

**М. З. Зарифьянова, Д. Д. Аврамович, А. В. Шарифуллин,
М. А. Бочков, А. П. Андреев, Е. Р. Мадзу Гантсу, Р. Ф. Гимадетдинова**

ТЕРМОДИНАМИКА ЭКСТРАКЦИОННОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАФТЕНОВЫХ КИСЛОТ МЕЖДУ ВОДНЫМИ И УГЛЕВОДОРОДНЫМИ СРЕДАМИ

Ключевые слова: жидкостная экстракция, протонодонорные экстрагенты, нафтенновые кислоты, термодинамические характеристики, коэффициент распределения.

Данное исследование посвящено определению энтальпии (ΔH_p), энергии Гиббса (ΔG_p) и энтропии (ΔS_p) распределения нафтенновых кислот между водными растворами изопропилового спирта и *n*-деканом, которые могут быть использованы для обоснования условий осуществления процесса их экстрагирования из среднестиллятных нефтяных фракций. Исследования проводили на модельной системе, состоящей из нафтенной кислоты, выделенной из дизельной фракции бакинской нефти, и *n*-деканом. Концентрация кислот в растворе составляла $0,06 \div 0,52$ моль/л. Экстракцию проводили водными растворами изопропилового спирта с содержанием воды $15 \div 50$ % об. при температурах 298-328 К. Линейная аппроксимация выполнена в пакете Excel с использованием линий тренда. Для описания использована линейная модель с достоверностью аппроксимации R^2 равной 0,998. С повышением обводненности изопропилового спирта коэффициенты распределения нафтенновых кислот уменьшаются, т.к. имеет место большая гидратация молекул изопропилового спирта, затрудняющая процесс экстракции. Добавление к *n*-декану вторичного бутилбензола также приводит к снижению значения коэффициентов распределения нафтенновых кислот. Это объясняется образованием молекулярных комплексов, затрудняющих переход молекул нафтенновых кислот в фазу водного раствора изопропилового спирта. Взаимодействие молекул нафтенновых кислот с надмолекулярной структурой водного раствора изопропилового спирта сопровождается выделением тепла, количество которого увеличивается с уменьшением содержания воды в изопропиловом спирте. До содержания воды 30 % об. ΔG_p имеет отрицательные значения. Оптимальное содержание воды в изопропиловом спирте равно 15 % об. Процесс экстрагирования нафтенновых кислот из *n*-декана водным раствором изопропилового спирта термодинамически вероятен до содержания воды 30 % об.

**M. Z. Zarifyanova, D. D. Avramovich, A. V. Sharifullin,
M. A. Bochkov, A. P. Andreev, E. R. Madzu Gantsu, R. F. Gimadetdinova**

THERMODYNAMICS OF THE EXTRACTION PROCESS OF REDISTRIBUTION OF PETROLEUM ACIDS BETWEEN AQUEOUS AND HYDROCARBON MEDIA

Keywords: liquid extraction, proton-donating extractants, naphthenic acids, thermodynamic characteristics, distribution coefficient.

The study is devoted to the determination of the enthalpy (ΔH_p), Gibbs energy (ΔG_p) and entropy (ΔS_p) of the distribution of naphthenic acids between aqueous solutions of isopropyl alcohol and *n*-decane, which can be used to justify the conditions of their extraction from oxidates of medium distillate petroleum fractions. The research was carried out on a model system consisting of naphthenic acid isolated from the diesel fraction of Baku oil and *n*-decane. The concentration of acids in the solution was $0.06 \div 0.52$ mol/l. Extraction was performed with aqueous solutions of isopropyl alcohol with a water content of $15 \div 50\%$ vol. at a temperature of 298-328 K. Linear approximation was performed in Excel using trend lines. A linear model with an approximation accuracy of R^2 equal to 0,998 was used for the description. With an increase in the water content of isopropyl alcohol, the distribution coefficients of naphthenic acids decrease, since there is a large hydration of isopropyl alcohol molecules, which complicates the extraction process. The addition of sec-butylbenzene to *n*-decane also leads to the distribution coefficients of naphthenic acids decrease. This is explained by the formation of molecular complexes that impede the transition of naphthenic acid molecules into the phase of an aqueous solution of isopropyl alcohol. The naphthenic acid molecules with the isopropyl alcohol aqueous solution supramolecular structure interaction is accompanied by the release of heat, which amount increases with a decrease in the water content in isopropyl alcohol. ΔG_p has negative values up to a water content of 30% vol. The optimal water content in isopropyl alcohol is 15% vol. The process of extracting naphthenic acids from *n*-decane with an aqueous solution of isopropyl alcohol is thermodynamically probable up to a water content of 30% vol.

Введение

Наиболее изученным классом кислородсодержащих соединений в составе нефти являются нефтяные кислоты. Термин «нефтяные кислоты» включает все алифатические, алициклические (нафтенные), ароматические кислоты в нефти. Кислоты, выделенные из среднестиллятных фракций, являются практически целиком нафтенными [1]. Долгое время термин «нефтяные кислоты» отождествлялся с термином «нафтенные кислоты».

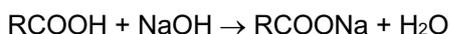
Нафтенные кислоты представляют собой структуры, содержащие одно- или более пяти- или шестичленных циклоалкановых колец, алифатическую цепь и карбоксильную группу, которая отделена от нафтенного кольца несколькими метиленовыми группами [2].

Нафтенные кислоты являются важным техническим сырьем и могут быть использованы в качестве экстрагентов цветных металлов, антидетонационных добавок к моторным топливам, ингибиторов коррозии, растворителей полимеров и каучуков, антисептических средств [3].

Богатейшим источником нефтяных кислот, в особенности нафтенового основания, являются нефти Азербайджана, содержание кислот в которых составляет 1,5-2,0 % [1]. Ведется поиск нефтей, богатых нефтяными кислотами, среди российских месторождений. В работе [4] показано, что фракция 240-350°C, представляющая промышленный интерес, составляет 59,23 % от суммы всех кислот нефти Анастасиевско-Троицкого месторождения (РФ, Краснодарский край) и 65,96 % от суммы всех кислот из нефти Нафталанского месторождения (Республика Азербайджан).

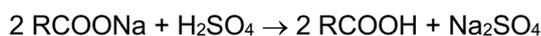
Ограниченность естественных запасов нефтей с высоким содержанием нафтеновых кислот требует изыскания новых способов их получения. Например, разработан метод жидкофазного окисления кислородом воздуха нафтеновых концентратов, выделенных из дизельных фракций тяжелых нефтей, в присутствии комплексов металлов переменной валентности Cr, Ni, Co, Mn [5]. Выход синтетических нафтеновых кислот составляет 30 %.

Промышленное производство нафтеновых кислот базируется на выделении их из нефтей щелочной экстракцией [6]. Сырьем являются узкие нефтяные фракции – керосиновые, газойлевые, дизельные. Фракции обрабатывают водным раствором гидроксида натрия, соли кислот переходят в щелочной слой:



Чем выше концентрация щелочи и молекулярная масса кислот, тем больше они удерживают углеводородные неомыляемые компоненты.

Получаемые растворы солей натрия в дальнейшем подкисляют серной кислотой для выделения свободных нафтеновых кислот:



Нафтеновые кислоты при отстаивании выделяются в виде верхнего масляного слоя. Чтобы избежать образования стойких эмульсий процесс проводят при повышенных температурах, однако, при этом увеличивается степень гидролиза образующихся солей. Из производственных сточных вод нафтеновые кислоты удаляют экстракцией керосином в присутствии Fe^{3+} [7].

Известен способ выделения нафтеновых кислот из среднестиллятных фракций посредством экстракции растворителем, содержащим метанол, воду и 2-3 % аммиака [8]. Применение водоспиртовых растворов позволяет сократить количество углеводородных неомыляемых компонентов в составе получаемых кислот в силу их меньшей растворимости.

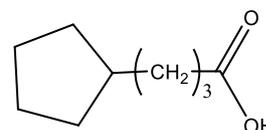
Наибольшей избирательностью при выделении нафтеновых кислот обладают протонодонорные экстрагенты, наиболее технологичным из которых является изопропиловый спирт (ИПС) [9, 10]. Функциональная группа -ОН в молекуле ИПС способна образовывать водородную связь с молекулами нафтеновых кислот, обеспечивая высокую избирательность.

При добавлении воды к ИПС экстракционные свойства и четкость разделения полярных гетероатомных соединений, входящих в состав нефтяных дистиллятов, и углеводородов повышается. Водные растворы ИПС обладают устойчивой во времени надмолекулярной структурой, размеры которой зависят от содержания воды [11]. Размеры ячеек и объемы внутренних полостей имеют меньшие значения, чем для абсолютизированного спирта и изменяются в зависимости от содержания в нем воды.

Цель работы – установление влияния воды на термодинамические характеристики распределения нафтеновых кислот между водными растворами ИПС и углеводородами нефтяной фракции, а также выявления механизма этого распределения.

Экспериментальная часть

Исследования проводили на модельной системе. В работе использовали реагенты класса х.ч.: н-декан (АО «ЭККОС-1»), 2-пропанол (АО «ЭККОС-1»), вторичный бутилбензол («Acros Organic»). В качестве распределяемого компонента использовали нафтеновую кислоту, выделенную из дизельной фракции бакинской нефти методом омыления, имеющую следующие физико-химические показатели [12]: пределы выкипания при 133,3 Па 110-120°C; $d_4^{20} - 0,9857$; $n_D^{20} - 1,4622$; кислотное число (КЧ) – 360 мг КОН/г; молекулярная масса – 156; брутто-формула $\text{C}_9\text{H}_{16}\text{O}_2$, структурная формула



Для построения калибровочного графика были приготовлены растворы с содержанием нафтеновых кислот в н-декане: 2 мас. % (0,06 моль/л); 4 мас. % (0,20 моль/л); 6 мас. % (0,30 моль/л); 8 мас. % (0,41 моль/л); 10 мас. % (0,52 моль/л). По стандартной методике способом прямого титрования были определены КЧ растворов равные 16,80; 25,15; 30,02; 36,25; 41,13 мг КОН/г соответственно [13].

Линейная аппроксимация была выполнена в пакете Excel с использованием линий тренда. Для описания была использована линейная модель с достоверностью аппроксимации R^2 равной 0,998, стандартные отклонения S_0 не превышали 0,01.

Калибровочные графики определения содержания нафтеновых кислот в углеводородной фазе описываются уравнениями:

$$C_y = -3,90 + 0,331 \text{ КЧ, мас. \%} \quad (1)$$

$$C_y = -0,26 + 0,019 \text{ КЧ, моль/л} \quad (2)$$

Исследовались водные растворы ИПС с содержанием воды 15÷50 % об. При обводненности ИПС менее 15 % об. происходит бесконечное растворение компонентов друг в друге.

Для определения коэффициентов распределения нафтеновых кислот (K_0) между водными растворами ИПС и н-деканом осуществляли экстракцию при

температуре 298-328 К. Контактное равновесие (по 25 см³) количеств исходного раствора нафтеновой кислоты в н-декане и водного раствора ИПС проводили в течение 30 мин в термостатированных воронках, температура в которых поддерживалась циркуляционным термостатом с точностью ± 0,1°С. После расслаивания (до прозрачности) сосуществующие фазы разделяли и измеряли их объемы и массы.

В верхней углеводородной фазе определяли КЧ, по которому с использованием калибровочного графика, описанного уравнением (2), рассчитывали содержание нафтеновых кислот в равновесной углеводородной фазе (C_У). Содержание нафтеновых кислот в фазе водного раствора ИПС (C_Р) определяли по разнице между содержанием его в исходном углеводородном растворе и углеводородной фазе. Коэффициенты распределения нафтеновых кислот рассчитывали по формуле:

$$K_0 = C_P / C_U, \quad (3)$$

Обсуждение результатов

На рис. 1 приведены зависимости концентраций нафтеновых кислот в фазе водного раствора ИПС от концентраций их в равновесной углеводородной фазе, которые носят линейный характер. Это говорит о том, что в обеих фазах нафтеновые кислоты находятся в неассоциированном мономерном состоянии, и коэффициенты распределения K₀ соответствуют тангенсам углов наклона этих зависимостей.

Достоверность аппроксимации изотерм распределения R² не менее 0,992, стандартные отклонения S₀ не превышали 0,01.

Численные значения коэффициентов распределения K₀ нафтеновых кислот между водными растворами ИПС и н-деканом при различных температурах представлены в табл. 1.

Из характера расположения изотерм распределения и данных табл. 1 видно, что K₀ сильно снижаются с повышением обводненности ИПС. При высоком содержании воды имеет место большая гидратация молекул ИПС, которая затрудняет их контакт с молекулами нафтеновых кислот.

Добавление к н-декану ароматического углеводорода – вторичного бутилбензола приводит к снижению значения констант распределения нафтеновых кислот. Например, при 30 %-ной обводненности ИПС и температуре 298 К константа распределения нафтеновых кислот в н-декане K₀ = 1,26, а с добавлением 0,82 моль/л вторичного бутилбензола K₀ = 0,93. Это объясняется образованием молекулярных комплексов нафтеновых кислот с ароматическим углеводородом в углеводородной фазе, что затрудняет переход молекул нафтеновых кислот в фазу водного раствора ИПС.

Энтальпия распределения (ΔH_р) характеризует интенсивность межмолекулярного взаимодействия и может быть определена по уравнению изобары Вант-Гоффа [14]:

$$\frac{d \lg K_0}{dT} = \frac{\Delta H_P}{RT^2} \quad (4)$$

Энтальпию распределения нафтеновых кислот вычисляли по температурной зависимости lg K₀ от обратной температуры, которую аппроксимировали по методу наименьших квадратов уравнением вида [15]:

$$\lg K_0 = g + m \frac{1000}{T}, \quad (5)$$

где g и m – коэффициент регрессии, T – температура, К.

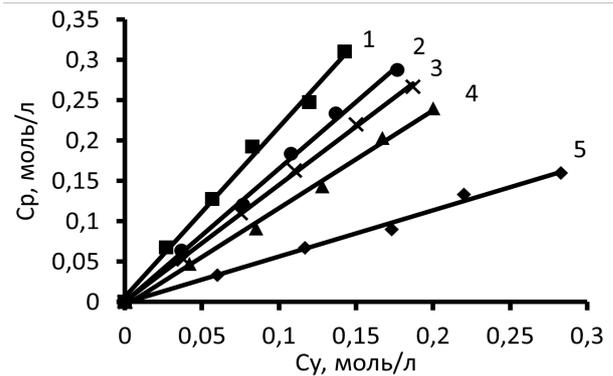


Рис. 1 – Изотермы распределения нафтеновых кислот между водными растворами изопропилового спирта и н-деканом, T = 298 К. Содержание воды в ИПС, % об.: 1 – 15; 2 – 20; 3 – 25; 4 – 30; 5 – 40

Fig. 1 – Isotherms of naphthenic acid distribution between aqueous solutions of isopropyl alcohol (IPS) and n-decane, T = 298 K.

Water content in IPS, % vol.: 1 – 15; 2 – 20; 3 – 25; 4 – 30; 5 – 40

Таблица 1 – Коэффициенты распределения нафтеновых кислот между водными растворами изопропилового спирта и н-деканом

Table 1 – Distribution coefficients of naphthenic acids between aqueous solutions of isopropyl alcohol and n-decane

Содержание воды в ИПС, % об.	Температура, К			
	298	308	318	328
15	2,04	1,66	1,64	1,40
20	1,59	1,43	1,38	1,35
25	1,49	1,31	1,29	1,18
30	1,26	1,23	1,19	1,15
40	0,60	0,57	0,56	0,54
50	0,32	0,26	0,25	0,23

Энтальпии распределения соответствует тангенс угла наклона этих зависимостей. Свободную энергию распределения (ΔG_р) нафтеновых кислот рассчитывали из уравнения изотермы Вант-Гоффа [16]:

$$\Delta G_P = -RT \ln K_0, \quad (6)$$

где R – универсальная газовая постоянная

Свободная энергия распределения ΔG_p является величиной, включающей энергетическую и структурную составляющие процесса распределения.

Из уравнения Гиббса-Гельмгольца произведен расчет энтропии распределения (ΔS_p) нафтеновых кислот:

$$\Delta S_p = \frac{\Delta H_p - \Delta G_p}{T} \quad (7)$$

Таблица 2 – Термодинамические характеристики распределения нафтеновых кислот между водными растворами изопропилового спирта и n-деканом и корреляционные параметры уравнения (5), T = 298 K

Table 2 – Thermodynamic characteristics of the distribution of naphthenic acids between aqueous solutions of isopropyl alcohol and n-decane and correlation parameters of equation (5), T = 298 K

Содержание воды в ИПС, % об.	-g	m	R ²	S ₀	- ΔH _p , кДж/моль	ΔG _p , кДж/моль	- ΔS _p , кДж/моль
15	1,314	0,480	0,956	0,019	9,20	-1,76	24,96
20	0,564	0,226	0,941	0,011	4,32	-1,15	10,62
30	0,353	0,136	0,995	0,002	2,60	-0,58	6,80
40	0,665	0,130	0,990	0,003	2,50	1,29	12,72

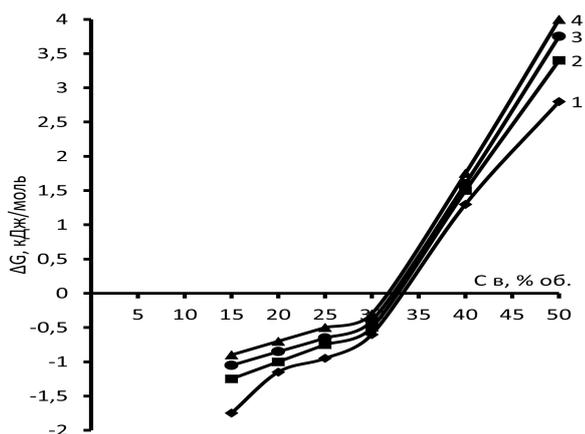


Рис. 2 – Зависимость свободной энергии распределения нафтеновых кислот от содержания воды в изопропиловом спирте. Температура, К: 1 – 298; 2 – 308; 3 – 318; 4 – 328

Fig. 2 – Dependence of the free energy distribution of naphthenic acids on the water content in isopropyl alcohol. Temperature, K: 1 – 298; 2 – 308; 3 – 318; 4 – 328

Отрицательное значение ΔG_p означает самопроизвольное протекание процесса распределения нафтеновых кислот из органической фазы в фазу водного раствора ИПС, положительное значение – самопроизвольное протекание процесса в противоположном направлении [14].

Зависимости ΔG_p нафтеновых кислот от содержания воды в ИПС (рис.2) показывают, что до содержания воды 30 % об. ΔG_p имеет отрицательные значения, что подтверждает термодинамическую вероятность экстрагирования нафтеновых кислот водными растворами ИПС.

Значения термодинамических характеристик распределения нафтеновых кислот приведены в табл. 2. Анализируя данные табл. 2 можно утверждать, что распределение нафтеновых кислот сопровождается выделением небольшого количества тепла. Чем меньше содержание воды в ИПС, тем большее количество тепла выделяется за счет взаимодействия молекул нафтеновой кислоты с надмолекулярной структурой водного раствора ИПС.

На рис. 2 приведены зависимости ΔG_p нафтеновых кислот от содержания воды в ИПС.

При более высокой обводненности ΔG_p являются положительными величинами, при контактировании фаз в этих условиях нафтеновые кислоты перераспределяются из фазы растворителя в углеводородную фазу.

Минимальное значение ΔG_p имеет при объемном содержании воды, равном 15 %, что является наиболее оптимальным составом смешанного растворителя.

Термодинамическая возможность реализации процесса возрастает с понижением температуры, так как при этом (табл. 1) возрастает коэффициент распределения.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что с повышением обводненности ИПС значения коэффициентов распределения K_0 нафтеновых кислот снижаются. Увеличение содержания воды в смешанном растворителе приводит к увеличению гидратных оболочек ИПС и нафтеновых кислот, препятствующих их контакту друг с другом.

2. Присутствие ароматических углеводородов приводит к образованию молекулярных комплексов с нафтеновыми кислотами в углеводородной фазе, что затрудняет переход молекул нафтеновых кислот в фазу водного раствора ИПС.

3. До содержания воды 30 % об. ΔG_p имеет отрицательные значения, что говорит о термодинамической вероятности экстрагирования нафтеновых кислот водными растворами ИПС. Наиболее оптимальное содержание воды в ИПС составляет 15 % об.

Литература

1. Н.С. Наметкин, Г.М. Егорова, В.Х. Хамаев, *Нафthenic кислоты и продукты их химической переработки*. Химия, Москва, 1982, 184 с.
2. В.Д. Рябов, *Химия нефти и газа*, ИД «Форум», Москва, 2019, 335 с.
3. М.Ю. Исмоилов, М.Ё. Имомова, *Universum: химия и биология : электрон. научн. журн.*, **101**, 11, (2022). URL: <https://universum.com/ru/nature/archive/item/14451>. DOI: 10.32743/UniChem.2022.101.11.14451.
4. О.А. Стоколос, Л.В. Иванова, А.С. Сорокина, В.Н. Кошелев, *Нефтехимия*, **60**, 1, 26–33 (2020). DOI: 10.31857/S002824212001013X.
5. В.М. Аббасов, Л.И. Алиева, Л.М. Эфендиева, Л.Г. Нуриева, М.М. Аббасов, *Катализ в промышленности*, **6**, 28–32 (2014).
6. Л.В. Иванова, В.Н. Кошелев, Н.А. Сокова, Е.А. Буров, О.В. Примерова, *Труды РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина*, **270**, 1, 68–80 (2013).
7. Ф.И. Шекилиев, Г.И. Келбалиев, Г.З. Сулейманов, *Бюллетень науки и практики*, **6**, 3, 32–38 (2020). DOI: 10.33619/2414-2948/52/0310.33619/2414-2948/52/03.
8. Y. Sotoudeh, M.H. Niksokhan, A.R. Karbassi, M.R. Sarafrazi, *Pollution*, **9**, 1, 254–270 (2023). DOI: 10.22059/poll.2022.344876.1532.
9. В.Г. Козин, Л.Э. Комлева, И.Н. Дияров, *Нефтехимия*, **29**, 1, 19–23 (1989).
10. М.З. Зарифьянова, С.Д. Вафина, С.Н. Тунцева, Р.Р. Валиуллина, *Вестник технологического университета*, **15**, 17, 218–219 (2012).
11. В.Г. Козин, Р.Г. Салахутдинов, М.З. Зарифьянова, М.Ш. Ягфаров, *Известия вузов. Химия и химическая технология*, **33**, 2, 38–40 (1990).
12. М.З. Зарифьянова, М.А. Бочков, Д.Д. Аврамович, А.П. Андреев, Е.Р. Мадзу Гантсу, Х.Э. Харлампиди, *Вестник технологического университета*, **26**, 9, 59–65 (2023). DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_9_59.
13. Б.М. Рыбак, *Анализ нефти и нефтепродуктов*, ГосТехИздат, Москва, 1962, С. 449–452.
14. Р.Е. Трейбал, *Жидкостная экстракция*, Химия, Москва, 1966. 724 с.
15. И.М. Коренман, *Экстракция в анализе органических веществ*, Химия, Москва, 1977. 199 с.
16. М.Х. Карапетьянц, *Введение в теорию химических процессов*, Высш. школа, Москва, 1970. 287 с.

References

1. N.S. Nametkin, G.M. Egorova, V.H. Khamaev, *Naphthenic acids and products of their chemical processing*. Chemistry, Moscow, 1982, 184 p.
2. V.D. Ryabov, *Chemistry of Oil and Gas*, Forum Publishing House, Moscow, 2019. 335 p.
3. M. Ismoilov, M. Imomova, *Universum: Chemistry and Biology : electron. scientific Journal.*, **101**, 11, (2022). URL: <https://universum.com/ru/nature/archive/item/14451>. DOI: 10.32743/UniChem.2022.101.11.14451.
4. O.A. Stokolos, L.V. Ivanova, A.S. Sorokin, V.N. Koshelev, *Petrol. Chem.*, **60**, 1, 22–29 (2020). DOI: 10.1134/S0965544120010132.
5. V.M. Abbasov, L.I. Aliyeva, L.M. Efendieva, L.G. Nurieva, M.M. Abbasov, *Catalysis in industry*, **6**, 28–32 (2014).
6. L.V. Ivanova, V.N. Koshelev, N.A. Sokova, E.A. Burov, O.V. Primerova, *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, **270**, 1, 68–80 (2013).
7. F.I. Shekiliyev, G.I. Kalbaliyev, G.Z. Suleimanov, *Bulletin of Science and Practice*, **6**, 3, 32–38 (2020). DOI: 10.33619/2414-2948/52/03.
8. Y. Sotoudeh, M.H. Niksokhan, A.R. Karbassi, M.R. Sarafrazi, *Pollution*, **9**, 1, 254–270 (2023). DOI: 10.22059/poll.2022.344876.1532.
9. V.G. Kozin, L.E. Komleva, I.N. Diyarov, *Petrol. Chem.*, **29**, 1, 19–23 (1989).
10. M.Z. Zarifyanova, S.D. Vafina, S.N. Tuntseva, R.R. Valiullina, *Herald of Technological University*, **15**, 17, 218–219 (2012).
11. V.G. Kozin, R.G. Salakhutdinov, M.Z. Zarifyanova, M.Sh. Yagfarov, *Izvestiya VUZov. Chemistry and chemical technology*, **33**, 2, 38–40 (1990).
12. M.Z. Zarifyanova, M.A. Bochkov, D.D. Avramovich, A.P. Andreev, E.R. Maju Gantsu, Kh.E. Kharlampidi, *Herald of Technological University*, **26**, 9, 59–65 (2023). DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_9_59.
13. B.M. Rybak, *Analysis of oil and petroleum products*, Gostekhizdat, Moscow, 1962, pp. 449–452.
14. R.E. Treybal, *Liquid extraction*, Chemistry, Moscow, 1966, 724 p.
15. I.M. Korenman, *Extraction in the analysis of organic substances*, Chemistry, Moscow, 1977, 199 p.
16. M.H. Karapetyants, *Introduction to the theory of chemical processes*, Higher School, Moscow, 1970, 287 p.

© **М. З. Зарифьянова** – д-р техн. наук, профессор кафедры Общей химической технологии (ОХТ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, zmuslimaz@mail.ru; **Д.Д. Аврамович** – аспирант кафедры ОХТ КНИТУ, avramovichd@gmail.com; **А. В. Шарифуллин** – д-р техн. наук, профессор кафедры Химической технологии переработки нефти и газа КНИТУ, sharifullin67@mail.ru; **М. А. Бочков** – ассистент кафедры ОХТ КНИТУ, ma.b-87@mail.ru; **А. П. Андреев** – бакалавр кафедры ОХТ КНИТУ, andreevaleksandr617@gmail.com; **Е. Р. Мадзу Гантсу** – магистр кафедры ОХТ КНИТУ, madzougantsouephremroy@gmail.com; **Р. Ф. Гимадетдинова** – магистр кафедры ОХТ КНИТУ, gimadetdinova03@mail.ru

© **M. Z. Zarifyanova** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Department of General Chemical Technology (GCT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, zmuslimaz@mail.ru; **D. D. Avramovich** – PhD-student of the GCT department, KNRTU, avramovichd@gmail.com; **A. V. Sharifullin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Department of Chemical Technology of Oil and Gas Refining, KNRTU, sharifullin67@mail.ru; **M.A. Bochkov** – Assistant of the GCT department, KNRTU, ma.b-87@mail.ru; **A. P. Andreev** – Bachelor of the GCT department, KNRTU, andreevaleksandr617@gmail.com; **E. R. Madzu Gantsu** – Master-student of the GCT department, KNRTU, madzougantsouephremroy@gmail.com; **R. F. Gimadetdinova** – Master-student of the GCT department, KNRTU, gimadetdinova03@mail.ru.