

УДК 665.662.9:66.084.8:534.8

МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ МАЗУТА ОТ СЕРОВОДОРОДА ВОЛНОВЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

© 2023 г. Н. А. Пивоварова, Е. С. Акишина*, Г. В. Власова, Ю. Т. Пименов

Астраханский государственный технический университет», Астрахань, 414056 Россия
E-mail: peterskovakat@mail.ru*; n.pivovarova@astu.org; ranec2003@mail.ru; pimenov@astu.org

Поступила в редакцию 21.03.2022

После доработки 20.06.2022

Принята к публикации 31.01.2023

Получены экспериментальные результаты исследований изменения дисперсного состояния мазута с растворенным в нем сероводородом под действием низкоэнергетической волновой обработки. Показано, что воздействие ультразвуком и постоянным магнитным полем позволяют гарантированно снизить содержание сероводорода в мазуте до концентрации менее 10 ppm, а в комбинации с поглотителями – до 1 ppm. Определены оптимальные параметры волновой обработки. Изменение среднего диаметра частиц дисперсной фазы мазута демонстрирует экстремальную зависимость. С позиций нефтяных дисперсных систем предложен механизм процессов, происходящих при очистке мазута от сероводорода.

Ключевые слова: мазут, сероводород, ультразвук, магнитное поле, поглотители сероводорода.

DOI: 10.53392/27823857-2023-3-1-153; EDN: PWMKAC

В Российской Федерации вырабатывается значительное количество мазута — в год около 40 млн т. В процессе его транспортировки, операций слива-налива и хранения выделяется растворенный в мазуте сероводород, представляющий большую опасность для человека и окружающей среды. Для снижения такого вредного воздействия содержание сероводорода в топочном мазуте ограничивают значением 10 ppm в соответствии с Техническим Регламентом Таможенного Союза ТР ТС 013/2011, а в мазуте, поставляемым на экспорт, это значение не должно превышать 2 ppm.

Однако, даже при таких ограничениях содержание сероводорода в газовой фазе нефтяных емкостей может быть на один-два порядка выше, чем его концентрация в топливе, т. к. производимый на нефтеперерабатывающих предприятиях мазут может содержать до 170 ppm сероводорода [1].

Для снижения содержания H_2S в мазуте до нормативных значений используют физические (отдув) и химические (реагенты-поглотители, или нейтрализаторов) методы. Достижение более глубокой степени очистки (менее 1 ppm) посредством традиционных методов представляет определенные трудности.

Известно, что низкоэнергетические волновые технологии позволяют существенно повысить эф-

фективность различных процессов подготовки, транспортировки и переработки углеводородного сырья, облагораживания и применения нефтепродуктов, как, например, разделение водно-нефтяных эмульсий, отделение механических примесей, повышение выхода светлых продуктов при ректификации и др. [2].

Комбинирование существующих физических и химических методов очистки мазута от сероводорода с низкоэнергетической волновой обработкой открывает новые возможности для интенсификации этого процесса.

Цель настоящей работы — определение оптимальных параметров низкоэнергетической волновой очистки мазута от сероводорода и рассмотрение механизма процесса с позиций теории нефтяных дисперсных систем.

Объекты и методы

Объект исследования — мазут, отобранный на выходе с атмосферной колонны комбинированной установки переработки газоконденсата Астраханского газоперерабатывающего завода, характеристика которого указана в таблице. Для поглощения сероводорода, выделяемого в процессе волновой обработки (Л) были использованы поглотители (П) се-

Таблица. Показатели качества мазута Астраханского газоперерабатывающего завода

Показатели	Значение	Метод анализа
Плотность при 15°C, кг/м ³	912	ГОСТ 3900–85
Температура застывания, °C	27	ГОСТ 20287–91
Содержание сероводорода, ppm	85.5	ГОСТ Р 53716–2009
Групповой углеводородный состав, мас. %		
парафино-нафтеновые УВ	38.1	ЯМР ¹ H и ¹³ C спектроскопия
ароматические УВ	37.5	
смолы толуольные и спирто-толуольные	22.4	
асфальтены	2.0	
Число парамагнитных центров, спин/г	0.69 × 1018	ЭПР-спектроскопия
Средний размер частиц дисперсной фазы, нм	276	Фотоколориметрический анализ

сероводорода АддиТоп ПФ (ООО «НТЦ «Салаватнефтеоргсинтез») на основе раствора формальдегида в алифатическом спирте и в ароматического растворителя и КолтекПС 166 (ООО «КолтекИнтернешнл»), на основе водно-спиртового раствора триазинов (далее по тексту АддиТоп и Колтек соответственно)

Магнитную обработку (МО) осуществляли в магнитном туннеле RU № 2167824, состоящем из четырех пар электромагнитов, создающих постоянное магнитное поле с варьируемой магнитной индукцией в интервале 0.10–0.40 Тл. Вектор магнитного поля направлен перпендикулярно вектору потока. Ультразвуковую обработку (УЗО) осуществляли на лабораторных аппаратах моделей ЛУК-0.125/50-О и Волна УЗТА-0.4/22-014 (ООО Центр ультразвуковых технологий, г. Бийск), источником ультразвукового воздействия которого является пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система (максимальная мощность устройства 0.33 Вт/см³). Комбинированную обработку проводили с помощью последовательного пропускания мазута через блоки ультразвуковой и магнитной обработки.

Содержание сероводорода и средний диаметр частиц дисперсной фазы мазута определяли сразу по завершении обработки, а также в последующие 2 ч для определения времени стабилизации нефтяной дисперсной системы.

Результаты и их обсуждение

Ниже представлены результаты процесса очистки мазута от сероводорода посредством совместного воздействия ультразвука и магнитного поля с последующим накоплением выделившегося сероводорода в абсорбенте для дальнейшего хранения и транспортировки с целью переработки. Поскольку пробы мазута, поставляемые в течение нескольких месяцев исследований, отличались начальным содержанием

сероводорода (85–98 ppm), при обработке результатов рассматривали не абсолютное содержание сероводорода, а степень его удаления (%).

Ультразвуковая обработка. На рис. 1 показана зависимость степени удаления H₂S из мазута от параметров ультразвуковой обработки (частота, мощность, время) мазута на степень удаления.

Эффективность удаления сероводорода из мазута с помощью ультразвука зависит как от мощности и частоты УЗО, так и от времени обработки. Были установлены наиболее эффективные условия извлечения сероводорода из мазута: продолжительность обработки 17 мин, мощность 0.23–0.33 Вт/см³, частота 50 кГц. При этом степень удаления сероводорода достигала 83–86%. При дальнейшем увеличении времени обработки степень удаления сероводорода существенно не изменялась.

Обработка магнитным полем. На рис. 2 представлена зависимость степени удаления сероводорода от магнитной индукции и линейной скорости потока мазута в активном зазоре магнетизатора. Наибольшее эффективное извлечение сероводорода из мазута достигается при скорости потока 0.3 м/с и магнитной индукции 0.3 Тл; степень удаления сероводорода составляет 82%, а остаточная его концентрация — 2 ppm.

При увеличении скорости до 0.4 м/с поток мазута не успевает подвергнуться воздействию магнитного поля, что приводит к меньшему извлечению сероводорода — степень удаления сероводорода составляет 35% (0.3 Тл).

Совместная волновая обработка. Совместную обработку осуществляли при эффективных параметрах магнитного и ультразвукового воздействия, определенных в ходе экспериментальных исследований, — величина магнитной индукции 0.3 Тл, скорость мазута в активном зазоре 0.3 м/с, частота ультразвуковых колебаний 50 кГц, мощность ульт-

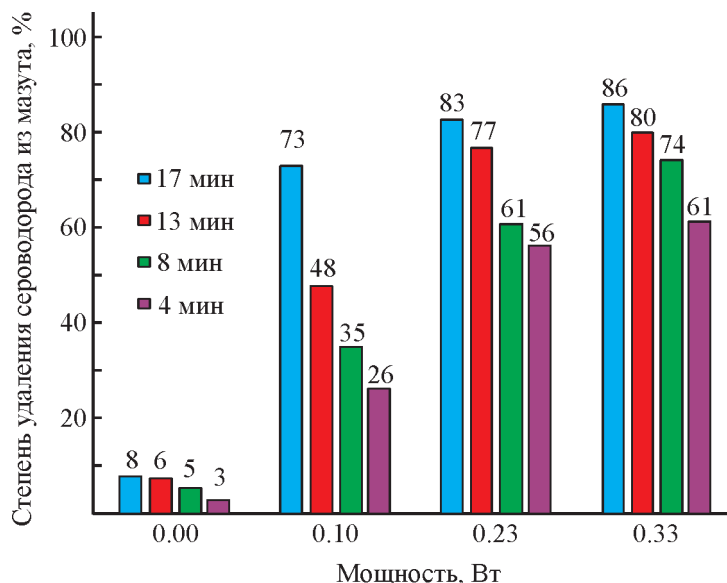


Рис. 1. Зависимость степени удаления сероводорода из мазута от мощности ультразвука и продолжительности обработки при частоте 50 кГц.

тразвука 0.33 Вт/см³. Совместное использование комбинации магнитной обработки и ультразвука позволяло достичь степени очистки мазута от сероводорода в 99%, а остаточная концентрация сероводорода составляла менее 2 ppm.

Использование поглотителей сероводорода.

В промышленности для снижения концентрации сероводорода в мазуте зачастую используют химический метод — добавки поглотителей. Представляло интерес изучение влияния волновой обработки на активность поглотителей. Испытания проводили при выявленных оптимальных условиях УЗО и МО. В качестве добавок исследованы поглотители сероводорода АддиТоп и Колтек. Результаты приведены на рис. 3. Как видно, применение поглотителей по-

зволяет получить степень удаления сероводорода 36–45% при концентрации 0.02 мас.%. Увеличение концентрации (на примере АддиТоп) ведет к более глубокой очистке — до 68%.

В случае комбинирования добавки поглотителя с ультразвуковой или магнитной обработкой степень удаления сероводорода достигает 99%. При этом такая высокая степень очистки имеет место при обеих концентрациях поглотителя АддиТоп, что ведет к практическому выводу о том, что УЗО позволяет существенно уменьшить расход дорогостоящих поглотителей.

Как следует из экспериментальных результатов, наибольшую степень извлечения сероводорода до 99% и его остаточное содержание менее 1 ppm позволяют достигать режимы обработки поглотите-

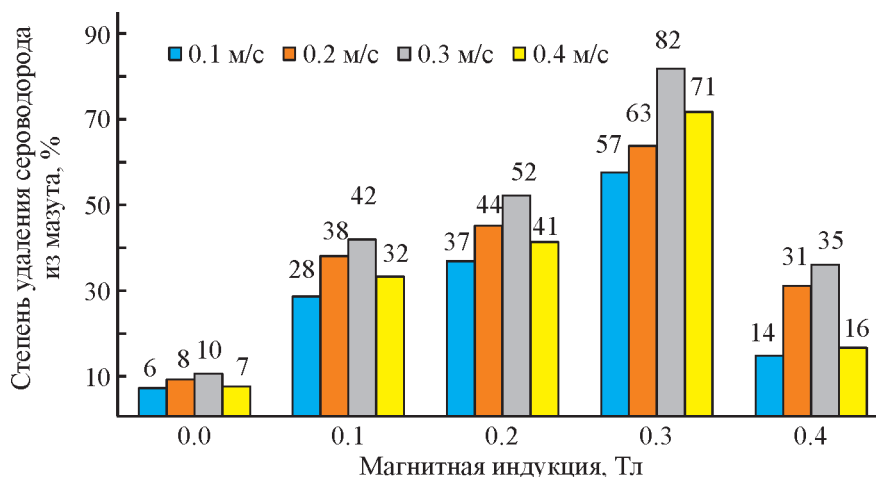


Рис. 2. Зависимость степени удаления сероводорода из мазута от магнитной индукции и скорости потока мазута.

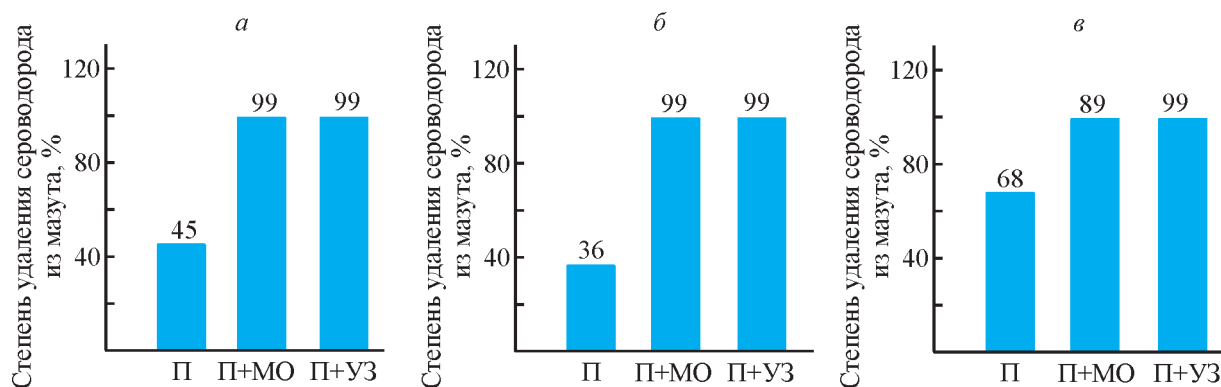


Рис. 3. Зависимость степени удаления сероводорода из мазута от варианта обработки: *а* — применение поглотителя Колтек, 0.02 мас. %; *б* — применение поглотителя АддиТоп, 0.02 мас. %; *в* — применение поглотителя АддиТоп 0.05 мас. %.

лями Колтек или АддиТоп при времени 4 мин и мощности ультразвука 0.33 Вт/см^3 , а также магнитное воздействие с индукцией 0.3 Тл и скоростью в активном зазоре магнетизатора 0.3 м/с.

Показатели качества мазута. В рамках исследований были проведены эксперименты по низкоэнергетическому волновому воздействию на следующие показатели качества мазута: плотность, кинематическая вязкость, температура застывания и коксуемость, чтобы выявить изменение основных показателей качества мазута в ходе волновой обработки.

Установлено, что вне зависимости от способа воздействия и режима обработки плотность прямогонного мазута при проведении испытаний колебалась в пределах погрешности, кинематическая вязкость изменялась от 14.8 до $13.7 \text{ мм}^2/\text{с}$, коксуемость — от 0.99% до 0.72%, что соответствует требованиям на топочный мазут.

При комбинированной обработке мазута магнитным полем и ультразвуком значения плотности и температуры застывания также изменялись в пределах погрешности, кинематическая вязкость снизилась с 14.8 до $13.3 \text{ мм}^2/\text{с}$, коксуемость — с 0.99 до 0.50%.

Теоретические аспекты изменения нефтяных дисперсных систем при волновых воздействиях

Физико-химические свойства нефтяных дисперсных систем (НДС) и эффективность процессов их переработки тесно связаны с дисперсным составом углеводородного сырья и нефтепродуктов. Для объяснения полученных результатов были проведены эксперименты по изучению влияния волновой обработки на изменение структуры НДС «мазут–сероводород».

Мазут при температуре выше 28°C представляет собой подвижную НДС. Показатели среднего диа-

метра частиц (СДЧ) такой дисперсной фазы, определенные непосредственно сразу после волновых обработок, существенно отличаются от значений СДЧ, определенных спустя 1.5 ч. Это время можно назвать временем стабилизации НДС.

Сразу после прохождения магнитного туннеля с повышением индукции средний размер дисперсной фазы мазута увеличивается вследствие коалесценции газовых пузырьков, достигая критических размеров. После того, как сероводород покидает жидкую фазу, система стабилизируется, а ее дисперсность возрастает в среднем на 15%. Аналогичную картину наблюдаем и при воздействии УЗО на систему «мазут–сероводород» — после выделения из мазута сероводорода СДЧ дисперсной фазы уменьшается. Наименьшее значение СДЧ мазута наблюдается при частотах 22 и 50 кГц и мощности 0.33 Вт/см^3 — уменьшение составляет 40%. Таким образом, увеличение мощности ультразвука тоже приводит к повышению степени извлечения сероводорода из мазута.

На рис. 4, *а*, *б* приведены зависимость изменения степени удаления сероводорода от среднего диаметра частиц НДС «мазут–сероводород» при магнитном (*а*) и ультразвуковом (*б*) воздействии на систему. Видно, что при УЗО средний диаметр частиц дисперсной фазы мазута до стабилизации системы растет также как и степень удаления сероводорода. При МО показатель степени удаления сероводорода проходит через максимум при 0.3 Тл. После стабилизации мазута его дисперсность возрастает еще больше; по сравнению с состоянием системы до стабилизации повышается также и степень удаления сероводорода.

Наблюдаемые закономерности изменения свойств и степени очистки мазута от сероводорода можно объяснить с позиций теории НДС, которые имеют сложный углеводородный и химический состав, часто содержат различные органические и

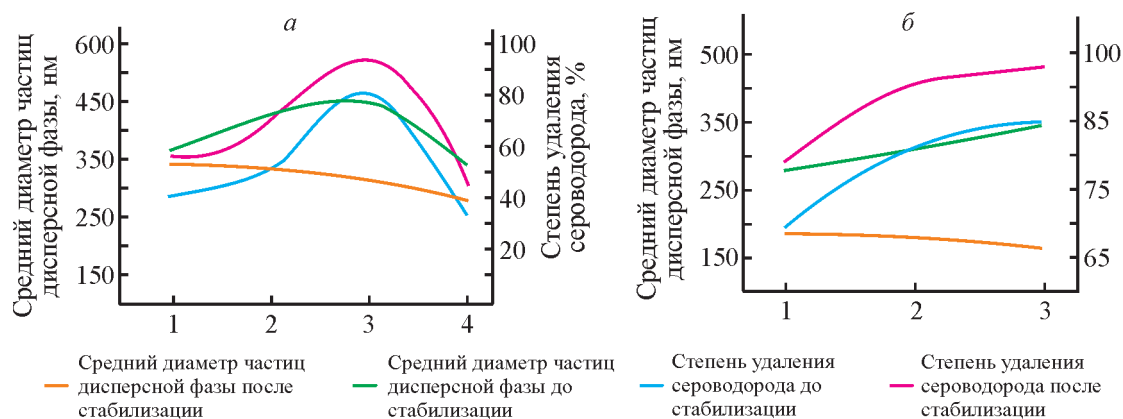


Рис. 4. Зависимость степени удаления сероводорода от среднего диаметра частиц при магнитной (а) и ультразвуковой (б) обработке.

Варианты обработки: а) 1 — МО 0.1 Тл; 2 — МО 0.2 Тл; 3 — МО 0.3 Тл; 4 — МО 0.4 Тл; б) 1 — УЗ-мощность 0.1 Вт/см³; 2 — УЗ-мощность 0.23 Вт/см³; 3 — УЗ-мощность 0.33 Вт/см³.

минеральные механические примеси, воду с растворенными солями, углеводородные или минеральные растворенные газы, в т. ч. сероводород, что и определяет дисперсность и основные свойства этих систем.

Согласно классическим представлениям в области теории НДС — основные элементы структуры — дисперсионная среда и частица дисперсной фазы. Дисперсная фаза, или так называемая сложная структурная единица (ССЕ), в основном существует в виде сферы, построенной из определенных компонентов системы в соответствии с их значением потенциала межмолекулярного взаимодействия [3]. Дисперсная частица в своем составе содержит упорядоченную внутреннюю часть, или ядро, и сольватную оболочку. Состав ядра зависит от природы НДС и может включать высокомолекулярные парафины и нафтены (для парафинистых нефтепродуктов), конденсированные арены, смолисто-асфальтеновые вещества (для ароматизированных), а также частицы механических примесей, жидкую или газовую фазу. Компоненты твердого ядра прочно связаны силами межмолекулярного взаимодействия. Ядра НДС с жидкой или газовой дисперсной фазой на границе раздела фаз покрыты нативными или техногенными поверхностно-активными веществами, поддерживающими их целостность.

Сольватная оболочка частиц дисперсной фазы образована из молекул меньшей молекулярной массы, энергия взаимодействия которых уменьшается от ядра к периферии. В составе сольватных оболочек, выделенных из остаточных нефтепродуктов, присутствуют мальтены низкой молекулярной массы, нефтяные кислоты, тиолы, фенолы и другие гетероциклические соединения.

В дисперсионной среде частицы дисперсной фазы перемещаются, подвергаясь разрушению и

восстановлению при воздействии молекул и частиц с более высокой кинетической энергией и при изменении условий существования возникающих от внешних воздействий, в т.ч. от волновых.

Изменение внешних условий вызывает в НДС гетерофазные флуктуации, приводящие к реорганизации структуры системы, т.е. изменению размеров и состава структурных элементов НДС [4–8].

Известно [4, 9], что в углеводородной среде межмолекулярные взаимодействия имеют не зарядовую природу, а спиновую. В нефтяных системах в качестве носителей спиновых или парамагнитных свойств выступают свободные стабильные радикалы, образовавшиеся в результате гомолитической диссоциации молекул асфальтенов, не способные рекомбинировать вследствие стерических затруднений. Практически все свободные радикалы НДС сконцентрированы в составе асфальтенов и высокомолекулярных смолистых веществ. Диамагнитные молекулы смол способны переходить в триплетное состояние или диссоциировать на радикалы при небольших энергетических воздействиях (около десятка кДж/моль).

Мазут с растворенным в нем сероводородом — сложная дисперсная система. Самой крупной дисперсной фазой в этой системе являются газовые пузырьки, а дисперсионной средой выступает сам мазут. Газовый пузырек на границе раздела фаз окружен оболочкой, состоящей из поверхностно-активных высокомолекулярных гетероатомных соединений, в том числе смолисто-асфальтеновых веществ. Эта оболочка определяет прочность и устойчивость пузырька газа.

Мазут, в свою очередь, также является сложной НДС, в которой дисперсной фазой являются более мелкие дисперсные частицы, их размеры могут быть

на порядки меньше газовых пузырьков. Дисперсная фаза углеводородной части мазута представлена надмолекулярными образованиями, содержащими в ядре парамагнитные асфальтены, а в оболочках — смолами, конденсированными полициклическими ароматическими и нафтеновыми углеводородами. Дисперсионной средой являются наиболее легкие компоненты мазута — парафиновые углеводороды, нафтеновые и ароматические структуры невысокой цикличности.

Волновые воздействия вызывают перестройку всей НДС, приводящую к переходу оболочек и слоев дисперсных частиц в дисперсионную среду и изменению дисперсности системы. Структура молекул при этом практически не подвергается изменениям вследствие низкой энергии волновых воздействий.

Было доказано, что **ультразвук** играет вспомогательную роль в процессе обессеривания, способствуя полному перемешиванию реагентов, улучшая активность окислителей и разрушая макромолекулярные соединения [10, 11]. Ультразвуковые колебания производят колебания компонентов НДС, в том числе оболочек газовых пузырьков, вызывая нарушение межмолекулярных взаимодействий ПАВ на границе раздела фаз, деформацию и разрушение оболочек. Наряду с этим имеет место специфический эффект ультразвука: колебания вызывают кратковременное схлопывание газовой дисперсной фазы. Во время этого происходит сбрасывание оболочек вокруг пузырька и механическое разрушение структуры НДС, что облегчают агрегацию и укрупнение газовых пузырьков. Вследствие этого система

НДС характеризуется сначала резким ухудшением дисперсности, а затем, после выхода сероводорода в газовую фазу, уменьшением среднего размера частиц мазута. Последнее явление обусловлено не только выводом газовой фазы сероводорода из мазута, но и переходом части внешних иммобилизованных оболочек дисперсных частиц мазута в дисперсионную среду и повышением ее подвижности.

Постоянное же **магнитное поле** оказывает влияние на всю НДС через парамагнитные центры, содержащиеся в молекулах смолисто-асфальтеновых веществ (САВ). Их неспаренные спины ориентируются во внешнем магнитном поле в направлении вектора поля. Это приводит к изменению взаимного расположения молекул из-за поворотов и деформации дисперсных частиц с потерей части внешних слоев и перехода их в дисперсионную среду. Оболочки газовых пузырьков разрушаются, процесс агрегации пузырьков проходит интенсивнее. Далее наблюдаются явления, аналогичные вышеописанным при воздействии на мазут ультразвуком. Изменяется и НДС углеводородной фазы самого мазута. В результате перестройки появляется более упорядоченная организация дисперсной структуры с меньшими размерами частиц дисперсной фазы. Повышение гомогенности НДС также способствует агрегации газовых пузырьков. Механизм описываемого процесса представлен на рис. 5.

В присутствии поглотителей имеет место несколько иной процесс. Пузырьки газа при волновых воздействиях частично или полностью освобождаются от оболочек, благодаря чему имеют боль-

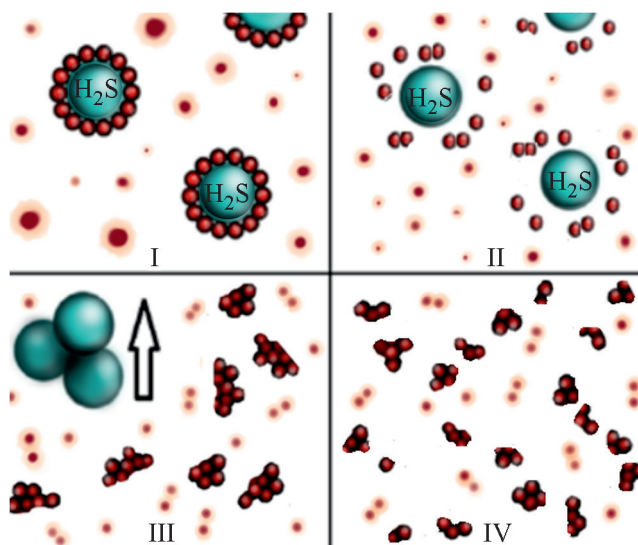


Рис. 5. Изменение среднего размера частиц дисперсной фазы в мазуте с растворенным сероводородом при волновой обработке: *I* — исходный вид ССЕ; *II* — отделение внешнего слоя ССЕ с высвобождением пузырьков газообразного сероводорода; *III* — агрегированные пузырьки сероводорода, выходящие из системы; *IV* — конечный вид ССЕ.

шую площадь контакта с поглотителем. Дисперсная газовая фаза сероводорода становится более доступной для взаимодействия с поглотителем и степень очистки от сероводорода возрастает. Как было показано выше на примере поглотителя Адди Топ, это позволяет достигать одинакового эффекта очистки от сероводорода при меньшем расходе поглотителя, так как он в значительно большей степени потребляется по назначению — на связывание сероводорода.

Выводы

Предложен механизм волнового воздействия на процесс очистки мазута от сероводорода, который поэтапно показывает последовательность выделения сероводорода из НДС мазута. Зависимость среднего диаметра частиц дисперсной фазы НДС мазута от волновой обработки демонстрирует экстремальный характер. С повышением индукции магнитного поля и мощности ультразвука средний размер дисперсной фазы мазута увеличивается, так как газовые пузырьки сероводорода агрегируют, а затем снижаются по мере выхода газовой фазы из НДС.

Проведены исследования по интенсификации процесса очистки мазута от сероводорода путем низкоэнергетических волновых воздействий ультразвуком и магнитным полем. Эффективными параметрами для ультразвуковой обработки мазута являются частота ультразвука 50 кГц и мощность 0.33 Вт/см³. Для магнитной обработки определена скорость в активном зазоре магнитного поля — 0.3 м/с при магнитной индукции — 0.3 Тл. При этих параметрах достигается степень извлечения сероводорода из мазута 82–86% (остаточная концентрация сероводорода до 2 ppm).

Комбинированное применение поглотителей и волновых воздействий для очистки мазута от сероводорода показало, что наибольшую степень удаления сероводорода до 99 % (остаточное содержание менее 1 ppm) позволяют получать режимы обработки поглотителями Колтек или АддиТоп при воздействии магнитным полем 0.3 Тл и скорости потока 0.3 м/с или воздействии ультразвука мощностью 0.33 Вт/см³.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-29-24001.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Пивоварова Надежда Анатольевна, д.т.н., профессор

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5486-3141>

Акишина Екатерина Сергеевна, к.т.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2481-8686>

Власова Галина Владимировна, к.т.н., доцент

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7233-5537>

Пименов Юрий Тимофеевич, д.х.н., профессор

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-0500>

Список литературы

1. *Ветрова Е. К., Морозов В. А., Дорогощинская В. А., Сысоева О. В., Тонконогов Б. П.* Улучшение экологических свойств товарного мазута // ХТТМ. 2011. № 2. С. 51–52. <https://doi.org/10.1007/s10553-011-0273-4>
2. *Пивоварова Н. А.* Использование волновых воздействий в переработке углеводородного сырья (обзор) // Нефтехимия. 2019. Т. 59. № 7. С. 727–738. <https://doi.org/10.1134/S002824211907013X> [*Pivovarova N. A.* Use of Wave Effect in Processing of the Hydrocarbonic Raw Material (Review) // *Petrol. Chemistry*. 2019. V. 59. N 6. P. 559–569. <https://doi.org/10.1134/S0965544119060148>].
3. *Сафиева Р. З., Мишин В. Д.* Системный анализ развития представлений о нефтяных системах: от химии нефти к петроинформатике // Петролеомика. 2021. Т. 1. № 1. С. 2–18. <https://doi.org/10.1134/S2782385721010016> [*Safieva R. Z., Mishin V. D.* Systems Analysis of the Evolution of Views on Oil Systems: From Petroleum Chemistry to Petroinformatics // *Petrol. Chemistry*. 2021. T. 61. N 5. С. 539–554. <https://doi.org/10.1134/S0965544121060128>].
4. *Унгер Ф. Г.* Фундаментальные и прикладные результаты исследования нефтяных дисперсных систем. Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2011. С. 8–74.
5. *Коробов Г. Ю., Рогачев М. К.* Исследование влияния асфальто-смолистых компонентов в нефти на процесс образования асфальтосмолопарафиновых отложений // Журнал нефтегазовое дело. 2015. № 3. С. 162–173.
6. *Курочкин А. К., Курочкин А. А.* Гидродинамические роторные кавитаторы. Кавитационные процессы и технологии // Экологический вестник России. 2018. № 8. С. 1–4.
7. *Лесин С. В., Лесин В. И.* Механизм влияния переменного электромагнитного поля на нефтяные дисперсные системы // Наногетерогенный катализ. 2018. Т. 3. № 1. С. 36–39. <https://doi.org/10.1134/S2414215818010069>

8. Сайдахмедов Э. Э., Сайдахмедов И. М. Влияние внешнего воздействия на реологические свойства нефтяных дисперсных систем // Интернаука. 2021. № 1–2. С. 38–40.
9. Гафуров М. Р., Пономарев А. А., Мамин Г. В., Родионов А. А., Мурзаханов Ф. Ф., Араш Т., Орлинский С. Б. Применение импульсных и высокочастотных методов электронного парамагнитного резонанса для исследования нефтяных дисперсных систем // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 4. С. 2–14.
<https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.2-14>
10. Lin Y., Feng L., Li, X., Chen Y., Yin G., & Zhou W. Study on ultrasound-assisted oxidative desulfurization for crude Oil // Elsevier Science Publishing Company, Inc: UltrasonicsSonochemistry. 2020. V. 63. N 104946.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104946>
11. Zhou C., Wang Y., Huang X., Wu Y., Chen J. Optimization of ultrasonic-assisted oxidative desulfurization of gasoline and crude oil // Chem. Engineering and Processing – Process Intensification. January 2020. V. 147. N 107789020.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107789>