

КАЛОИДНАЯ ХИМИЯ
COLLOIDAL CHEMISTRYУДК 544.77
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-169-177>Поступила в редакцию 05.04.2022
Received 05.04.2022**Н. В. Яковец, Н. П. Крутько***Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ПОЛУЧЕНИЕ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ СО СМЕШАННОЙ ОРГАНИЧЕСКОЙ ФАЗОЙ**

Аннотация. Работа посвящена получению концентрированных топливных эмульсий типа «вода в масле» (эмульсий II рода, обратных эмульсий) со смешанной органической фазой (углеводороды из дизельного топлива и сивушного масла), стабилизированных поверхностно-активными композициями на основе карбоновых кислот и аминоксодержащих соединений. Использование водотопливных эмульсий на основе жидких углеводородов перспективно для снижения расходов в нефтехимической отрасли, повышения энергосбережения и улучшения экологии путем утилизации отходов ректификации спиртов. Эмульсии не теряют качества при длительном хранении и способны сгорать с высокой тепловой эффективностью. Синтезированные поверхностно-активные реагенты, которые используются в качестве стабилизаторов эмульсий, исследованы методом ИК-спектроскопии. Для них тензиометрическим методом получены изотермы поверхностного натяжения, определены их коллоидно-химические характеристики (критическая концентрация мицеллообразования и соответствующее ей поверхностное натяжение водного раствора, максимальная адсорбция на границе раздела раствор–воздух, свободная энергия адсорбции Гиббса, площадь, приходящаяся на молекулу или ион в поверхностном слое, гидрофильно-липофильный баланс), оценена их эмульгирующая способность. Проведено визуальное микроскопическое наблюдение за структурой полученных эмульсий. Изучена стабильность эмульсий при различных температурах и длительном хранении.

Ключевые слова: концентрированные топливные эмульсии, дизельное топливо, сивушное масло, поверхностно-активные вещества, изотермы поверхностного натяжения, эмульгирование, стабильность

Для цитирования. Яковец, Н. В. Получение стабилизированных концентрированных топливных эмульсий со смешанной органической фазой / Н. В. Яковец, Н. П. Крутько // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 169–177. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-169-177>

N. V. Yakavets, N. P. Krut'ko*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***OBTAINING STABILIZED CONCENTRATED FUEL EMULSIONS WITH A MIXED ORGANIC PHASE**

Abstract. The work is devoted to obtaining concentrated water-in-oil emulsions (emulsions of II type, inverse emulsions) with a mixed organic phase (hydrocarbons from diesel fuel and fusel oil), stabilized by surface-active compositions based on carboxylic acids and amine-containing compounds. The use of water-fuel emulsions based on liquid hydrocarbons is promising for reduction of costs in the petrochemical industry, energy saving increase and improvement of the environment by disposing of waste from alcohols distillation. The emulsions do not lose quality during long-term storage and are able to burn with high thermal efficiency. The synthesized surfactants used as emulsion stabilizers were studied by IR spectroscopy. For them, the surface tension isotherms were obtained by the tensiometric method, their colloid-chemical characteristics were determined (the critical concentration of micellization and the corresponding surface tension of an aqueous solution, the maximum adsorption at the solution-air interface, the Gibbs free energy of adsorption, the area per molecule or ion in the surface layer, hydrophilic-lipophilic balance), their emulsifying ability was evaluated. Visual microscopic observation of the structure of the obtained emulsions was carried out. The stability of emulsions at various temperatures and during long-term storage has been studied.

Keywords: concentrated fuel emulsions, diesel fuel, fusel oil, surfactants, surface tension isotherms, emulsification, stability

For citation. Yakavets N. V., Krut'ko N. P. Obtaining stabilized concentrated fuel emulsions with a mixed organic phase. Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series, 2022, vol. 58, no. 2, pp.169–177 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-169-177>

Введение. В настоящее время особую актуальность приобретают новые способы подготовки топлив, позволяющие снизить расходы, повысить энергосбережение и улучшить экологию. К ним относят замену дизельного топлива на сверхстойкие водотопливные эмульсии на основе жидких углеводородов [1]. Интерес к альтернативному топливу в виде водно-дизельных эмульсий проявляют исследователи из стран Европы, Российской Федерации, Бразилии, Малайзии и др. [1–6]. Данные объекты не теряют качества при длительном хранении и последующем сгорании с высокой тепловой эффективностью. Их можно использовать в двигателях внутреннего сгорания различного назначения и котельных установках при значительном улучшении экологических характеристик продуктов сгорания и снижении нагарообразования. Вода является катализатором горения, что также повышает полноту сгорания топлива [3].

Подобные эмульсии и микроэмульсии типа «вода в масле» являются концентрированными и высококонцентрированными структурированными дисперсными системами, их довольно сложно получить, поэтому данные объекты имеют особый интерес для исследователей в области коллоидной химии [2, 7–12]. Их получают, как правило, путем механического диспергирования (встряхиванием, энергичным перемешиванием, воздействием ультразвука), а также путем выдавливания вещества дисперсной фазы через тонкие отверстия в дисперсионную среду под давлением. Считается, что оптимальный размер частиц воды в водотопливных эмульсиях составляет 5–10 мкм.

В работе изучена возможность использования в качестве компонента эмульсий смешанной органической фазы, представляющей собой композицию из дизельного топлива и сивушного масла. С целью ресурсосбережения дизельного топлива применяли сивушное масло, которое является побочным продуктом ректификации этилового спирта-сырца и представляет собой смесь спиртов (амиловых, изобутилового, *n*-пропилового и этилового), воды и в незначительных количествах других органических соединений (всего около 40 компонентов). Оно служит сырьем для получения технических спиртов, применяемых в пищевой, парфюмерной, фармацевтической, лакокрасочной промышленности, биоэтанола, компонента моторного топлива и в других отраслях народного хозяйства. Объемная доля органических соединений в сивушном масле составляет $\geq 50\%$.

При приготовлении концентрированных эмульсий на основе дизельного топлива для придания им стабильности, как правило, необходимо дополнительно вводить поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые участвуют в эмульгировании и выполняют роль стабилизатора системы [6, 13]. В литературе примером получения эмульсионной системы на основе дизельного топлива является состав, полученный при постепенном перемешивании воды в количестве 10 мас.% от массы всей эмульсии, анионного ПАВ, в качестве которого используется диоктилсульфосукцинат натрия в ароматическом растворителе (массовое соотношение ПАВ в системе с водой 1:1), последующее добавление полученной системы в дизельное топливо, взятое в количестве 80 мас.% от массы всей эмульсии [14]. Кроме того, также показана эффективность получения эмульсионных систем на основе дизельного топлива и воды (~ 6 %) с использованием в качестве ПАВ этоксилированного (5 ОЭ) нонилфенола [6].

Механизм действия воды на горение топлива заключается в том, что капли воды оптимального размера начинают кипеть раньше топлива, вызывая «микровзрыв» капли эмульсии, улучшая распыление топлива, увеличивая площадь соприкосновения топлива с кислородом воздуха. Вода резко вскипает, а углеводородная фаза в это время остается еще в жидком состоянии и препятствует испарению капель воды. При достижении внутри системы критического давления происходит микровзрыв, когда водяной пар разрывает свою оболочку и распыляет ее [3].

Цель данной работы – получение концентрированных топливных эмульсий со смешанной органической фазой (углеводороды, содержащиеся в дизельном топливе и сивушном масле), стабилизированных разработанными ПАВ, которые представляют собой композиции на основе органических кислот и аминокислотных компонентов.

Методы исследования. Метод ИК-спектроскопии применяли для получения информации об основных функциональных группах синтезированных поверхностно-активных эмульгаторов. Исследования проводили в диапазоне 4000–450 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹ при 20 ± 1 °С

на ИК-спектрометре M 2000 с Фурье-преобразователем FTIR SPECTROMETER (MIDAC, США). Образцы готовили путем нанесения жидкого образца тонким слоем на пластину KRS.

Измерения поверхностного натяжения растворов ПАВ проводили при pH 11,5 на границе раздела раствор/воздух в изотермических условиях при $30 \pm 0,5$ °C полустатическим методом Дю-Нуи (радиус кольца 9,544 мм, радиус сечения проволоки 0,185 мм) на автоматическом приборе «Процессор Тензиометр K100 МК 2» (KRÜSS GmbH, Германия) на базе программного обеспечения LabDesk™. Точность измерения $\pm 1 \times 10^{-5}$ г.

Поверхностное натяжение на границе раздела раствор/воздух рассчитывали по формуле:

$$\sigma = \frac{F_{\max} - F_v}{L \cos \theta}, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости, мН/м; F_{\max} – максимальная сила, мН; F_v – сила, учитывающая массу поднимаемой жидкости, мН; L – длина смачивания, м; θ – угол смачивания, град.

По результатам тензиометрических измерений после построения изотерм поверхностного натяжения определены коллоидно-химические характеристики ПАВ: критическая концентрация мицеллообразования ($C_{\text{ККМ}}$), поверхностное натяжение водного раствора ПАВ при критической концентрации мицеллообразования ($\sigma_{\text{ККМ}}$), максимальная адсорбция на границе раздела раствор/воздух (Γ_m), свободная энергия адсорбции Гиббса (G), площадь приходящаяся на молекулу или ион в поверхностном слое (S_m), гидрофильно-липофильный баланс (ГЛБ) [13, 15].

Для расчета максимальной адсорбции ПАВ использовали уравнение Гиббса в виде

$$(d\sigma / \ln C)_T = -RT\Gamma_m, \quad (2)$$

поскольку измерение поверхностного натяжения проводили в присутствии избытка электролита.

По значениям Γ_m рассчитывали посадочные площадки S_m адсорбированной молекулы или иона ПАВ:

$$S_m = \frac{1}{\Gamma_m N}, \quad (3)$$

где N – число Авогадро.

Стандартную свободную энергию адсорбции на границе раствор/воздух рассчитывали по уравнению:

$$G = RT \ln \frac{C_{\text{ККМ}}}{M}, \quad (4)$$

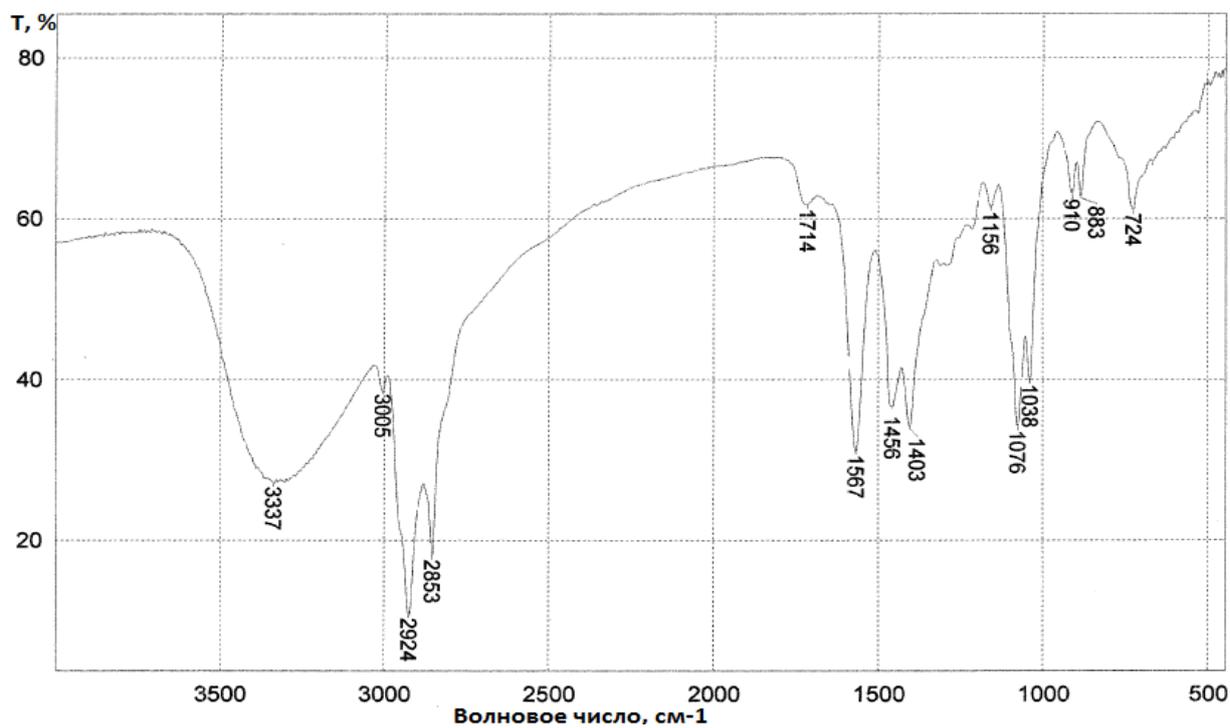
где M – молярность растворителя (в случае воды $M = 55,5$ моль/л).

Величина ГЛБ является мерой сбалансированности полярной и не полярной частей молекулы, т.е. гидрофильных и гидрофобных свойств ПАВ [15]. ГЛБ исследуемых ПАВ рассчитывали с использованием критических концентраций мицеллообразования в соответствии с уравнением:

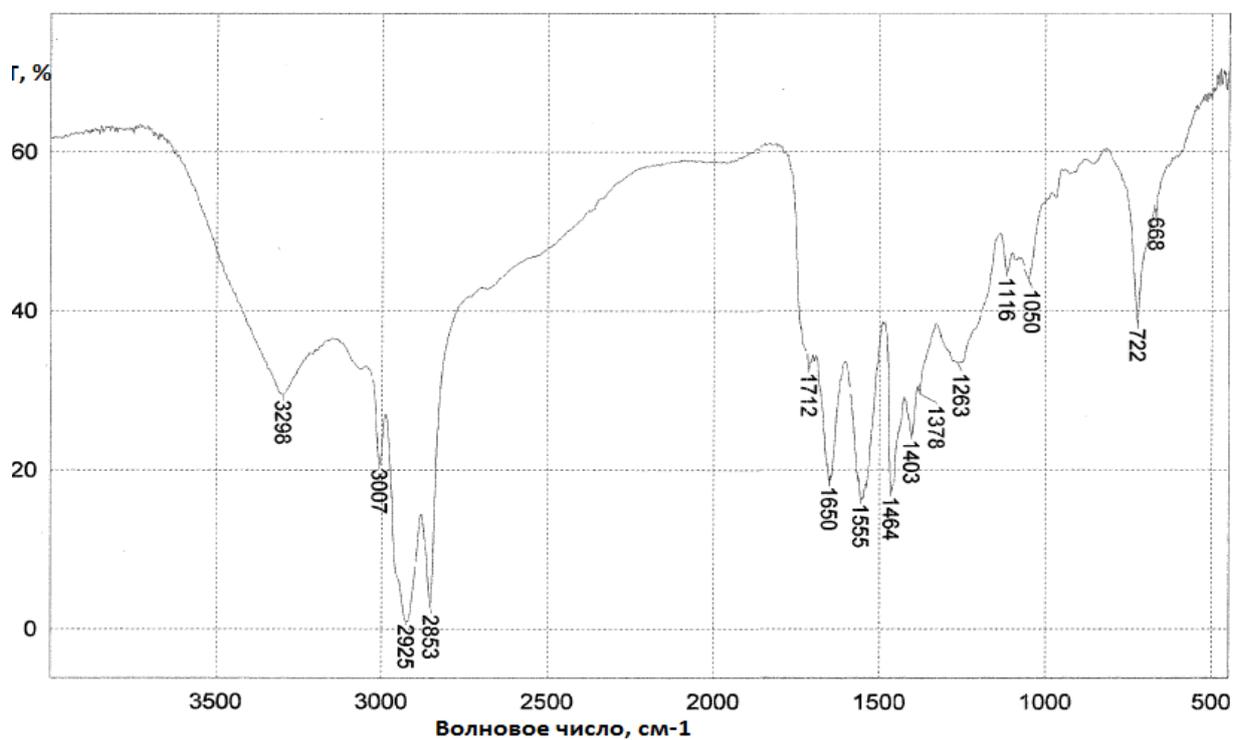
$$\ln C_{\text{ККМ}} = -16,33 + 0,718 \text{ ГЛБ}. \quad (5)$$

Для получения эмульсий использовали процесс эмульгирования, который происходит при механическом воздействии на двухфазные смеси углеводородов и воды [13], а также диспергирование с использованием механического перемешивания на магнитной мешалке с подогревом или на роторно-статорном диспергаторе ULTRA-TURRAX T 25 basic (IKA^R-WERKE, Германия) в присутствии ПАВ.

Структуру эмульсий оценивали с помощью микроскопических исследований на телевизионном микроскопе «Телемик-1» (ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», Россия) при увеличении $\times 100$ раз. Устойчивость эмульсий проверяли при замораживании -18 °C в течение суток и последующей разморозке при температуре 20 °C.



a



b

Рис. 1. ИК-спектр полученных поверхностно-активных соединений: ОК+ТЭА (*a*), ОК+ЭРМ+ДЭТА (*b*)

Fig. 1. Infrared spectrum of derived surface-active compounds: OA+TEA (*a*), OA+EpCO+DETA (*b*)

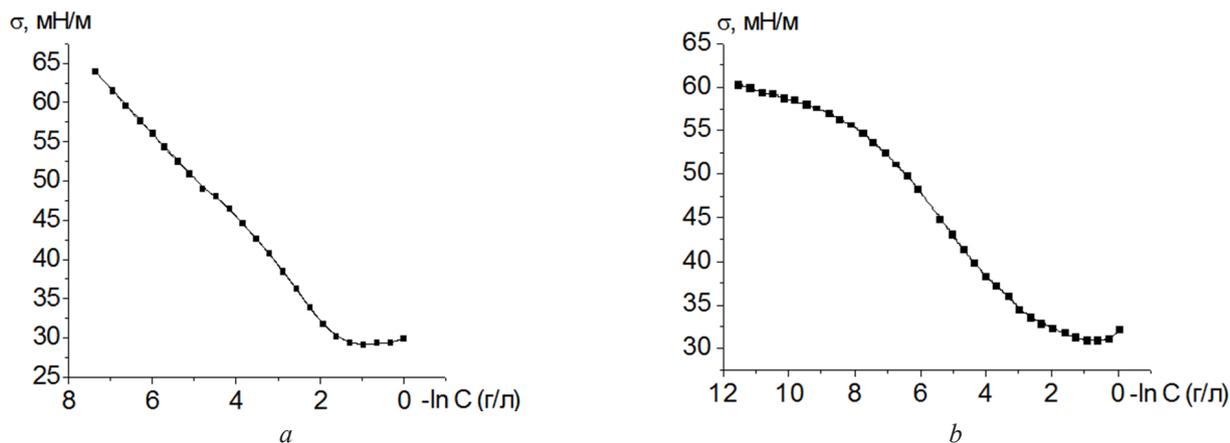


Рис. 2. Изотермы поверхностного натяжения водных растворов исследуемых ПАВ: ОК+ТЭА (а) и ОК + ЭРМ +ДЭТА (b)

Fig. 2. Isotherms of the surface tension of aqueous solutions of the studied surfactants: OA+TEA (a), OA+ЭРМ+ДЕТА (b)

Результаты и их обсуждение. Объекты исследований – концентрированные эмульсии, в состав которых входило дизельное топливо, сивушное масло, содержащее воду, и ПАВ. Сивушное масло (ГОСТ 17071-91) представляет собой прозрачную маслянистую жидкость с резким запахом светло-желтого цвета, не содержащую механических примесей и характеризующуюся следующими физико-химическими показателями: температурный предел перегонки при давлении 101,325 кПа – не менее 120 °С, плотность при 20 °С $\leq 0,837$ г/см³, показатель преломления $\geq 1,395$. В работе применяли дизельное топливо (СТБ 1658-2015), обладающее достаточно высокой температурой кипения и вспышки ($T_{всп} = 69$ –119 °С; $T_{кип} = 280$ °С), т.е. характеризуется достаточно высокой пожаробезопасностью и не требует дополнительных затрат при эксплуатации и дозировке.

В эксперименте использовали разработанные и синтезированные нами ПАВ: 1) ОК+ТЭА образуется по реакции нейтрализации мягкого основания низкомолекулярного аминок спирта (триэтанолamina, ТЭА) с олеиновой кислотой (ОК); 2) ОК+ЭРМ+ДЭТА – композиция на основе ОК, диэтилентриамина (ДЭТА) и эпоксидированного рапсового масла (ЭРМ), которая получается в результате протекания реакции аминирования карбоновых кислот с образованием аминокпроизводных жирных кислот (аммониевых солей или амидов), воды и свободного глицерина [15].

На основании анализа ИК-спектров для полученных ПАВ (рис. 1) установлено, что присутствуют полосы валентных и деформационных колебаний для углеводородных фрагментов (668, 722 (724), 1378, 1456 (1464), дуплет 2853 и 2924 (2925) см⁻¹), валентных колебаний между атомами углерода и кислорода (1050 и 1116; 1038, 1076 и 1156 см⁻¹), деформационных и валентных колебаний гидроксильных –О–Н (1403, 3005 (3007) см⁻¹) групп.

На спектрах также есть характеристические полосы для валентных колебаний эфирных групп карбоновых кислот $>C=O$ 1263 и 1712 см⁻¹, а также полосы 1555 (1567) и 1650 см⁻¹, отвечающие за деформационные колебания $>N-H$ (полосы амида карбоновой кислоты, амид II), и 3298 и 3337 см⁻¹, характеризующие валентные колебания аминок групп для ассоциированных аминов. Данные факты свидетельствуют о ряде химических взаимодействий и образовании соединений, содержащих реакционноспособные гидроксильные и карбоксильные, amino- и амидогруппы и др.

Для изучения коллоидно-химических свойств исследуемых ПАВ готовили их разбавленные растворы (начальная концентрация 1 г/л) в присутствии избытка гидроксида натрия. Для композиции состава ОК+ЭРМ+ДЭТА, характеризующейся более низкой растворимостью в воде, чем этаноламиновое мыло ОК+ТЭА, для приготовления истинных растворов предварительно к навеске ПАВ добавляли гидротропный компонент – изопропиловый спирт (1,6 мас.%). Затем в колбу добавляли дистиллированную воду, подщелоченную до pH 11,5, чтобы исключить влияние гидролиза на точность измерения разбавленных растворов [15].

На рис. 2 приведены изотермы поверхностного натяжения водных растворов исследуемых ПАВ в щелочной среде, которые позволяют зафиксировать два сопряженных явления: завершение

формирования адсорбционного слоя на поверхности раствора и возникновение мицелл в объеме жидкой фазы [13].

Полученные в результате эксперимента изотермы для исследуемых ПАВ имеют классический вид, характерный для растворов индивидуальных мицеллообразующих ПАВ, что подтверждает факт образования ПАВ в результате химического взаимодействия между компонентами в процессе протекания мультикомпонентной реакции. На основании изотерм поверхностного натяжения (рис. 2) рассчитаны коллоидно-химические характеристики ПАВ на границе раздела фаз раствор/воздух, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коллоидно-химические характеристики водных растворов ПАВ

Table 1. Colloid-chemical characteristics of aqueous solutions of surfactants

ПАВ	$C_{\text{ККМ}}$, г/л	$\sigma_{\text{ККМ}}$, мН/м	$\Gamma_m \cdot 10^6$, моль/м ²	$S_m \cdot 10^{20}$, м ²	$-G \cdot 10^3$, Дж/моль	ГЛБ
ОК+ТЭА	0,228	29,94	2,62	63,37	29,03	20,7
ОК+ЭРМ+ДЭТА	0,312	30,81	0,74	224,86	31,39	21,1

Представленные показатели близки по своим значениям и характеризуют исследуемые ПАВ как эффективные мицеллообразующие системы за исключением максимальной адсорбции и посадочной площадки, которые отличаются в 3,5 раза. Следовательно, ОК+ТЭА является более перспективным поверхностно-активным объектом для дальнейшего применения в качестве эмульгатора. Полученные значения ГЛБ – критерии оценки качества ПАВ, их поверхностных и объемных свойств. Значения ГЛБ исследуемых ПАВ довольно высоки. Поэтому они являются гидрофильными компонентами, солюбилизующими агентами, которые можно использовать для разных целей в нефтяной промышленности [15, 16]. Солюбилизация приводит к более равномерному распределению углеводородов по всему объему, так как происходит увеличение энтропии при переходе углеводорода из капли в мицеллы ПАВ, которое сопровождается дополнительным снижением межфазного натяжения и межфазной турбулентностью. Данные ПАВ выполняют роль эмульгаторов, которые добавляются в низких концентрациях, чтобы улучшить стабильность эмульсий и снизить потребность в энергии смешивания, они позволяют дольше сохранять водно-дизельное топливо.

В данной работе для получения концентрированных эмульсий методом *in situ* ПАВ, например ОК+ТЭА, у которого поверхностное натяжение ($\sigma = 29,94$ мН/м) близко к аналогичному значению для дизельного топлива ($\sigma = 27,96$ мН/м), вводили в систему, что способствует протеканию самопроизвольного эмульгирования. На межфазной границе раздела вода/масло происходит резкое снижение поверхностного натяжения и солюбилизация органической фазы мицеллярными растворами ПАВ, что приводит к образованию структурированной коллоидной системы, содержащей более 72 % дизельного топлива.

Результаты эксперимента по получению топливных эмульсий приведены в табл. 2. Целевой объем эмульсии при синтезе в лабораторных условиях составлял 65 мл. Процесс перемешивания при получении эмульсии около 2 ч. Как правило, для всех случаев применяли перемешивание на магнитной мешалке с одинаковой скоростью вращения якоря, за исключением системы № 6, где использовали диспергатор ULTRA-TURRAX T 25 basic и лабораторный реактор погружали в водяную баню с $T = 50$ °С.

В результате эксперимента при визуальном наблюдении за динамикой устойчивости эмульсий установлено, что наиболее устойчивыми к коалесценции являются эмульсии № 1, 2, 5.

Структура эмульсий № 1 и 2 была оценена на телевизионном микроскопе «Телемик-1», предназначенном для углубленного исследования микрофрагментов контролируемого объекта в излучении видимого диапазона при проходящем свете. Для сравнения была приготовлена контрольная система из дизельного топлива и сивушного масла в объемном соотношении 5:1, которая представляла собой мутную жидкость светло-желтого цвета. В результате установлено, что при наблюдении под микроскопом при 100-кратном увеличении эмульсии № 1 и 2 однородны по сравнению с контрольной.

Далее полученные эмульсии № 1, 2 и контрольный образец без ПАВ исследовали на стабильность при различных температурах окружающего воздуха. Эти дисперсные системы подвергали испытаниям с изменением температуры: замораживанию в течение суток при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и последующей разморозке при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, в результате чего происходил переход из расслоившейся системы при понижении температуры к первоначальной однородной при выдерживании при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при встряхивании вручную пробирок с эмульсиями № 1 и 2, при этом контрольный образец остается неоднородным и подвергается дальнейшему расслоению. Согласно литературным данным [1], стабильными считаются топливные эмульсии, которые не расслаиваются на отдельные фазы в течение трех месяцев. Нами была получена лабораторная партия топливной эмульсии ($V = 1,5\text{ л}$), стабилизированной ОК+ТЭА по рецептуре № 2 (табл. 2), которая сохраняла стабильность при длительном хранении при комнатной температуре в течение 8 месяцев.

Т а б л и ц а 2. Состав полученных концентрированных топливных эмульсий

T a b l e 2. Composition of the resulting concentrated fuel emulsions

Номер образца	Содержание компонентов в системе, %			Описание полученной системы
	ПАВ	сивушное масло с водой, %	дизельное топливо, %	
1	7,69 % ОК+ЭРМ+ДЭТА	15,38	76,92	Однородная жидкая прозрачная система красноватого цвета
2	7,69 % ОК+ТЭА	15,38	76,92	Однородная жидкая прозрачная система желтоватого цвета
3	4 % смеси исследуемых ПАВ (1:1)	15,38	80,62	Неоднородная система, содержащая отдельные, не проэмульгированные капельки воды
4	5 % ОК+ТЭА	10	85	В системе видны мелкодисперсные капельки воды после прекращения перемешивания, агрегация капель эмульсии
5	6 % ОК+ТЭА	10	84	Однородная жидкая прозрачная система желтоватого цвета
6	8 % ОК+ТЭА	20	72	В системе наблюдаются отдельные мелкодисперсные капельки, на поверхности много пены, после разрушения которой система становится прозрачной, однородной, желтоватого цвета, однако затем происходит коалесценция капель эмульсии и появляется водная фаза
7	6 % ОК+ТЭА	19	75	Использовалась закрытая система при эмульгировании. Жидкая прозрачная система желтоватого цвета с мелкодисперсными каплями воды на дне

Заключение. Подтверждена практическая возможность получения эмульсионных топливных систем «вода в масле» со смешанной органической фазой, которые потенциально позволяют снизить расход топлива и температуру сгорания, дают возможность эффективнее проводить процесс сжигания и уменьшать выбросы оксидов азота и сажи в атмосферу, а также рационально утилизировать сивушное масло.

В результате лабораторных исследований выявлено, что наиболее однородными и устойчивыми являются топливные эмульсии типа «вода в масле», характеризующиеся процентным соотношением дизельное топливо/сивушное масло/ПАВ-эмульгатор – 76,9–84/10–15,3/6–7,7. Показано, что более эффективным эмульгатором оказался реагент на основе триэтаноламина и олеиновой кислоты. Экспериментально установлено, что эмульсии способны сохранять свойства при внешних температурных воздействиях, поэтому в дальнейшем перспективно изучить реологические свойства подобных систем для оценки их поведения под действием напряжения сдвига, а также оценить их теплотворную способность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ваганов, К. В. Разработка способов снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу путем модифицирования дизельных топлив: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 03.00.16 / К. В. Ваганов ; Пермский гос. техн. ун-т. – Пермь, 2010. – 16 с.
2. Current Trends in Water-in-Diesel Emulsion as a Fuel / M. Y. Khan [et al.] // *Sci. World J.* – 2014. – Article ID 527472. – 15 pages. <http://doi.org/10.1155/2014/527472>
3. Применение водно-топливных эмульсий (ВТЭ) в топливных технологиях [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/science/Energetika/332105-primenenie-vodno-toplivnykh-emulsiy-vte-v-toplivnykh-tehnologiyakh/>. – Дата доступа: 18.02.2022.
4. Ghojel, J. Heat release model for the combustion of diesel oil emulsions in DI diesel engines / J. Ghojel, D. Honnery // *Appl. Therm. Eng.* – 2005. – Vol. 25, iss. 14–15. – P. 2072–2085. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.01.016>
5. Uslum, S. Combustion and emission characteristics of isoamyl alcohol-gasoline blends in spark ignition engine / S. Uslum, C. Bahattin // *Fuel*. – 2020. – Vol. 262. – P. 116496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116496>
6. Alternative fuels composed by blends of nonionic surfactant with diesel an water: engine performance and emissions / A. A. Dantas Neto [et al.] // *Braz. J. Chem. Eng.* – 2011. – Vol. 28, N 3. – P. 521–531. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000300017>
7. Babak, V. G. Highly concentrated emulsions. Physicochemical principles of the preparation and stability / V. G. Babak // *Russ. Chem. Rev.* – 2008. – Vol. 77, N 8. – P. 683–708. <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n08ABEH003794>
8. Highly concentrated (gel) emulsions: formation and properties (Chapter 13) / C. Solans [et al.] // *Interface Science and Technology*. – 2004. – Vol. 4. – P. 511–555. [https://doi.org/10.1016/s1573-4285\(04\)80015-2](https://doi.org/10.1016/s1573-4285(04)80015-2)
9. Zinchenko, A. Z. Hydrodynamical interaction of deformable drops (Chapter 10) / A. Z. Zinchenko, R. H. Davis // *Interface Science and Technology*. – 2004. – Vol. 4. – P. 391–447. [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(04\)80012-7](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(04)80012-7)
10. Physical chemistry of highly concentrated emulsions / R. Foudazi [et al.] // *Adv. Colloid Interface Sci.* – 2015. – Vol. 220. – P. 78–91. <http://doi.org/10.1016/j.cis.2015.03.002>
11. Babak, V. G. Highly Concentrated Emulsions: Physicochemical Principles of Formulation / V. G. Babak, M.-J. Stébé // *J. Dispers. Sci. Technol.* – 2002. – Vol. 23, iss. 1–3. – P. 1–22. <https://doi.org/10.1080/01932690208984184>
12. Emulsification of highly concentrated emulsions – A criterion of shear stability / I. Masalova [et al.] // *J. Rheol.* – 2018. – Vol. 62. – P. 781–790. <https://doi.org/10.1122/1.5018794>
13. Способ получения эмульсионного состава дизельного топлива: пат. RU 2 616 921 / А. А. Сибирякова, Е. А. Гордиенко, А. В. Таран, Ю. А. Таран. – Оpubл. 18.04.2017.
14. Абрамзон, А. А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение / А. А. Абрамзон. – Л.: Химия, 1981. – 304 с.
15. Опанасенко, О. Н. Поверхностные свойства анионно-ориентированных цвиттер-ионных ПАВ на основе аминов и карбоновых кислот / О. Н. Опанасенко, Н. В. Яковец, Н. П. Крутько // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук.* – 2017. – № 3. – С. 29–37.
16. Ланге, К. Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение / К. Р. Ланге. – СПб.: Профессия, 2005. – 240 с.

References

1. Vaganov K. V. *Development of ways to reduce emissions of pollutants into the atmosphere by modifying diesel fuels*. Perm, 2010. 16 p. (in Russian).
2. Khan M. Y., Abdul Karim Z. A., Hagos F. Y., Aziz A. R. A., Tan I. M. Current Trends in Water-in-Diesel Emulsion as a Fuel. *The Scientific World Journal*, 2014, Article ID 527472. <http://doi.org/10.1155/2014/527472>
3. *The use of water-fuel emulsions (WFE) in fuel technologies*. 2010. Available at: <https://neftegaz.ru/science/Energetika/332105-primenenie-vodno-toplivnykh-emulsiy-vte-v-toplivnykh-tehnologiyakh/> (accessed 19 February 2021) (in Russian).
4. Ghojel J., Honnery D. Heat release model for the combustion of diesel oil emulsions in DI diesel engines. *Applied Thermal Engineering*, 2005, vol. 25, iss. 14-15. pp. 2072–2085. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.01.016>
5. Uslum S., Bahattin C. Combustion and emission characteristics of isoamyl alcohol-gasoline blends in spark ignition engine. *Fuel*, 2020, vol. 262, pp. 116496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116496>
6. Dantas Neto A. A., Fernandes M. R., Barros Neto E. L., Castro Dantas T. N., Moura M. C. P. A. Alternative fuels composed by blends of nonionic surfactant with diesel an water: engine performance and emissions. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2011, vol. 28, no. 3, pp. 521–531. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000300017>
7. Babak V. G. Highly concentrated emulsions. Physicochemical principles of the preparation and stability. *Russian Chemical Reviews*, 2008, vol. 77, no. 8, pp. 683–708. <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n08ABEH003794>
8. Solans C., Esquena J., Azemar N., Rodriguez C., Kunieda H. Highly concentrated (gel) emulsions: formation and properties (Chapter 13). *Interface Science and Technology*, 2004, vol. 4, pp. 511–555. [https://doi.org/10.1016/s1573-4285\(04\)80015-2](https://doi.org/10.1016/s1573-4285(04)80015-2)
9. Zinchenko A. Z., Davis R. H. Hydrodynamical interaction of deformable drops (Chapter 10). *Interface Science and Technology*, 2004, vol. 4, pp. 391–447. [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(04\)80012-7](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(04)80012-7)
10. Foudazi R., Qavi S., Masalova I., Malkin A. Ya. Physical chemistry of highly concentrated emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, vol. 220, pp. 78–91. <http://doi.org/10.1016/j.cis.2015.03.002>

11. Babak V. G., Stébé M.-J. Highly Concentrated Emulsions: Physicochemical Principles of Formulation. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2002, vol. 23, no. 1–3, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1080/01932690208984184>
12. Masalova I., Fabrice K. K., Tshilumbu N. N., Naziem G., Malkin A. Ya. Emulsification of highly concentrated emulsions – A criterion of shear stability. *Journal of Rheology*, 2018, vol. 62, pp. 781–790. <https://doi.org/10.1122/1.5018794>
13. Sibiryakova A. A., Gordienko E. A., Taran A. V., Taran YU. A. *Method of obtaining emulsion composition of diesel fuel*. Patent RU 2 616 921. Publ. date 18.04.2017 (in Russian).
14. Abramzon A. A. *Surfactants. Properties and application*. Leningrad, Khimiya Publ., 1981. 304 p. (in Russian).
15. Opanasenko O. N., Yakavets N. V., Krut'ko N. P. Surface properties of anionically-oriented zwitterionic surfactants based on amines and carboxylic acids. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnyh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*. 2017, no. 3, pp. 29–37 (in Russian).
16. Lange K. R. *Surfactants: synthesis, properties, analysis, application*. St. Petersburg, Professiya Publ., 2005. 240 p. (in Russian).

Информация об авторах

Яковец Наталья Вячеславовна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yakovetsnatalya@gmail.com

Крут'ко Николай Павлович – академик НАН Беларуси, д-р хим. наук, зав. отделом. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Information about the authors

Yakovets Natalia V. – Ph. D (Chemistry), Senior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yakovetsnatalya@gmail.com

Krut'ko Nikolai P. – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Chemistry), Head of the Department. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: krutko@igic.bas-net.by