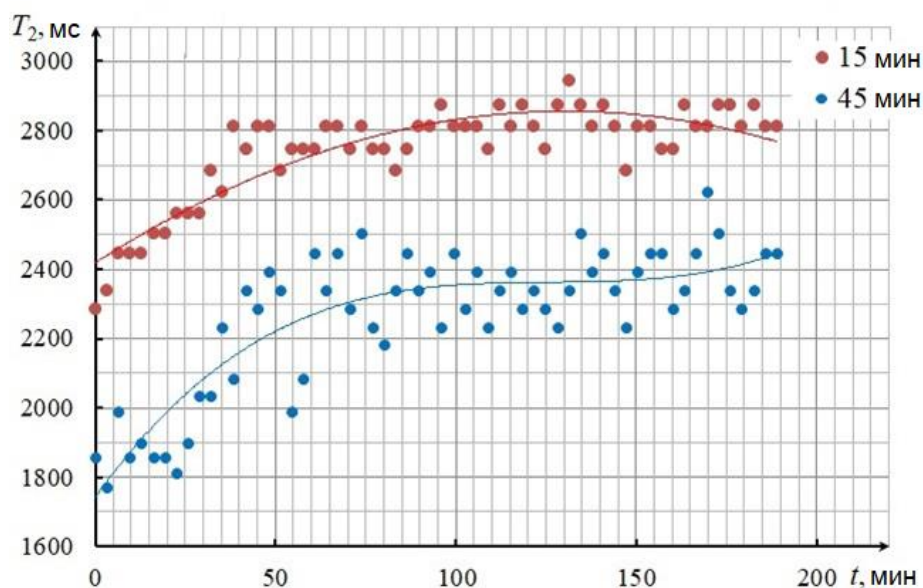


Рис. 7. График распределения времени релаксации T_2 для образцов эмульсий типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O + 1 % ПАВ», полученных при разном времени эмульгирования

Fig. 7. Graph of the relaxation time distribution T_2 for samples of emulsions diesel fuel C + 20 % H₂O + 1 % surfactants obtained with different emulsification times

Зависимости наиболее вероятных радиусов капель r от времени эмульгирования t_{mix} , полученные двумя различными методами, для эмульсий типа «ДТ Euro C + 20 % воды + 1 % ПАВ» показаны на рис. 8.

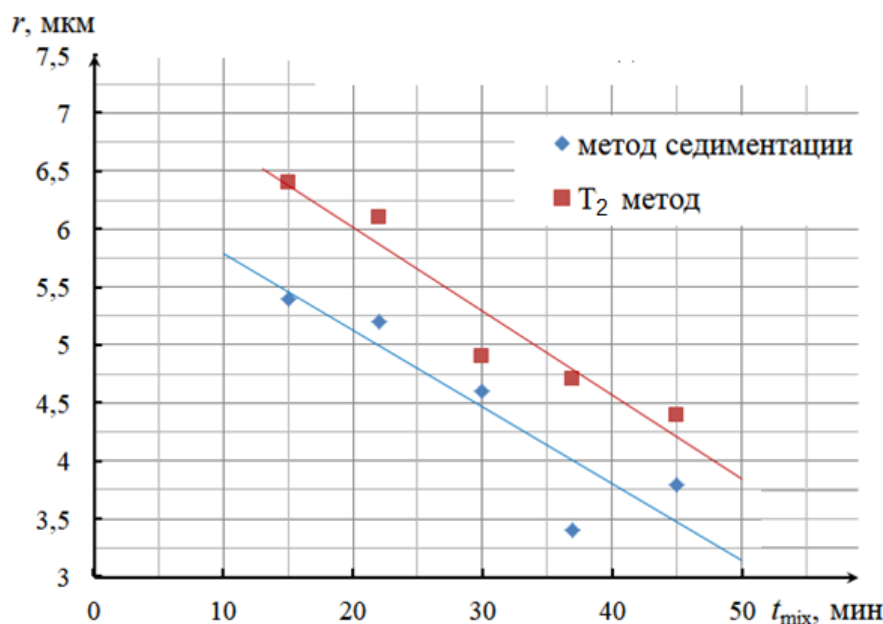


Рис. 8. Зависимости наиболее вероятных радиусов капель r от времени эмульгирования t_{mix} , полученные двумя методами, для эмульсий типа «ДТ Euro C + 20 % H_2O + 1 % ПАВ»

Fig. 8. Dependences of the most probable drop r on the t_{mix} emulsification time, obtained by two methods, for emulsions diesel fuel Euro C + 20% H_2O + 1% surfactant

Увеличение времени перемешивания эмульсии приводит к уменьшению наиболее вероятного радиуса капель воды, поверхностной релаксационности и увеличению устойчивости эмульсии. Исследования показали, что наиболее устойчивая эмульсия обеспечивается при 1%-м содержании эмульгатора. Основным параметром для оценки размеров капель в несмешивающихся жидкостях с применением явления ЯМР T_2 является поверхностная релаксационность. На сегодняшний день в научной литературе этот аспект изучается преимущественно в контексте твердых пористых матриц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе исследованы времена релаксации T_2 эмульсии на основе дизельного топлива Euro C, дистиллированной воды различной массовой концентрации и эмульгатора. Обнаружено, что стабильность эмульсии (ее существование до расслаивания на отдельные фазы) зависит от концентрации воды и ПАВ в эмульсии, а также от размера дисперсной фазы (радиуса частиц воды в топливе). Использован новый способ дисперсионного анализа частиц воды в водотопливных эмульсиях и определения поверхностной релаксационности на границе раз-

дела несмешиваемых жидкостей. Сущность метода заключается в регистрации времени поперечной релаксации ЯМР-протонов в процессе седиментации взвешенных частиц в поле силы тяжести.

Методика может быть использована для анализа грубодисперсных (10^{-6} – 10^{-4} м) капель в эмульсиях любых других органических жидкостей, результаты – в химической промышленности для разделения дисперсий «жидкость–жидкость», при проектировании оборудования для разделения фаз.

Необходим систематический подход к изучению оптимизации содержания воды в эмульсии для достижения наилучших характеристик двигателя и снижения выбросов как экспериментальными, так и численными методами, чтобы дать оптимальные рекомендации по коммерциализации водно-топливных эмульсий в качестве альтернативного источника энергии для будущих дизельных двигателей.

Список источников

1. Реологические свойства водотопливных эмульсий, приготовляемых методом впрыска воды в дизельное топливо / Л. С. Керученко, Е. И. Мальцева, С. П. Прокопов, А. С. Союнов . – DOI 10.48136/2222-0364_2022_1_129 // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2022. – № 1 (45). – С. 129–138.
2. Патров, Ф. В. Использование водотопливной эмульсии при эксплуатации судовых ДВС / Ф. В. Патров, О. С. Вахромеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. – 2009. – № 1. – С. 223–225.
3. Атия, А. М. А. Особенности подготовки водотопливных эмульсий на основе легких топлив / А. М. А. Атия // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 8. – С. 706–709.
4. Дорохов, А. Ф. Управление воспламеняемостью водотопливной эмульсии регулированием влагосодержания / А. Ф. Дорохов, Ф. В. Патров, В. В. Кабылбекова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. – 2014. – № 2. – С. 67–73.
5. Gopidesi, R. K. A review on emulsified fuels and their application in diesel engine / R. K. Gopidesi, P. S. Rajaram. – DOI: 10.1080/01430750.2019.1667435 // International Journal of Ambient Energy. – 2019. – P. 9.
6. Biplab, K. Debnath. A comprehensive review on the application of emulsions as an alternative fuel for diesel engines / K. Debnath Biplab, K. Saha Ujjwal, Sahoo Niranjan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – № 42. – P. 196 – 211.
7. Fuel properties of water emulsion fuel prepared using porous membrane method for low pollutant engine at various temperatures / W. Seungchul, K. Woongil, L. Jungkoo, L. Kihyung // Energy Reports. – 2021. – № 7. – P. 6638–6650.
8. The characteristic of spray using diesel water emulsified fuel in a diesel engine / P. Sangki, W. Seungchul, K. Hyungik, L. Kihyung // Applied Energy. – 2016. – № 176. – P. 209–220.
9. Osama, A. E. Experimental Investigation on a Diesel Engine Fueled by Diesel-Biodiesel Blends and their Emulsions at Various Engine Operating Conditions / A. E. Osama, M. R. Murari, S. S. Manpreet // Applied Energy. – 2017. – № 203. – P. 582–593.

10. Investigation into the influence of droplet size on the stability of diesel emulsions based on multiple light scattering / Liu Jincheng, Dai Shiqi, Bao Xicheng [et al.] // Journal of Molecular Liquids. – 2023. – Vol. 390 B. – Art. 123182.
11. Current trends in water-in-diesel emulsion as a fuel / M. Y. Khan, Z. A. A. Karim, F. Y. Hagos [et al.]. – DOI: 10.1155/2014/527472 // ScientificWorld Journal. – 2014. – № 1. – P. 1–15. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3916022> (дата обращения: 25.03.2026)
12. Diesel engine fuel consumption and emission analysis using steam generated non-surfactant water-in-diesel emulsion fuel / D. A. Sugeng, M.F.H.M. Zahari, A. M. Ithnin [et al.]. – DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012036 // Conference Series Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 257, № 1. – P. 012036.
13. Water-in-diesel fuel nanoemulsions: Preparation, stability and physical properties / M. R. Noor El-Din, S. H. El-Hamouly, H. M. Mohamed [et al.]. – DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012036 // Egyptian Journal of Petroleum. – 2013. – Vol. 22, № 4. – P. 517–530.
14. Кириченко, М. Н. Появление артефактного пика в распределении частиц по размерам, измеряемым методом ДРС при малых концентрациях / М. Н. Кириченко, А. Т. Саноева, Л. Л. Чайков // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2016. – № 8. – С. 32–38.
15. Исследование судовых моторных масел методом динамического рассеяния света / Н. Я. Синявский, И. П. Корнева, А. М. Иванов, Н. А. Кострикова. – DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.014 // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4 (50), часть 1. – С. 103–108.
16. Sinyavsky, N. NMR relaxometry study of demulsification of diesel fuel / N. Sinyavsky, O. Synashenko, N. Kostrikova. – DOI: 10.1007/s00723-025-01820-w // Applied Magnetic Resonance. – 2026. – № 57.

References

1. Rheological properties of water-fuel emulsions prepared by injecting water into diesel fuel / L. S. Keruchenko, E. I. Maltseva, S. P. Prokopov, A. S. Soyunov. – DOI: 10.48136/2222-0364_2022_1_129 // Bulletin of Omsk State Agrarian University. – 2022. – № 1 (45). – P. 129–138.
2. Patrov, F. V. Use of water-fuel emulsion in the operation of marine internal combustion engines / F. V. Patrov, O. S. Vakhromeev // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. – 2009. – № 1. – P. 223–225.
3. Attia, A. M. A. Features of the preparation of water-fuel emulsions based on light fuels / A. M. A. Attia // Fundamental research. – 2011. – № 8. – P. 706–709.
4. Dorokhov, A. F. Control of flammability of water-fuel emulsion by regulation of moisture content / A. F. Dorokhov, F. V. Patrov, V. V. Kabylbekova // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. – 2014. – № 2. – P. 67–73.
5. Gopidesi, R. K. A review on emulsified fuels and their application in diesel engine / R. K. Gopidesi, P. S. Rajaram. – DOI: 10.1080/01430750.2019.1667435 // International Journal of Ambient Energy. – 2019. – P. 9.

6. Biplab, K. Debnath. A comprehensive review on the application of emulsions as an alternative fuel for diesel engines / K. Debnath Biplab, K. Saha Ujjwal, Sahoo Niranjan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – № 42. – P. 196 – 211.
7. Fuel properties of water emulsion fuel prepared using porous membrane method for low pollutant engine at various temperatures / W. Seungchul, K. Woongil, L. Jungkoo, L. Kihyung // *Energy Reports*. – 2021. – № 7. – P. 6638–6650.
8. The characteristic of spray using diesel water emulsified fuel in a diesel engine / P. Sangki, W. Seungchul, K. Hyungik, L. Kihyung // *Applied Energy*. – 2016. – № 176. – P. 209–220.
9. Osama, A. E. Experimental Investigation on a Diesel Engine Fueled by Diesel-Biodiesel Blends and their Emulsions at Various Engine Operating Conditions / A. E. Osama, M. R. Murari, S. S. Manpreet // *Applied Energy*. – 2017. – № 203. – P. 582–593.
10. Investigation into the influence of droplet size on the stability of diesel emulsions based on multiple light scattering / Liu Jincheng, Dai Shiqi, Bao Xicheng [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. – 2023. – Vol. 390 B. – Art. 123182.
11. Current trends in water-in-diesel emulsion as a fuel. / M. Y. Khan, Z. A. A. Karim, F. Y. Hagos [et al.]. – DOI: 10.1155/2014/527472 // *ScientificWorld Journal*. – 2014. – № 1. – P. 1–15. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3916022> (date of treatment: 25.03.2026)
12. Diesel engine fuel consumption and emission analysis using steam generated non-surfactant water-in-diesel emulsion fuel / D. A. Sugeng, M. F. H. M. Zahari, A. M. Ithnin [et al.]. – DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012036 // *Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 257, № 1. – P. 012036.
13. Water-in-diesel fuel nanoemulsions: Preparation, stability and physical properties / M. R. Noor El-Din, S. H. El-Hamouly, H. M. Mohamed [et al.]. – DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012036 // *Egyptian Journal of Petroleum*. – 2013. – Vol. 22, № 4. – P. 517–530.
14. Kirichenko, M. N. Appearance of an artifact peak in the particle size distribution measured by the DLS method at low concentrations / M. N. Kirichenko, A. T. Sanoeva, L. L. Chaikov // *Brief communications on physics of the Lebedev Physical Institute*. – 2016. – № 8. – P. 32–38.
15. Study of marine motor oils by dynamic light scattering method / N. Ya. Sinyavsky, I. P. Korneva, A. M. Ivanov, N. A. Kostrikova. – DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.014 // *Marine intelligent technologies*. – 2020. – № 4 (50), part 1. – P. 103–108.
16. Sinyavsky, N. NMR relaxometry study of demulsification of diesel fuel / N. Sinyavsky, O. Synashenko, N. Kostrikova. – DOI: 10.1007/s00723-025-01820-w // *Applied Magnetic Resonance*. – 2026. – № 57.

Информация об авторах

О. В. Сынашенко – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики

Н. Я. Синявский – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики

Н. А. Кострикова – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе

Information about the author

O. V. Synashenko – Candidate of Physical and Mathematical sciences, Associate Professor of the Department of Physics

N. Ya. Sinyavsky – Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor, Head of the Department of Physics

N. A. Kostrikova – Candidate of Physical and Mathematical sciences, Associate professor, Vice-rector for research

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 20.03.2026; одобрена после рецензирования 06.04.2026; принята к публикации 16.04.2026.

The article was submitted 20.03.2026; approved after reviewing 06.04.2026; accepted for publication 16.04.2026.