

УДК 665.66

DOI: 10.15372/KhUR2024541

EDN: ANEBRL

Экстракция серосодержащих и полициклических ароматических соединений дизельного топлива имидазолсодержащими ионными жидкостями

Н. С. КОБОТАЕВА, Ю. В. САВИНЫХ, Т. С. СКОРОХОВА

*Институт химии нефти СО РАН,
Томск, Россия**E-mail: nat@ipc.tsc.ru*

(Поступила 15.12.2023; принята к печати 22.12.2023)

Аннотация

Проведено исследование процесса экстракции серосодержащих соединений дизельного топлива (ДТ) ионными жидкостями (ИЖ) на основе имидазола с различными заместителями (бутил, октил, нонил, додецил, цетил) в положении 1 имидазольного кольца и определен состав серосодержащих соединений и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) методом хромато-масс-спектрометрии в исходном и очищенном ДТ. Определены оптимальные условия процесса экстракции: температура 30–35 °С, время экстракции 60 мин, соотношение ДТ/ИЖ = 1.66–2. Наиболее эффективным в качестве экстрагента серосодержащих соединений ДТ является 1-нонил-3-метилимидазолия бромид, позволяющий снизить общее содержание серы с 0.369 до 0.143 мас. %. Результаты исследования группового и индивидуального состава производных дибензотиофена (ДБТ) и ПАУ показали, что степень извлечения производных ДБТ и трициклических ароматических углеводородов составляет 66–72 %. В меньшей степени происходит извлечение нафталина и его гомологов – 37 %. Среди гомологов ДБТ наиболее полно извлекается диметилдибензотиофен.

Ключевые слова: ионные жидкости на основе имидазола, серосодержащие соединения, полициклические ароматические углеводороды, очистка дизельного топлива

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы по мере истощения крупнейших месторождений легкого и малосернистого углеводородного сырья в общей добыче нефти в Российской Федерации значительно возросла доля добываемых и перерабатываемых тяжелых высокосернистых нефтей и газовых конденсатов. Вследствие этого бензиновые и дизельные фракции из такого сырья характеризуются высоким содержанием общей серы и полициклических ароматических углеводородов, что приводит к экологическим проблемам при их использовании в качестве топлив [1, 2].

Наибольшее распространение для удаления серосодержащих соединений (СС) из нефти и продуктов ее переработки получил метод гид-

роочистки на твердофазных катализаторах [3]. Однако метод имеет и свои недостатки. Добиться удаления таких СС, как дибензотиофен (ДБТ) и его алкилзамещенные производные, удается не полностью даже при очень жестких условиях проведения процесса. По этой причине разрабатываются и другие альтернативные методы очистки топливных фракций нефти от СС без потребления водорода – экстракционное, адсорбционное или окислительное обессеривание. Преимуществом процессов экстракции является возможность их осуществления при атмосферном давлении и невысоких температурах, отсутствие необходимости использования катализатора, адсорбентов и водорода, что позволяет избежать образования углеродистых отложений и изменения углеводородного состава ис-

ходного сырья. В последние годы для процесса обессеривания различных видов моторных топлив был предложен метод экстракции СС ионными жидкостями (ИЖ) [4].

Установлено, что ИЖ, содержащие в своем составе объемные органические катионы, а также неорганические и органические анионы, проявляют специфические химические свойства. Асимметрия в строении и стехиометрическая изолированность зарядов способствуют формированию жидкой фазы ионного состава, а такое состояние – существованию ИЖ с низкими температурами плавления и давлением насыщенных паров, электрохимической устойчивостью и высокой электропроводимостью [5]. Интерес к ИЖ обусловлен в основном их экологическими характеристиками – не горючи, термически устойчивы, обладают низкой токсичностью, могут использоваться повторно [6]. Их принято называть “зелеными растворителями”.

Распространены ИЖ на основе катионов имидазолия, пиридиния, пирролидиния, тетраалкиламмония, которые активно используются в нефтехимии в качестве экстракционных систем для удаления СС из различных видов моторных топлив [7, 8].

Наиболее полно в качестве экстракционных систем СС модельной дизельной фракции исследованы имидазолсодержащие ИЖ с различными катионами и анионами. В работе [9] впервые описано использование кислот Льюиса и Бренстеда в качестве ИЖ и показано, что на процесс удаления СС практически не влияет химическая природа аниона и только размер катиона весьма важен для процесса экстракции. Это связано, как предполагают авторы, с зависимостью растворимости ДБТ в ИЖ от стерических факторов. В работах [10, 11] проведено сравнение экстракционной эффективности ряда ИЖ на основе алкилимидазола для удаления СС из модельного транспортного топлива. По мнению авторов, высокая степень экстракции тиофена и метилтиофена ИЖ объясняется более высокой плотностью ароматических π -электронов в кольцах C_5 в результате π - π -взаимодействия тиофена и алкилимидазола.

Аналогичный вывод сделан и в работе [12], где проведено исследование природы взаимодействий между функционализированными полиэтиленгликолем ионными жидкостями на основе имидазола (бензимидазола) и ДБТ. Методом протонного магнитного резонанса (ПМР-спектроскопия) показано, что более сильные π - π -взаимодействия между плоской ароматической электронной

системой бензимидазолиевых ИЖ по сравнению с имидазолиевыми ИЖ и ДБТ играют основную роль в высокой эффективности экстракционной десульфуризации.

Выводы о наличии жидких клатратов, формирующихся посредством π - π -взаимодействий между молекулами с высокополяризуемой π -электронной плотностью (тиофен, бензол, ксилол, толуол) и молекулами ИЖ на основе имидазола сделаны в [13, 14]. Там же отмечается, что длина цепи или размер алкильной группы катиона имидазолия, а также свойство и размер аниона определяют способность ИЖ поглощать тиофен. Подобный механизм взаимодействия с участием π - π -связей в процессе экстракционной десульфуризации с применением ряда дикатионных ИЖ на основе имидазола и пиридина предполагается и в работе [15] на основе данных ПМР-спектроскопии.

Влияние длины алкильных заместителей показано на примере пиридинсодержащих ИЖ [16]. Отмечено, что электронодонорная способность алкильного замещения придает катионам N-алкилпиридиния высокую поляризуемую ароматическую π -плотность по сравнению с пиридином, а селективность удаления серы возрастает в ряду: тиофен (Т) < бензотиофен (БТ) < ДБТ.

В работе [17] на основе рассчитанной плотности электронов на атоме серы (5.696 для Т, 5.739 для БТ и 5.758 для ДБТ) было высказано предположение, что экстракция более предпочтительна для тех ароматических гетероциклических соединений серы, которые имеют более высокую плотность ароматических π -электронов.

Существуют и другие точки зрения на механизм взаимодействия СС с ИЖ, показывающие, что не только π - π -взаимодействие может быть преобладающим. Исследование ряда ИЖ на основе имидазола и четвертичного аммония, не имеющего в структуре молекулы ароматических π -электронов, показало их сравнимую экстракционную эффективность относительно СС модельного дизельного топлива (ДТ) [18]. На основании этого исследования был сделан вывод о взаимодействии по принципу “подобное растворяется в подобном” или по механизму “включение ДБТ в объем ИЖ в результате высокого молярного объема ИЖ”. Вывод о подобном механизме взаимодействия между СС и ИЖ сделан и в [19].

Цель данной работы – исследование процесса экстракционной десульфуризации ДТ с использованием ИЖ на основе 1-алкил-3-метилимидазола с различной длиной алкильных

заместителей в молекуле, нахождение оптимальных условий процесса экстракции (концентрация ИЖ, температура и время экстракции), определение состава СС и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) методом хромато-масс-спектрометрии в исходном и очищенном ДТ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали прямогонную дизельную фракцию Омского нефтеперерабатывающего завода с пределами выкипания 200–360 °С (ГОСТ 2177-99) с содержанием общей серы 0.367 мас. %.

Синтез 1-бутил (октил, нонил, додецил, цетил)-3-метилимидазолия бромида

1-Бутил (октил)-производные метилимидазолия бромида (1B3MImBr, 1O3MImBr соответственно) синтезировали по методике [20], применяемой для синтеза 1-алкил-3-метилимидазола с малой длиной алкильной цепи.

Синтез 1-нонил (додецил, цетил)-3-метилимидазолия бромида (1N3MImBr, 1D3MImBr, 1C3MImBr соответственно) осуществляли по следующей методике. В трехгорлую колбу на 250 мл, снабженную мешалкой, холодильником и капельной воронкой, помещали 0.3 моль 3-метилимидазола и нагревали до температуры 50 °С, к нему по каплям добавляли 0.33 моль бромистого алкила при интенсивном перемешивании. В процессе добавления бромистого алкила температура поднялась до 70 °С, смесь стала коричневого цвета. При этой температуре перемешивали 4 ч. Затем осадок промывали трижды бензолом (порциями по 25 см³) для удаления остатка бромистого алкила. Выход 1N3MImBr – 85 %, 1D3MImBr – 86 %, 1C3MImBr – 91 %.

Методика экстракции серосодержащих соединений из дизельного топлива

В плоскодонную коническую колбу на 100 см³ с холодильником Либиха помещали 10 см³ ДТ, нагревали до температуры 25 (или 30, 35, 40, 45) °С и добавляли 2 (или 4, 6, 8, 10) мл ИЖ в течение 10 (или 20–70) мин. Процесс осуществляли при непрерывном перемешивании со скоростью 30 об/мин с помощью магнитной мешалки RET basic C (ИКА, Германия).

Методы исследования

Структуру полученных 1-алкил-3-метилимидазолов идентифицировали методом элементного анализа с помощью CNHOS-анализатора Vario EL cube (Германия) и ИК-спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 5700 (Thermo Electron Corporation, USA) в матрице KBr в области частот 400–4000 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹. Основные полосы в ИК-спектре от ИЖ: 3217–3064 см⁻¹ – полосы колебания ароматической системы; 3021–2801 см⁻¹ – полосы колебания алифатических групп; 1022, 754 см⁻¹ – 1,3-замещение в имидазольном кольце.

Масс-спектрометрический анализ содержания СС и ПАУ в ДТ до и после экстракции проводили на приборе Hewlett Packard 6890/5973 (Agilent Technologies, США) на колонке Agilent длиной 30 м, диаметром 0.25 мм, с толщиной фазы DB 5MS 0.25 мкм. Газ-носитель – гелий, при постоянном расходе 0.8 мл/мин. Программа термостата: начальная температура 80 °С, выдержка в течение 3 мин, подъем до конечной температуры 300 °С со скоростью 4 °С/мин и выдержка при этой температуре 30 мин. Реконструкцию молекулярно-массового распределения проводили с использованием характеристических ионов гомологов: дибензотиофена (ДБТ, m/z = 184, 198, 212, 226), фенантрена (Ф, m/z = 178, 192, 206, 220), нафталина (Н, m/z = 128, 142, 156, 170), флуорена (Фл, m/z = 178, 192, 206, 220), циклических сульфидов (m/z = 68 + 69).

Определение общего содержания серы в образцах проводили с помощью рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализатора серы в нефтях и нефтепродуктах “Спектроскан S” (НПО “Спектрон”, Россия) в соответствии с ГОСТ Р 51947-2002. Диапазон измерений массовой доли серы – 0.002–5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения оптимальных параметров процесса экстракции СС из ДТ ионными жидкостями на основе имидазола с различной длиной алкильного заместителя (бутил, октил, нонил, додецил, цетил) в положении 1 имидазольного кольца найдены зависимости влияния соотношения ДТ/ИЖ, температуры, времени экстракции и структуры молекулы алкилимидазола на остаточное содержание серы в ДТ.

В табл. 1, 2 представлены зависимости остаточного содержания серы в ДТ после экстракции ИЖ от параметров процесса.

Согласно полученным результатам (см. табл. 1), оптимальным является соотношение ДТ/ИЖ = 1.5–2.0. При соотношении более 2 степень удаления СС из ДТ снижается, поэтому для дальнейших экспериментов было выбрано соотношение ДТ/ИЖ = 2.

Исследование влияния продолжительности процесса экстракции на полноту очистки ДТ (см. табл. 2) показало, что наибольшее количество серы извлекается из ДТ в течение 30–50 мин. Дальнейшее увеличение времени экстракции не приводит к улучшению результатов, поэтому для последующих экспериментов было выбрано время 60 мин.

При повышении температуры экстракции от 25 до 35 °С фактически не происходит изменения остаточного содержания серы в ДТ. Однако при дальнейшем увеличении температуры до 40–50 °С происходит незначительное повышение остаточного содержания серы, что может быть связано с высокой гигроскопичностью ИЖ на воздухе. Исходя из этого, экстракцию СС ионными жидкостями целесообразно проводить при температуре 30 °С.

На рис. 1 представлена зависимость остаточного содержания серы в ДТ после экстракции от химической структуры ионной жидкости. Видно, что экстракция СС из ДТ ионными жидкостями (однократная экстракция) снижает содержание общей серы с 0.369 до 0.146 мас. %.

ТАБЛИЦА 1

Зависимость остаточного содержания серы в дизельном топливе (ДТ) после экстракции от вида ионной жидкости (ИЖ) и соотношения ДТ/ИЖ

ИЖ	Остаточное содержание серы в ДТ, мас. %					
	Соотношение ДТ/ИЖ					
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
1B3MImBr	0.28	0.283	0.285	0.29	0.33	0.34
1O3MImBr	0.24	0.242	0.243	0.27	0.28	0.29
1N3MImBr	0.16	0.165	0.17	0.22	0.24	0.26
1D3MImBr	0.22	0.22	0.225	0.25	0.27	0.27
1C3MImBr	0.23	0.23	0.232	0.24	0.25	0.27

Примечания. 1. Условия процесса: температура – 35 °С; время экстракции – 60 мин. 2. Здесь и в табл. 2: 1B3MImBr, 1O3MImBr, 1N3MImBr, 1D3MImBr, 1C3MImBr – 1-бутил (октил, нонил, додецил, цетил)-3-метилимидазолия бромид соответственно.

Наблюдается определенная зависимость остаточного содержания серы от длины алкильного радикала в положении 1 имидазольного кольца ИЖ. Монотонное уменьшение остаточного содержания серы в ДТ наблюдается при экстракции ИЖ в ряду 1B3MImBr > 1O3MImBr > 1N3MImBr. Дальнейшее увеличение длины алкильного заместителя приводит к ухудшению результатов процесса очистки ДТ – увеличению остаточного содержания серы.

Исследование имидазолсодержащих ИЖ с помощью полуэмпирических и эмпирических

ТАБЛИЦА 2

Зависимость остаточного содержания серы в дизельном топливе (ДТ) после экстракции ионной жидкостью (ИЖ) от времени экстракции и температуры

Условия процесса	Остаточное содержание серы в ДТ, мас. %				
	Ионная жидкость				
	1B3MImBr	1O3MImBr	1N3MImBr	1D3MImBr	1C3MImBr
Время экстракции, мин:					
10	0.35	0.33	0.27	0.33	0.34
20	0.31	0.28	0.24	0.28	0.29
30	0.30	0.26	0.20	0.27	0.28
40	0.29	0.24	0.16	0.23	0.26
50	0.28	0.22	0.16	0.23	0.24
60	0.28	0.23	0.17	0.25	0.25
Температура экстракции, °С:					
20	0.28	0.20	0.15	0.24	0.24
25	0.28	0.20	0.15	0.23	0.24
30	0.27	0.20	0.15	0.23	0.24
35	0.28	0.21	0.15	0.23	0.24
40	0.33	0.23	0.17	0.25	0.27

Примечания. 1. Обозначения см. табл. 1. 2. Соотношение ДТ/ИЖ = 2.

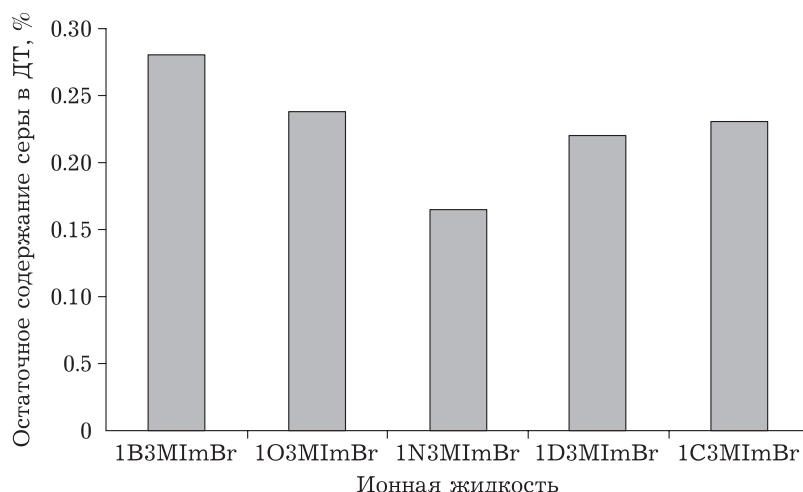


Рис. 1. Зависимость остаточного содержания серы в дизельном топливе (ДТ) после экстракции ионной жидкостью от вида последней. 1B3MImBr, 1O3MImBr, 1N3MImBr, 1D3MImBr, 1C3MImBr – 1-бутил (октил, нонил, додецил, цетил)-3-метилимидазолия бромид соответственно.

расчетов [21, 22] показало, что ИЖ на основе имидазола являются структурированными наносегрегированными жидкостями, в которых отмечены электростатические взаимодействия между полярными имидазольными кольцами и анионами (анион...атом водорода имидазольного кольца), а также Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия между неполярными алкильными цепями ИЖ, что приводит к формированию наномасштабных доменов, разнесенных в пространстве. В итоге формируется полярный каркас, пронизанный неполярными участками. Рост боковых алкильных цепей приводит к изменению морфологии неполярных доменов с изолированных островков на непрерывный нанодомен. Исходя из этого, более длинные алкильные

заместители способствуют переходу от дисперсной к непрерывной неполярной фазе.

Можно предположить, что в нашем случае электронодонорная способность алкильного заместителя придает катионам алкилимидазолия по сравнению с имидазолом высокую поляризуемую ароматическую π -плотность, которая уменьшается в ряду ИЖ: 1B3MImBr > 1O3MImBr > 1N3MImBr. Дальнейшее же увеличение длины алкильного радикала в молекуле ИЖ, вероятно, создает пространственные затруднения для взаимодействия ИЖ с СС дизельного топлива.

Исследование группового и индивидуального состава серосодержащих соединений – ДБТ и ПАУ (гомологи фенантрена, нафталина, флуорена) – в исходном и очищенном ДТ показало

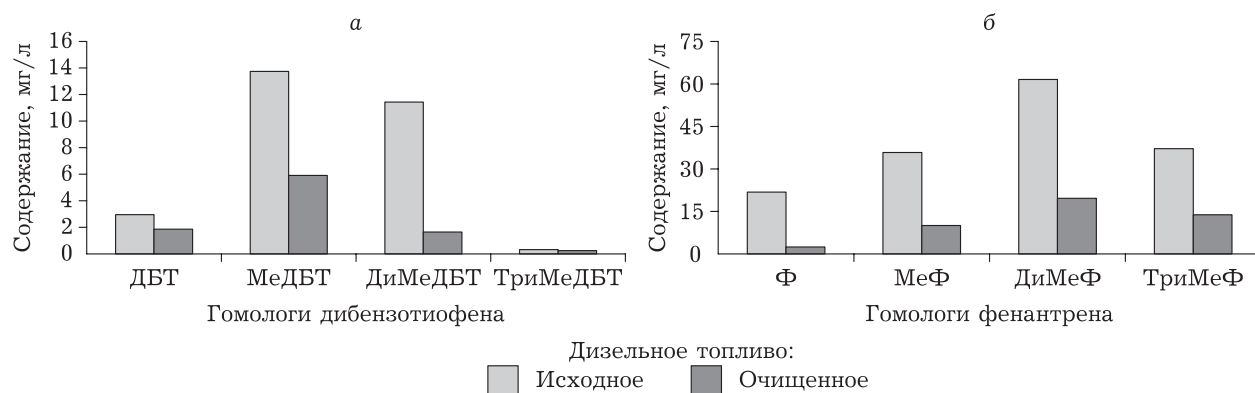


Рис. 2. Гистограмма распределения гомологов дибензотиофена (а) и фенантрена (б) в исходном и очищенном дизельном топливе. Экстрагент – 1-нонил-3-метилимидазолия бромид (1N3MImBr). ДБТ – дибензотиофен; МеДБТ, ДиМеДБТ, ТриМеДБТ – метил-, диметил-, триметилдибензотиофены соответственно; Ф – фенантрен; МеФ, ДиМеФ, ТриМеФ – метил-, диметил-, триметилфенантрены соответственно.

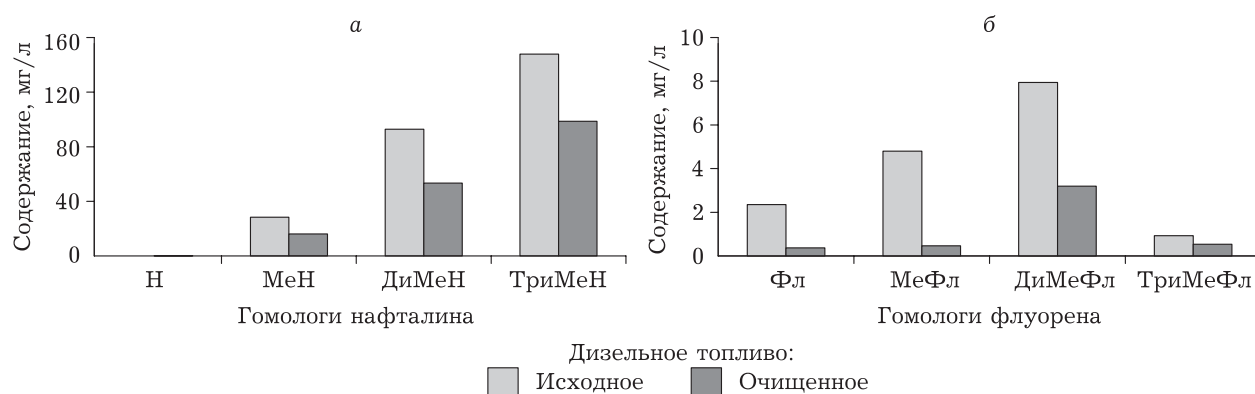


Рис. 3. Гистограмма распределения гомологов нафталина (а) и флуорена (б) в исходном и очищенном дизельном топливе. Экстрагент – 1-нонил-3-метилимидазолия бромид (1N3MImBr). Н – нафталин; MeH, DiMeH, TriMeH – метил-, диметил-, триметилнафталины соответственно; Фл – флуорен; MeФл, DiMeФл, TriMeФл – метил-, диметил-, триметилфлуорены соответственно.

(рис. 2, 3), что трициклические ароматические углеводороды и ДБТ извлекаются на 66–72 %. Извлечение нафталина и его гомологов происходит в меньшей степени (37 %).

Гистограмма распределения гомологов ДБТ в исходном ДТ и после однократной экстракции СС ионной жидкостью 1N3MImBr (см. рис. 2, а) показывает, что степень извлечения гомологов ДБТ из ДТ уменьшается в ряду: ДиМеДБТ (86 %) > МеДБТ (57 %) > ДБТ (37%) > ТриМеДБТ (23 %), где МеДБТ, ДиМеДБТ, ТриМеДБТ – метил-, диметил- и триметилдибензотиофен соответственно. Таким образом, наиболее полно извлекаются ДиМеДБТ. Увеличение степени экстракции ДиМеДБТ может быть связано с повышением электронной плотности на атоме серы за счет электронодонорных свойств метильных групп.

Для гомологов фенантрена (см. рис. 2, б) наблюдается уменьшение их содержания после экстракции в ряду: фенантрен < метилфенантрен < диметилфенантрен < триметилфенантрен, а степень их извлечения из ДТ составляет 88,6, 72, 68 и 63 % соответственно. Гомологи нафталина извлекаются труднее, их остаточное содержание в ДТ можно расположить в ряд: метилнафталин < диметилнафталин < триметилнафталин (см. рис. 3, а). Для гомологов флуорена (см. рис. 3, б) эта зависимость имеет вид: метилфлуорен < флуорен < диметилфлуорен < триметилфлуорен; степень очистки ДТ от этих ПАУ – 90, 84, 60 и 42 % соответственно.

В качестве возможного механизма экстракции предложен подход, который основан на формировании жидких клатратов при π - π -взаимодействии между ненасыщенными связями в гоомоароматических и гетероциклических сернис-

тых соединениях и имидазолиевым кольцом ИЖ. Так, с увеличением размера сопряженного кольца ароматического или сернистого соединения и алкилзамещенного имидазолия увеличивается полярность соединения и повышается энергия дисперсии π -электронов. При этом становится сильнее π - π -взаимодействие между имидазолиевым катионом ИЖ и экстрагируемым компонентом, в результате эффективность экстракции возрастает [5]. В соответствии с вышеизложенным можно предположить, что молекулы нафталинов имеют меньшую энергию взаимодействия с имидазолиевым кольцом и экстрагируются в меньшей степени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований процесса экстракции серосодержащих соединений ДТ с использованием ИЖ на основе имидазола с различной длиной алкильных заместителей (бутил, октил, нонил, додецил, цетил) в положении 1 имидазольного кольца было показано, что оптимальными условиями этого процесса являются: температура 30–35 °С; время экстракции 60 мин; соотношение ДТ/ИЖ = 1.66–2.

В качестве экстрагента серосодержащих соединений ДТ наиболее эффективен 1N3MImBr, позволяющий снизить общее содержание серы в 2.6 раза.

Результаты исследования влияния группового и индивидуального состава производных ДБТ и ПАУ на степень очистки ДТ от этих примесей показало, что производные ДБТ и трициклические ароматические углеводороды извлекаются на 66–72 %. В меньшей степени происходит извлечение нафталина и его гомологов – 37 %.

Среди гомологов ДБТ наиболее полно извлекается ДиМеДБТ, а степень извлечения снижается в ряду: ДиМеДБТ (86 %) > МеДБТ (57 %) > ДБТ (37 %) > ТриМеДБТ (23 %).

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии нефти СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер 121031200182-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chen T.-M., Kuschner W. G., Gokhale J., Shofer S. Outdoor air pollution: nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide health effects // *Am. J. Med. Sci.* 2007. Vol. 333, No. 4. P. 249–256.
- Ахметов С. А. Технология глубокой переработки нефти и газа: учеб. пособие. Уфа: Гилем, 2002. 672 с.
- Ma X., Sakanishi K., Mochida I. Hydrodesulfurization reactivities of various sulfur compounds in diesel fuel // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1994. Vol. 33. P. 218–222.
- Kulkarni P. S., Afonso C. A. M. Deep desulfurization of diesel fuel using ionic liquids: current status and future challenges // *Green Chem.* 2010. Vol. 12. P. 1139–1149.
- Асланов Л. А., Анисимов А. В. Избирательное удаление серосодержащих соединений из нефтепродуктов с помощью ионных жидкостей (обзор) // *Нефтехимия*. 2004. Т. 44, № 2. С. 83–88.
- Francisco M., Arce A., Soto A. Ionic liquids on desulfurization of fuel oils // *Fluid Phase Equilib.* 2010. Vol. 294, No. 1–2. P. 39–48.
- Ibrahim M. H., Hayyan M., Hashim M. A., Hayyan A., Hadj-Kali M. K. Physicochemical properties of piperidinium, ammonium, pyrrolidinium and morpholinium cations based ionic liquids paired with bis(trifluoromethylsulfonyl)imide anion // *Fluid Phase Equilib.* 2016. Vol. 427. P. 18–26.
- Raj J. J., Magaret S., Pranesh M., Lethesh K. C., Devi W. C., Mutalib M. I. A. Dual functionalized imidazolium ionic liquids as a green solvent for extractive desulfurization of fuel oil: toxicology and mechanistic studies // *J. Cleaner Prod.* 2019. Vol. 213. P. 989–998.
- Bösmann A., Datsevich L., Jess A., Lauter A., Schmitz C., Wasserscheid P. Deep desulfurization of diesel fuel by extraction with ionic liquids // *Chem. Commun.* 2001. Vol. 23. P. 2494–2495.
- Zhang S., Zhang Z. C. Novel properties of ionic liquids in selective sulfur removal from fuels at room temperature // *Green Chem.* 2002. Vol. 4, No. 4. P. 376–379.
- Zhang S., Zhang Q., Zhang Z. C. Extractive desulfurization and denitrogenation of fuels using ionic liquids // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2004. Vol. 43, No. 2. P. 614–622.
- Butt H. S., Lethesh K. C., Fiksdahl A. Fuel oil desulfurization with dual functionalized imidazolium based ionic liquids // *Sep. Purif. Technol.* 2020. Vol. 248. Art. 116959.
- Su B.-M., Zhang S., Zhang, Z. C. Structural elucidation of thiophene interaction with ionic liquids by multinuclear NMR spectroscopy // *J. Phys. Chem. B.* 2004. Vol. 108. P. 19510–19517.
- Holbrey J. D., Reichert W. M., Nieuwenhuyzen M., Sheppard O., Hardacre C., Rogers R. D. Liquid clathrate formation in ionic liquid-aromatic mixtures // *Chem. Commun.* 2003. Vol. 9, No. 4. P. 476–477.
- Li J., Lei X.-J., Tang X.-D., Zhang X.-P., Wang Z.-Y., Jiao S. Acid dicationic ionic liquids as extractants for extractive desulfurization // *Energy Fuels*. 2019. Vol. 33. P. 4079–4088.
- Gao H., Luo M., Xing J., Wu Y., Li Y., Li W., Liu Q., Liu H. Desulfurization of fuel by extraction with pyridinium-based ionic liquids // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008. Vol. 47, No. 21. P. 8384–8388.
- Otsuki S., Nonaka T., Takashima N., Qian W., Ishihara A., Imai T., Kabe T. Oxidative desulfurization of light gas oil and vacuum gas oil by oxidation and solvent extraction // *Energy Fuels*. 2000. Vol. 14, No. 6. P. 1232–1239.
- Wilfred C. D., Kiat C. F., Man Z., Bustam M. A., Mutalib M. I. M., Phak C. Z. Extraction of dibenzothiophene from dodecane using ionic liquids // *Fuel Process. Technol.* 2012. Vol. 93. P. 85–89.
- Mjalli F. S., Ahmed O. U., Al-Wahaibi T., Al-Wahaibi Y., AlNashef I. M. Deep oxidative desulfurization of liquid fuels // *Rev. Chem. Eng.* 2014. Vol. 30, No. 4. P. 337–378.
- Pat. US 8821716 B2, 2014.
- Shimizu K., Gomes M. F. C., Pádua A. A. H., Rebelo L. P. N., Lopes J. N. C. Three commentaries on the nano-segregated structure of ionic liquids // *J. Mol. Struct. THEOCHEM.* 2010. Vol. 946. P. 70–76.
- Lü R., Lin J., Qu Z. Theoretical study on interactions between thiophene/dibenzothiophene/cyclohexane/toluene and 1-methyl-3-octylimidazolium tetrafluoroborate // *Struct. Chem.* 2013. Vol. 24, No. 2. P. 507–515.