

STABILIZATION OF ASPHALTENE DEPOSITION USING NEW DEEP EUTECTIC SOLVENTS

K.A. Sadykov¹, S.B. Ryspaeva^{*2}, A.Zh. Kerimkulova², Sh.S. Islam², K. Maratkyzy², E. Aryslan²

¹JSC Bekturov Institute of Chemical Sciences, Almaty, Kazakhstan

²NJSC Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

^{*}Corresponding author e-mail: ryspaeva95@inbox.ru

Abstract: *Introduction.* One of the major challenges in oil production and transportation is the aggregation and precipitation of asphaltenes, which leads to the formation of deposits in pipelines and equipment, thereby reducing operational efficiency. Preventing asphaltene precipitation is essential for improving the stability and environmental safety of petroleum systems. *The purpose of the work:* To investigate the efficiency of betaine-based deep eutectic solvents (DESs) as inhibitors of asphaltene aggregation and precipitation. *Results and discussions:* The synthesized DES was tested on a model oil system prepared from toluene and asphaltenes extracted from Karazhanbas crude oil. UV-visible spectrophotometry showed that the addition of DES reduced the absorption intensity by 40–45% and shifted the precipitation onset point from an n-heptane/toluene ratio of 1.0 to 1.2. Rheological measurements revealed a decrease in viscosity from 78.2 to 45.6 mPa·s, indicating reduced asphaltene aggregation and improved colloidal stability. *Conclusion:* The betaine-based DES demonstrated high efficiency as a “green” asphaltene inhibitor. The obtained results confirm the potential of such compounds for improving oil production stability, extending equipment lifetime, and reducing environmental risks.

Keywords: asphaltene, deep eutectic solvent, inhibitor, oil, propylene glycol, betaine, UV spectrophotometer.

Kanat Amirkulovich Sadykov	Master of Chemistry; E-mail: kanat.sadykov.80@bk.ru
Salimat Bukenkyzy Ryspayeva	Master of Natural Sciences; E-mail: ryspaeva95@inbox.ru
Kerimkulova Aigul Zhadraevna	Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor; E-mail: kerimkulova07@mail.ru
Islam Sholpan Saparbayeva	PhD; E-mail: sholpan_islamova@mail.ru
Kamila Maratkyzy	Master's student
Yerulan Aryslan	Master's student

Citation: Sadykov K.A., Ryspaeva S.B., Kerimkulova A.Zh., Islam Sh., Maratkyzy K., Aryslan E. Stabilization of asphaltene deposition using new deep eutectic solvents. *Chem. J. Kaz.*, 2025, 4(92), 117-127. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.55>

СТАБИЛИЗИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ АСФАЛЬТЕНОВ С ПОМОЩЬЮ НОВЫХ ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ

**К.А. Садыков¹, *С.Б. Рыспаева², А.Ж. Керимкулова²,
Ш.С. Ислам², К. Маратқызы², Е. Арыслан²**

¹АО «Институт химических наук имени А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан

²Satbayev University, НАО, Алматы, Казахстан

Резюме. Введение. Одной из наиболее серьёзных проблем при добыче и транспортировке нефти остаётся агрегация и выпадение асфальтенов, вызывающие образование отложений в трубопроводах и оборудовании. Предотвращение осаждения асфальтенов является важной задачей для повышения стабильности и экологической безопасности нефтяных систем. *Цель работы:* Исследовать эффективность глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) на основе бетаина в качестве ингибиторов агломерации и осаждения асфальтенов. *Результаты и обсуждения:* Синтезированный ГЭР был протестирован на модельной нефти, приготовленной на основе толуола и асфальтенов, выделенных из нефти Каражанбасского месторождения. Методом УФ-спектроскопии установлено, что при добавлении ГЭР интенсивность поглощения снижается на 40–45 %, а точка начала осаждения смещается с соотношения н-гептан/толуол 1,0 до 1.2. Реологические исследования показали уменьшение вязкости с 78.2 до 45.6 мПа·с, что свидетельствует о снижении степени агломерации асфальтенов и стабилизации коллоидной системы. *Вывод:* Глубокий эвтектический растворитель на основе бетаина проявил высокую эффективность в качестве «зелёного» ингибитора асфальтенов. Полученные данные подтверждают перспективность применения таких соединений для повышения надёжности нефтепромысловых процессов, продления срока службы оборудования и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: асфальтен, глубокий эвтектический растворитель, ингибитор, нефть, пропиленгликоль, бетаин, УФ-спектрофотометр.

<i>Садыков Канат Амиркулович</i>	<i>магистр химических наук</i>
<i>Рыспаева Салимат Букенқызы</i>	<i>магистр естественных наук</i>
<i>Керимкулова Айгуль Жадраевна</i>	<i>кандидат химических наук, ассоциированный профессор</i>
<i>Ислам Шолпан Сапарбайқызы</i>	<i>PhD</i>
<i>Маратқызы Камила</i>	<i>магистрант</i>
<i>Арыслан Ерулан</i>	<i>магистрант</i>

1. Введение

Нефть является основой производства горюче-смазочных материалов в нашей стране. Производство и транспортировка нефтепродуктов осуществляется по трубопроводам. Поскольку состав нефти включает тяжелые смолисто-асфальтеновые соединения, они быстро оседают на стенках труб. Одним из таких смолистых соединений является асфальтен. Асфальтены оседают на стенках труб и оборудования в процессе переработки нефти, создавая препятствия. Чтобы избежать этого недостатка, необходимо использовать в составе нефти ингибитор асфальтенов — глубокий эвтектический растворитель [1,2].

Основной целью исследования было синтезировать «зелёный» ингибитор, замедляющий процесс осаждения асфальтенов, обладающий низким вредным воздействием на окружающую среду и относительно

невысокой стоимостью. Поскольку ингибитор замедляет протекание определённого процесса, перед нами стояла задача синтезировать соединение, способное замедлить осаждение асфальтенов. На основе анализа литературы и предыдущих исследований были выбраны основные сырьевые компоненты, методика и технология проведения исследования. В литературе указано, что глубокие эвтектические растворители были синтезированы и использованы для различных целей. Проведен обзор исследований и публикаций, связанных с нефтепродуктами, и выбраны наиболее оптимальные и доступные по стоимости соединения.

В ходе исследования были изучены образцы нефти, полученные с двух месторождений. Сравнив с предыдущими исследованиями, был выбран подходящий глубокий эвтектический растворитель. Взаимодействие с асфальтенами, содержащимися в нефти, исследовалось с помощью прибора, работающего в ультрафиолетовом диапазоне. На основе полученных результатов были сделаны соответствующие выводы [3,4].

Глубокий эвтектический растворитель (ГЭР) не является строго определённым химическим соединением, однако в большинстве случаев представляет собой двухкомпонентную смесь, содержащую в молярном соотношении соответствующие компоненты – донор и акцептор водородной связи (ДВС и АВС) [5]. Компоненты ГЭР полностью смешиваются между собой, и это смешивание, как правило, происходит благодаря образованию водородных связей, поэтому они проявляют неидеальное поведение в жидкой фазе. В отличие от ионных жидкостей, ГЭР можно получить из биоразлагаемых компонентов с использованием простых методов. Обычно они менее токсичны и дешевле в синтезе.

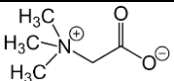
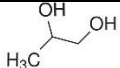
Для применения ГЭР в ингибировании асфальтенов важны следующие свойства: высокая способность растворять различные вещества, химическая и термическая стабильность, низкое давление пара и негорючесть. Также доказана возможность их регенерации [6]. ГЭР взаимодействует с различными компонентами посредством водородных связей и Ван-Дер-Ваальсовых сил, а также за счёт электростатического взаимодействия, что обеспечивает отличную совместимость с полярными веществами. Свойства DES можно изменять путём замены донора или акцептора водородной связи на другой химический компонент либо путём изменения их молярного соотношения. Это расширяет потенциал применения DES в различных областях [7].

Наиболее часто применяемый способ получения всех видов ГЭР заключается в смешивании компонентов в заданном молярном соотношении и нагревании смеси до средней высокой температуры (обычно 60–100°C) в течение нескольких часов до образования однородной прозрачной жидкости [8].

2. Экспериментальная часть

Для приготовления глубоких эвтектических растворителей в качестве акцептора водородной связи (АВС) был использован бетаин благодаря низкой стоимости, биоразлагаемости и низкой токсичности, а в качестве донора водородной связи (ДВС) был использован пропиленгликоль (1,2-пропандиол). В таблице 1 приведена информация о компонентах.

Таблица 1 – Компоненты для приготовления ГЭР

№	АВС	Структурная формула	ДВС	Структурная формула	Мольное соотношение
1	Бетаин		Пропиленгликоль		1:4

Эвтектические смеси были получены путём смешивания двух компонентов в соответствующем молярном соотношении (таблица 1) при температуре 80 °С и нормальном давлении до образования однородной бесцветной жидкости.



Рисунок 1 – ГЭР полученный на основе бетаина и пропиленгликоля.

Соотношение 1:4 обеспечивает оптимальное образование водородных связей, что улучшает растворяющую способность ГЭР. Кроме того, такая пропорция позволяет достичь стабильной и однородной жидкой фазы при умеренном нагреве.

Асфальтены экстрагировали из нефти месторождения Каражанбас (Казахстан) по методу IP143. Для получения асфальтенов из сырой нефти, к заранее отмеренному количеству нефти (по 5 мл) добавляют н-гептан и оставляют на сутки в защищённом от солнечного света месте. В течение 24 часов нефть и н-гептан взаимодействуют, в результате чего на дне раствора образуется осадок асфальтенов. Верхний слой нефти аккуратно отделяют, не перемешивая, с помощью фильтрации. Для этого готовят фильтровальную систему с фильтровальной бумагой. Бумагу размещают так, чтобы она удобно входила в колбу, затем раствор аккуратно выливают на фильтр (рисунок 2,3). Жидкая часть нефти с низким содержанием

асфальтенов проходит через фильтр и собирается на дне колбы. Этот процесс занимает много времени, так как на пористой поверхности фильтровальной бумаги оседают смолистые асфальтеновые соединения, уменьшая скорость прохождения жидкости.



Рисунок 1 – Осаждение асфальтенов в нефти Каражанбас с помощью н-гептана.



Рисунок 2 – Осажденные асфальтены в фильтровальной бумаге.

Далее с помощью экстрактора Сокслета экстрагируем асфальтены с помощью толуола при 120°C в течении 40 минут.

Полученные асфальтены подвергаются сушке в сушильном шкафу при температуре 100 °C в течение 24 часов для удаления излишней влаги. В результате получается полностью высушенный асфальтен, как показано на рисунке 3.



Рисунок 3 – Высушенный асфальтен.

Для дальнейшего изучения влияния зелёного ингибитора на асфальтены готовится модельное масло на основе асфальтенов. Было приготовлено 150 мл раствора асфальтенов, синтезированных из нефти Жанаозен, в толуоле. Асфальтены, полученные из нефти Каражанбас, смешали со 100 мл толуола. Растворы заливаются в магнитную мешалку и перемешиваются при температуре 80 °С и частоте 200 об/мин в течение 1 часа.

Изменение вязкости и реологических свойств раствора при добавлении глубокого эвтектического растворителя

Методика исследования:

Для оценки влияния глубокого эвтектического растворителя (ГЭР) на структурно-реологические свойства нефтяных систем проводилось измерение динамической вязкости модельных образцов нефти до и после добавления ГЭР в различных объемах (0 мл, 0.2 мл, 0.4 мл, 0.6 мл и 0.8 мл). Измерения выполнялись с помощью ротационного вискозиметра при температуре 25 °С. Для обеспечения точности каждый эксперимент проводился трижды, после чего вычислялось среднее значение вязкости.

3. Результаты и их обсуждение

Исследование влияния глубокого эвтектического растворителя на процессы агломерации асфальтенов в нефтях Каражанбас и Жанаозен методом ультрафиолетовой спектроскопии

Для оценки эффективности ингибирования осаждения асфальтенов глубокими эвтектическими растворителями использовался метод УФ-спектроскопии. Каждый эксперимент проводился в трёх повторностях для обеспечения воспроизводимости результатов. Интенсивность поглощения ультрафиолетового излучения измерялась для каждого образца, после чего рассчитывались средние значения и стандартное отклонение. Погрешность измерений не превышала 2–3 %, что соответствует характеристикам используемого спектрофотометра. Для анализа данных использовалась стандартная статистическая обработка — вычисление средних значений, стандартных отклонений и построение графиков зависимости оптической плотности от объёма добавленного н-гептана.

Суть заключается в добавлении глубокого эвтектического растворителя к приготовленному модельному маслу с последующим титрованием нормальным гептаном. Модельное масло и глубокий эвтектический растворитель смешивали в соотношении 1:1, после чего в эту смесь титровывая добавляли 0.1 мл, 0.2 мл, 0.4 мл, 0.6 мл и 0.8 мл н-гептана. Каждый титрованный образец подвергался анализу с использованием ультрафиолетового спектрофотометра. На диаграмме (рисунок 4) ниже показана интенсивность поглощения ультрафиолетового излучения.

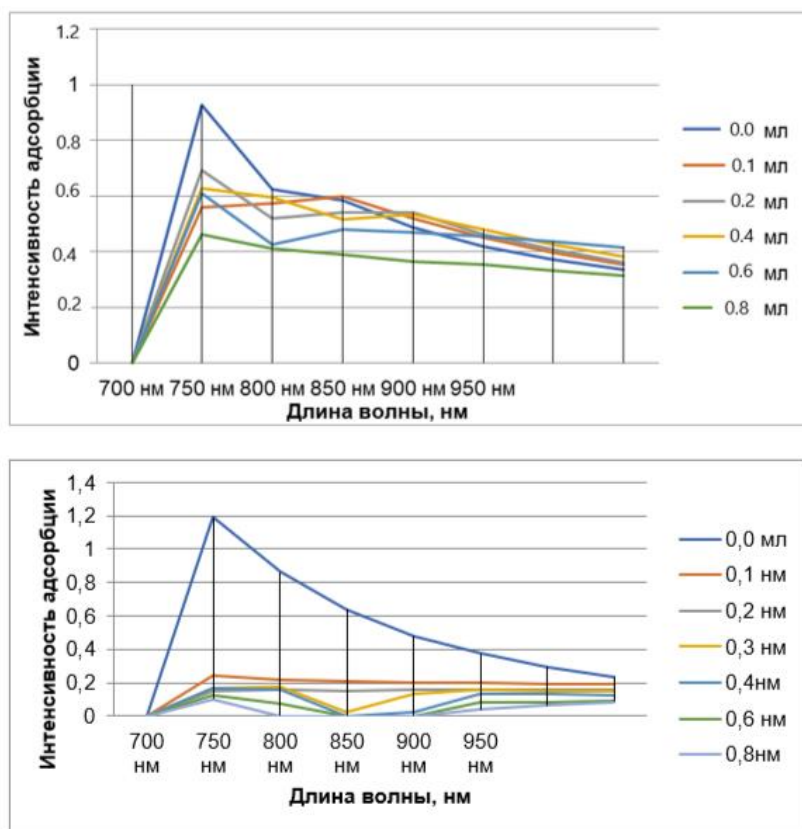


Рисунок 4 – Интенсивность поглощения ультрафиолетового излучения частиц асфальтена.

Образец, в который не был добавлен глубокий эвтектический растворитель (обозначен как 0 мл), демонстрирует наивысшую степень поглощения ультрафиолетового излучения. При осаждении асфальтенов их молекулы стремятся к агломерации. Чем больше агломератов образуется в растворе, тем меньше способность излучения проходить через него, и тем выше степень поглощения — адсорбции. В образце, в который добавлен ингибитор — глубокий эвтектический растворитель, степень агломерации снижается, так как ингибитор замедляет этот процесс. Соответственно, и степень адсорбции излучения также снижается. В частности, в образце нефти Каражанбас при добавлении 0.4 мл, 0.6 мл и 0.8 мл н-гептана уровень излучения на графике оказался равным нулю. Это свидетельствует об отсутствии агломерации, препятствующей прохождению излучения.

Результаты испытания определения точки начала осаждения асфальтенов методом УФ-спектрометрии.

Поведение агломерации асфальтенов и точка начала их осаждения были исследованы методом УФ-видимой спектрофотометрии. При титровании

модельных образцов н-гептаном наблюдалось постепенное снижение интенсивности поглощения вследствие разбавления раствора. Точка начала осаждения определялась в момент, когда эффект агрегирования частиц асфальтенов начинал преобладать над эффектом разбавления, что проявлялось изменением характера кривой поглощения. В исходных образцах интенсивность поглощения составляла около 0.45, после добавления н-гептана она снижалась до 0.25–0.26 в зависимости от присутствия ингибитора (рисунок 5).

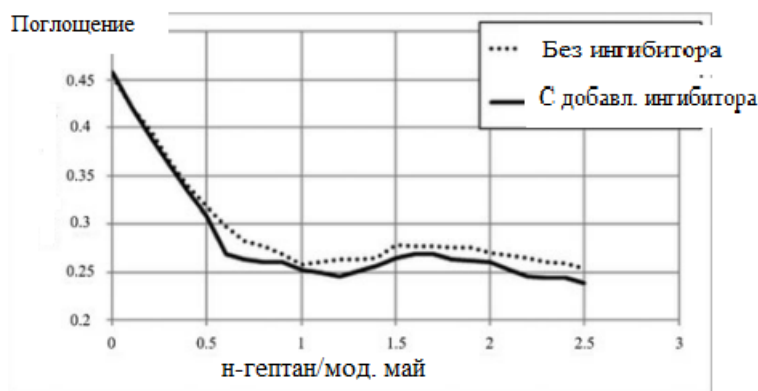


Рисунок 5 - Кривая интенсивности поглощения, полученная при изменении соотношения н-гептана и толуола для определения точки начала осаждения.

Для образцов, содержащих глубокий эвтектический растворитель (ГЭР), точка начала осаждения наступала при соотношении н-гептан/толуол = 1,2, тогда как для образцов без ингибитора — при соотношении 1.0. Это свидетельствует о том, что добавление ГЭР смещает момент начала агломерации, повышая устойчивость коллоидной системы и уменьшая склонность асфальтенов к осаждению. Более высокое значение соотношения н-гептан/толуол указывает на необходимость большего количества осаждающего агента для нейтрализации ингибирующего эффекта растворителя, что подтверждает эффективность ГЭР в качестве ингибитора асфальтеновой агломерации.

Изменение вязкости и реологических свойств раствора при добавлении глубокого эвтектического растворителя

В исходных образцах (0 мл ГЭР) наблюдалась повышенная вязкость, что связано с активным процессом агломерации асфальтенов и формированием устойчивой пространственной структуры, препятствующей течению. После введения глубокого эвтектического растворителя вязкость раствора заметно снижалась. Это объясняется тем, что ГЭР разрушает межмолекулярные связи между частицами асфальтенов, препятствуя их агрегации и осаждению. При концентрациях 0.4–0.8 мл система приобретала квазиньютоновский характер течения — вязкость становилась стабильной и

мало зависела от скорости сдвига, что указывает на формирование равномерной, устойчивой коллоидной системы. Таким образом, анализ реологических характеристик подтвердил эффективность ГЭР как ингибитора агломерации асфальтенов и стабилизатора нефтяной среды.

Таблица 2 – Изменение вязкости и оптической плотности при добавлении ГЭР

Образец	Объём ГЭР, мл	Вязкость, мПа·с	SD	Оптическая плотность ($\lambda=400$ нм)	SD
1	0.0	78.2	2.3	1.45	0.05
2	0.1	69.4	1.9	1.12	0.03
3	0.4	53.6	2.1	0.58	0.02
4	0.8	45.6	1.8	0.00	0.00

По результатам исследований были найдены усреднённые значения вязкости и оптической плотности модельного масла в зависимости от объёма добавленного глубокого эвтектического растворителя (ГЭР). Каждое измерение выполнялось в трёх повторностях; указаны средние значения и стандартное отклонение (SD).

Расширенное обсуждение механизма взаимодействия ГЭР с асфальтенами

Полученные результаты позволяют предложить вероятный механизм ингибирования агломерации асфальтенов глубоким эвтектическим растворителем (ГЭР) на основе бетаина. Установлено, что введение ГЭР приводит к смещению точки начала осаждения асфальтенов в область более высоких значений соотношения *n*-гептан/толуол и к снижению интенсивности УФ-поглощения, что указывает на уменьшение степени агрегации. Это свидетельствует о том, что ГЭР вмешивается в процессы межмолекулярного взаимодействия между асфальтевыми молекулами, стабилизируя их коллоидное состояние.

Согласно литературным данным [2,3], глубокие эвтектические растворители способны разрушать π – π взаимодействия между ароматическими ядрами асфальтенов и образовывать водородные связи с их полярными функциональными группами (–ОН, –СООН, –NH–). Компоненты ГЭР на основе бетаина выполняют двойную функцию — полярный катионный фрагмент взаимодействует с электронодонорными участками молекул асфальтенов, а гидроксильные и карбоксильные группы способствуют формированию водородных связей с донорно-акцепторными центрами. В результате молекулы асфальтенов частично «экранируются» растворителем, теряя способность к плотному π – π стэкингу, что предотвращает образование крупных агрегатов.

Таким образом, эффективность бетаин-содержащего ГЭР обусловлена совокупным действием водородного связывания, полярного экранирования и стерической стабилизации, препятствующих коагуляции асфальтенов. Это

согласуется с результатами измерений вязкости и УФ-спектроскопии, согласно которым добавление ГЭР снижает степень агломерации и обеспечивает формирование устойчивой коллоидной системы.

4. Заключение

По результатам проведённого исследования был синтезирован глубокий эвтектический растворитель на основе бетаина и изучена его эффективность в качестве ингибитора осаждения асфальтенов. Научная новизна работы заключается в экспериментальном подтверждении влияния ГЭР на процесс агрегации асфальтенов с использованием метода УФ-спектроскопии и в выявлении закономерности смещения точки начала осаждения при изменении соотношения н-гептан/толуол. Установлено, что введение ГЭР способствует снижению степени агломерации асфальтенов и стабилизации коллоидной системы, что отражается в уменьшении интенсивности УФ-поглощения.

В ходе работы из нефти Каражанбасского месторождения был экстрагирован асфальтен, после чего приготовлена модельная система с использованием толуола. Полученный растворитель показал способность замедлять процессы агрегации и выпадения асфальтенов, что подтверждено результатами УФ-спектроскопии.

Практическая значимость исследования состоит в том, что использование глубоких эвтектических растворителей, созданных на основе биосовместимых и доступных компонентов, позволяет повысить эффективность стабилизации нефти и снизить риск образования отложений в промысловых и транспортных условиях. Такие ингибиторы обладают «зелёным» характером, что уменьшает экологическую нагрузку и одновременно повышает надёжность технологического оборудования. Таким образом, глубокий эвтектический растворитель на основе бетаина может быть рекомендован для применения в нефтяной промышленности с целью стабилизации нефти, увеличения срока службы оборудования и уменьшения экологических рисков.

Финансирование и благодарность: Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP26194947, грант «Экологически чистые глубокие эвтектические растворители как новые инновационные ингибиторы осаждения асфальтенов»).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

АСФАЛЬТЕННІҢ ТҮНУЫН ЖАҢА ТЕРЕҢ ЭВТЕКТИКАЛЫҚ ЕРІТКІШТЕР АРҚЫЛЫ ТҰРАҚТАНДЫРУ

К.А. Садықов¹ С.Б. Рыспаева², А.Ж. Керимкулова², Ш.С. Ислам²,
К. Маратқызы², Е. Арыслан²

¹«Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты» АҚ, Алматы, Қазақстан

²Satbayev University, КеАҚ, Алматы, Қазақстан

Түйіндеме. *Kіріспе.* Мұнай өндіру мен тасымалдау үдерістеріндегі ең күрделі мәселелердің бірі – асфальтендердің агрегациясы мен тұнуы. Бұл құбылыс құбырлар мен жабдықтарда қатты шөгінділердің пайда болуына әкеліп, өндіріс тиімділігін төмендетеді. Асфальтендердің тұнуын болдырмау – мұнай жүйелерінің тұрақтылығын және экологиялық қауіпсіздігін арттырудың маңызды міндеті болып табылады.

Жұмыстың мақсаты: Бетаин негізіндегі терең эвтектикалық еріткіштердің (ТЭЕ) асфальтендердің агрегациясы мен тұнуын тежеу қабілетін зерттеу.

Нәтижелер мен талқылаулар: Бетаин негізінде синтезделген ТЭЕ Каражанбас кен орнының мұнайынан алынған асфальтендерді қамтитын модельдік жүйеде сыналды. Ультракүлгін спектроскопия әдісі арқылы ТЭЕ қосылғанда жұтылу қарқындылығы 40–45 %-ға төмендейтіні және тұну басталу нүктесі *n*-гептан/толуол қатынасы 1.0-ден 1.2-ге ығысатыны анықталды. Реологиялық зерттеулер жүйенің тұтқырлығының 78.2-ден 45.6 МПа·с-қа дейін төмендегенін көрсетті, бұл асфальтендердің агрегация дәрежесінің азайғанын дәлелдейді. **Қорытынды:** Бетаин негізіндегі терең эвтектикалық еріткіш асфальтендердің «жасыл» ингибиторы ретінде жоғары тиімділік көрсетті. Алынған нәтижелер мұндай қосылыстарды мұнай өндіру және тасымалдау кезінде жабдықтардың қызмет ету мерзімін ұзарту мен қоршаған ортаға теріс әсерін азайту мақсатында қолданудың болашағын растайды.

Түйін сөздер: асфальтен, терең эвтектикалық еріткіш, ингибитор, мұнай, пропиленгликоль, бетаин, ультракүлгін (УК) спектрофотометр.

Садықов Қанат Амиркулович	<i>химия ғылымдарының магистрі</i>
Рыспаева Салимат Букенкызы	<i>жаратылыстану ғылымдарының магистрі</i>
Керимкулова Айгүл Жадраевна	<i>химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор</i>
Ислам Шолпан Сапарбайқызы	<i>PhD</i>
Маратқызы Камила	<i>Қ.И. Сатбаев атындағы ҚазҰТЗУ нің магистранты</i>
Арыслан Ерұлан	<i>Қ.И. Сатбаев атындағы ҚазҰТЗУ нің магистранты</i>

References

1. Rahmalia W., Shofiyani A., Sutiknyawati Y., Septiani S. Simple Green Routes for Metal-Bixin Complexes Synthesis Using Glycerol-Based Deep Eutectic Solvent. *Indones. J. Chem.*, **2022**, No.6, 22, 1759. DOI: 10.22146/ijc.76759
2. Sanati A., Malayeri M.R. Hydrophobic Deep Eutectic Solvent and Glycolipid Biosurfactant as Green Asphaltene Inhibitors: Experimental and Theoretical Studies. *Energy Fuels*, **2021**, No. 35(6), 4791–4802. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03922
3. Kumar N., Mohan M., Smith J.C., Simmons B.A., Singh S., Banerjee T. Inhibition of asphaltene aggregation using deep eutectic solvents: COSMO-RS calculations and experimental validation. *J. Mol. Liq.*, **2024**, No. 400, 124471. DOI: 10.1016/j.molliq.2024.124471
4. Orrego-Ruiz J.A., García R., Cundar Paredes C.D., Rojas-Ruiz F.A. Characterization of Acid Species in Asphaltene Fractions by FT-ICR-MS and Infrared Spectroscopy. *Energy & Fuels*, **2022**, No. 36(24), 14852–14864. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c03219
5. Hebbar A., Debraj D., Acharya S., Vatti P.K., Dey P., et al. Deep Eutectic Solvents Interaction with Asphaltenes: A Combined Experimental and Molecular Dynamics Study. *Journal of Molecular Liquids*, **2023**, No. 387, 122627. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.122627
6. Ryspaeva S., Kerimkulova A., Rafikova K., Nauryzova S., Islam S., Aydemir M., Kozhaisakova M. Deep Eutectic Solvents for Sustainable Management of Asphaltene Deposition in Oil Production. *Engineered Science*, **2024**, No. 29, 1102. DOI: 10.30919/es1102
7. Sanati A., Malayeri M.R., Busse O., Weigand J.J., Beckmann M. Surface Energy and Wetting Behavior of Dolomite in the Presence of Carboxylic Acid-Based Deep Eutectic Solvents. *Langmuir*, **2022**, No. 38(50), 15622–15631. DOI: 10.1021/acs.langmuir.2c02312