

ӨОЖ 665.622.43

ҒТАХР 61.51.17

DOI: [10.54859/kjogi108904](https://doi.org/10.54859/kjogi108904)

Қабылданды: 02.08.2025.

Мақұлданды: 17.11.2025.

Жарияланды: 31.12.2025.

Ғылыми шолу

Мұнай өңдеудегі дезэмульгаторлардың маңызы мен қолданудың тиімді әдістеріне шолу

А.Н. Мұқамбетқалиева, М.Д. Бисенғалиев, К.А. Ихсанов

Сафи Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті, Атырау қаласы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Қазақстан мұнай-газ өнеркәсібінің қазіргі даму кезеңінің ерекшелігі – көптеген ірі мұнай кен орындарының өндіру деңгейінің құлдырау сатысына көшуі болып табылады. Тұтқырлығы жоғары мұнай кен орындарын игерудің өзіндік ерекшеліктері бар және бұл мұнай компаниялары жиі кездесетін бірқатар мәселелерге әкеледі. Ең алдымен, бұларға мұнай-өндірістік жабдықты пайдаланудағы қиындықтар, жерүсті және ұңғы жабдықтарының жөндеусіз пайдалану мерзімінің қысқаруы, жүктеменің артуына байланысты апаттар санының көбеюі, ұңғыларды пайдаланудың төмен үнемділігі, ілеспе мұнай газын ұтымды пайдалану мен қайта өңдеу мәселелері жатады. Нәтижесінде, кен орындарын игеру мен пайдаланудың экономикалық тиімділігі барынша төмен деңгейге жетеді. Қазіргі уақытқа дейін эмульсиялау және оның механизмдерін зерттеуге бағытталған көптеген ғылыми жұмыстар жүргізілді. Тұрақты эмульсиялар өнеркәсіпте, әсіресе тазарту, тасымалдау және қайта өңдеу процестерінде, техникалық әрі экономикалық жағынан елеулі мәселелер туындатады. Көмірсутектерді тиімді өндіру үшін шикізатты сапалы өңдеу қажет. Бұл мақалада мұнай эмульсияларының түзілуі, дезэмульгаторлық өңдеу әдістері, осы мақсатқа сәйкес келетін дезэмульгаторлардың қасиеттері, сондай-ақ эмульсиялардың пайда болу механизмдері бойынша жарияланған ғылыми еңбектерге шолу жасалған. Шикі мұнай табиғи беттік белсенді заттармен (бұдан әрі – ББЗ) өзара әрекеттесіп, тұрақты эмульсиялар түзуге бейім келеді. Мұндай тұрақты эмульсиялар өнеркәсіп талаптарына сай келуі үшін мұқият өңдеуден өтуі қажет. Сондықтан эмульсия тұрақтылығына әсер ететін табиғи ББЗ-ға қатысты іргелі зерттеулер жүргізу – мұнай мен суды тиімді бөлу үшін маңызды. Бұл жұмыс эмульсиялау механизмдерінің өртүрлі ғылыми жарияланымдарын бағалауды және тиімді дезэмульгирлеуге арналған дұрыс формуланы таңдауды қамтиды.

Негізгі сөздер: мұнай эмульсиясы, композициялық құрамдар, бұзу әдістері, дезэмульгаторлар, химиялық реагенттер.

Дәйексөз келтіру үшін:

Мұқамбетқалиева А.Н., Бисенғалиев М.Д., Ихсанов К.А. Мұнай өңдеудегі дезэмульгаторлардың маңызы мен қолданудың тиімді әдістеріне шолу // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы. 2025. 7 том, №4, 72–90 б. DOI: [10.54859/kjogi108904](https://doi.org/10.54859/kjogi108904).

UDC 665.622.43
CSCSTI 61.51.17

DOI: [10.54859/kjogi108904](https://doi.org/10.54859/kjogi108904)

Received: 02.08.2025.

Accepted: 17.11.2025.

Published: 31.12.2025.

Review article

Demulsifiers in Petroleum Processing: Overview and Effective Application Methods

Ainash N. Mukambetkaliyeva, Max D. Bissengaliyev, Kayrbek A. Ikhsanov

Atyrau University of Oil and Gas named after Safi Utebayeva, Atyrau, Kazakhstan

ABSTRACT

Many of Kazakhstan's major oil fields are now entering a phase of declining production, marking a new stage in the country's oil and gas industry development. The development of heavy-oil reservoirs presents several well-recognized challenges for oil producers. These include equipment performance issues, shorter operating life of surface and downhole systems, higher failure rates under increased loads, low well productivity, and persistent difficulties in utilizing associated gas. Collectively, these factors severely undermine the overall profitability of field development and production. A wide range of studies has explored the mechanisms of emulsification and demulsification. Stable emulsions create both technical and economic challenges for the industry, particularly in treatment, refining, and transportation operations. Addressing them effectively is crucial for maintaining efficient hydrocarbon production. This paper discusses the formation of crude-oil emulsions, approaches to their demulsification, properties of suitable demulsifiers, and the mechanisms governing emulsion formation. Crude oil contains natural surface-active compounds that readily promote the formation of stable emulsions. To meet industrial standards, these emulsions must undergo thorough treatment. Understanding the role of natural surfactants that enhance emulsion stability is therefore key to achieving effective oil–water separation. The review also considers various published mechanisms of emulsification and identifies the formulations most effective for demulsification.

Keywords: *crude-oil emulsion; composite formulations; demulsification methods; demulsifiers; chemical reagents.*

To cite this article:

Mukambetkaliyeva AN, Bissengaliyev MD, Ikhsanov KA. Demulsifiers in Petroleum Processing: Overview and Effective Application Methods. *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2025;7(4):72–90.

DOI: [10.54859/kjogi108904](https://doi.org/10.54859/kjogi108904).

УДК 665.622.43
МРНТИ 61.51.17

DOI: [10.54859/kjogi108904](https://doi.org/10.54859/kjogi108904)

Получена: 02.08.2025.
Одобрена: 17.11.2025.
Опубликована: 31.12.2025.

Научный обзор

Обзор использования деэмульгаторов в нефтепереработке и эффективные методы их применения

А.Н. Мукамбеткалиева, М.Д. Бисенгалиев, К.А. Ихсанов

Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева, г. Атырау, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Характерной особенностью современного этапа развития нефтяной и газовой промышленности Казахстана является переход многих разрабатываемых крупных нефтяных месторождений на стадию падающей добычи. Особенности разработки месторождений высоковязкой нефти обуславливают ряд распространённых проблем, с которыми сталкиваются нефтяные компании. Прежде всего, к ним относятся осложнения эксплуатации нефтепромыслового оборудования, снижение межремонтного периода эксплуатации наземного и скважинного оборудования, аварийность оборудования из-за роста нагрузок, низкая рентабельность эксплуатации скважин, проблемы утилизации и рационального использования попутного нефтяного газа и, как следствие, предельно низкая рентабельность освоения и эксплуатации месторождения. До сегодняшнего дня проводились многочисленные исследования для изучения механизмов эмульгирования и деэмульгирования. Устойчивые эмульсии оказывают как техническое, так и экономическое воздействие на отрасль, особенно в сфере очистных сооружений, переработки и транспортировки. Эффективная обработка необходима для обеспечения оптимального производства углеводородов. В настоящей статье рассматриваются образование нефтяных эмульсий, деэмульгирующая обработка, характеристики подходящих для данной цели деэмульгаторов, а также механизмы образования нефтяных эмульсий. Сырая нефть сочетается с природными поверхностно-активными веществами, имеющими высокую тенденцию к образованию стабильной эмульсии. Стабильная эмульсия должна быть хорошо обработана для соответствия промышленным требованиям. Поэтому фундаментальные исследования природных поверхностно-активных веществ, способствующих стабильности эмульсий, проводятся с целью эффективного разделения нефти и воды. Это будет включать оценку различных опубликованных механизмов эмульгирования и правильную формулу для эффективной деэмульгации.

Ключевые слова: *нефтяная эмульсия, композиционные составы, методы разрушения, деэмульгаторы, химические реагенты.*

Как цитировать:

Мукамбеткалиева А.Н., Бисенгалиев М.Д., Ихсанов К.А. Обзор значения деэмульгаторов в нефтепереработке и эффективных методов их применения // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2025. Том 7, №4. С. 72–90. DOI: [10.54859/kjogi108904](https://doi.org/10.54859/kjogi108904).

Кіріспе

Қазақстанда мұнай кен орындарын игерудің қазіргі кезеңі – олардың кешенді, кешігіп дамуы жағдайында – мұнай өндірі көлемін тұрақтандыру мен ұлғайтуға бағытталған ең тиімді технологиялық шараларды үнемі іздестірумен сипатталады. Бұл бағытта, атап айтқанда, жоғары тұтқырлықтағы мұнай қорына ие шағын кен орындарын игеруге тарту маңызды орын алады. Алайда мұндай кен орындарын игеру түрлі технологиялық қиындықтармен ерекшеленеді және нәтижесінде бірлік өнімге жұмсалатын энергия шығындарының артуына әкеледі. Мұнай өндіру, жинау және ұңғы өнімін дайындау жүйесінде мұнай-өндірістік жабдықтарды пайдалануда кездесетін мәселелерге көптеген ғылыми еңбектер арналған. Әсіресе тұтқырлығы жоғары мұнай өндіретін шағын кен орындарын пайдалану барысында жиі кездесетін мәселелерге – асфальтен-шайыр-парафин шөгінділері түзілуі, жоғары тұтқыр эмульсиялардың пайда болуы, ұңғы жабдықтарының коррозиясы және механикалық қоспалардың сорап жабдығына әсері жатады. Аталған және өзге де факторлардың кешенді әсері ұңғылардың дебитінің төмендеуіне, жабдықтың тозуының жеделдеуіне, сондай-ақ мұнайды өндіру, жинау және дайындау процестерінде қосымша энергиялық және материалдық шығындардың артуына алып келеді. Осындай мәселелер ұңғыларды пайдаланудың техникалық-экономикалық көрсеткіштерінің нашарлауына, кен орнының игеру жүйесінің бұзылуына, ұңғылар торының сиректеуіне (жекелеген ұңғылардың тоқтауына байланысты), объектіні игеру үдерісін бақылау тиімділігінің төмендеуіне және ақыр соңында мұнай қорын өндіру коэффициентінің төмендеуіне себеп болады. Төменде бұл мәселелердің негізгі себептері, олардың түзілу механизмдері және олармен күресудің дәстүрлі әдістері қарастырылған.

Қабат жағдайларында мұнай мен су бір-бірімен араласпайтын бөлек фазалар түрінде орналасады. Кен орындарын игерудің кеш сатысында жұмыс істейтін мұнай ұңғыларында қабат суларының мұнай кенінің сүзу аймағына қарай басып кіруі (суу фронтының ілгерілеуі) байқалады. Мұнай эмульсиялары негізінен мұнай мен қабат суының қарқынды жанасып, араласуы жүретін жерлерде түзіледі:

- ұңғы түбінен аузына дейін көтерілу кезінде, мұнда мұнай мен қабат суы үздіксіз өзгеріп отыратын термобарлық жағдайларға байланысты фазалық түрленулерге ұшырайды, нәтижесінде мұнай құрамынан еріген газдар мен парафиндер бөлінеді [1];

- ұңғы оқпанында, мұнда газдың бөлінуі нәтижесінде қысым төмендеп, мұнай мен су фазаларының араласу интенсивтілігі артады, сондай-ақ қабат өнімінің қозғалыс жылдамдығы жоғарылайды. Газ соншалықты жоғары энергиямен бөлінеді, бұл энергия қабат суын мұнайда диспергирлеуге жеткілікті;

- сораптардың қозғалмалы бөліктерінде, штуцерлер мен жапқыш арматураларда. Эмуль-

сиялардың қарқынды түзілуі, әсіресе суланған мұнай штуцерлер арқылы өткен кезде байқалады; – өндірістік жабдықтарда қысымның ауытқуы, газдың пульсациясы, технологиялық құбырлардың диаметрі мен бағытының күрт өзгеруі кезінде пайдалану ұңғыларының газ-сұйық ағынында турбулизация жүреді, бұл өз кезегінде қабат суының мұнайда диспергирленуін күшейтеді. Бұған қоса, технологиялық жабдықтардың ішкі бетінде парафиннің тұнуы құбырлардың көлденең қимасының тарылуына әкеледі, ал бұл қабат өнімінің қозғалыс жылдамдығының артуына себеп болады.

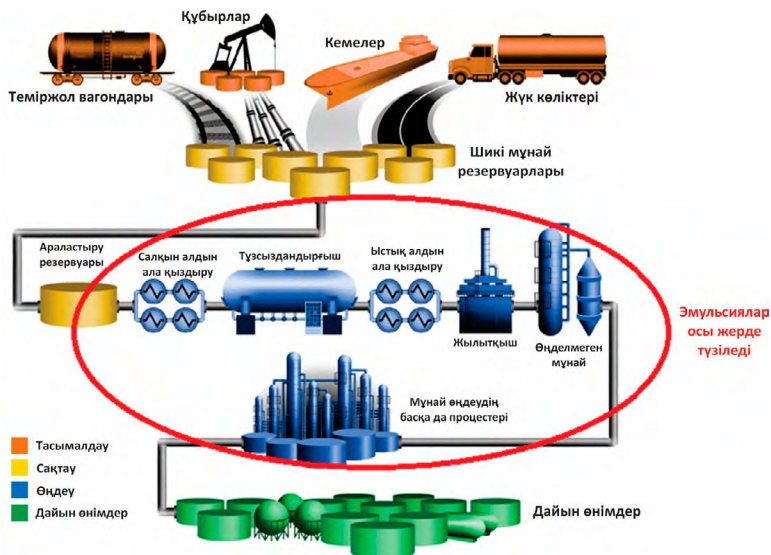
Сонымен қатар, мұнай өндіру саласында құбырлардағы эмульсия түзілуі – өте жиі кездесетін құбылыс. Мұнай кен орнының жұмыс істеу мерзімі аяқтала бастаған сайын, өндірілетін судың мөлшері де артады, әсіресе егер кен орны су қабатымен (аквифер) жұмыс істегенде. Бастапқыда шикі мұнай мен су екі бөлек фазада болса да, ұңғыманың ішінде, саңылауларда, клапандарда, сорғыларда және құбырларда болатын турбуленттік ағын, араласу және шайқалу эмульсиялардың түзілуіне әкеледі. 1-суретте мұнайды өңдеу процесінде эмульсиялардың қай жерде түзілетіні көрсетілген [1].

1-суретте мұнайды өңдеу процесінің диаграммасы ұсынылған, бұл схема Shale Oil Processing (2014) деректеріне негізделіп өзгертілген. Онда шикі мұнай ұңғыма сағасынан бастап құбырға дейінгі жолда қандай сатылардан өтетіні және осы сатылардың қайсысында мұнай-сулы эмульсиялардың түзілетіні көрсетілген.

Мамандардың [2] зерттеулері бойынша, қабаттың ұңғы маңындағы аймағы тұрақты су-мұнай эмульсияларының түзілуі сұйықтықтың сүзгіленуі нәтижесінде, тау жынысында ұсақталған құм мен сазды бөлшектердің болуына байланысты жүзеге асады. Механизацияланған мұнай өндіру әдісі кезінде тұрақты су-мұнай эмульсияларының түзілуі анықталды. Электроцентробеждік сорғылар қолданылған кезде ең тұрақты су-мұнай эмульсиялары қалыптасса, шангалы және бұрандалы сорғыларды пайдалану кезінде эмульсиялар әлдеқайда аз тұрақты болады. Сондықтан, қабат суымен диспергирлеуге жоғары бейімділігі бар тұтқыр асфальт-шайырлы мұнайларды өндіру үшін жоғары өнімді бұрандалы сорғыларды қолдану тиімді болып табылады.

Ғылыми жұмыстарда [1–3] мұнайды тереңдік сорғыларымен өндіру кезінде су-мұнай эмульсияларының түзілуінің негізгі себептері ретінде сорғы жұмысының негізгі параметрлері анықталды: электроцентробеждік сорғының айналу саны мен өнімділігі, плунжердің соққы саны мен ұзындығы, қабылдау және шығару клапандарының өлшемдері, сорғының бату тереңдігі.

Фонтандық ұңғыларда тұрақты су-мұнай эмульсиялары түзіледі, себебі осы ұңғыларда қысымның төмендеуі мен мұнайдың қарқынды дегазациясы нәтижесінде қабат суы мен өндіру мұнайы қарқынды араласады. Компрессорлық ұңғылардан мұнай өндіру кезінде де су-мұнай



1-сурет. Шикі мұнайды өңдеу процесінің схемасы
Figure 1. Crude-oil refining process flow diagram

эмульсияларының түзілу себептері фонтандық ұңғылардағыдай болады. Газлифт және эрлифт әдістерін қолдану нәтижесінде табиғи тұрақтандырғыштардың (нафтен қышқылдары, парафиндер) қарқынды тотығуы жүреді, бұл жоғары тұрақты су-мұнай эмульсияларының түзілуіне алып келеді, себебі олар эмульсиялардың тиімді эмульгаторлары болып табылады.

Скважиналарда су-мұнай эмульсияларының фазааралық құрылымдары және олардың тұрақтануына әсер ететін физика-химиялық факторлар

Әдебиет [4] бойынша су-мұнай эмульсияларының түзілу механизміне қатысты көптеген гипотезалардың бар екенін көрсетті, бірақ негізгі теория академик Ребиндер П.А. ұсынған қысым болып табылады. Бұл теорияға сәйкес эмульсиялардың түзілуі үш кезеңнен тұрады.

Бірінші кезеңде дисперсті фазаның тамшылары бастапқы сфералық пішіннен цилиндрлік пішінге дейін созылады, бұл дисперсті фазаның бетін ұлғайтуға байланысты молекулалық беттік керілу күштерін жеңу үшін энергия жұмсауды қажет етеді. Екінші кезеңде тұрақсыз тамшылардың ұзындығы олардың диаметрінен үлкен болғанда, олар ұсақ тамшыларға бөлінеді. Осы процесс барысында беттік және еркін беткі энергияның азаюы жүреді. Үшінші кезеңде су глобулдарының коалесценциясы мен диспергиясы үдерістері бір уақытта жүреді.

Су-мұнай эмульсияларының жоғары агрегативті тұрақтылығы және дисперстік ортаның молекулаларынан тұратын берік сольватты қабықтың глобулалардың бетінде түзілуі сольваттық теориямен түсіндіріледі. Сольваттық қабықтың серпімді қасиеттеріне байланысты дисперстік фазаның глобулаларының соқтығысқан кезде бірігуіне ке-

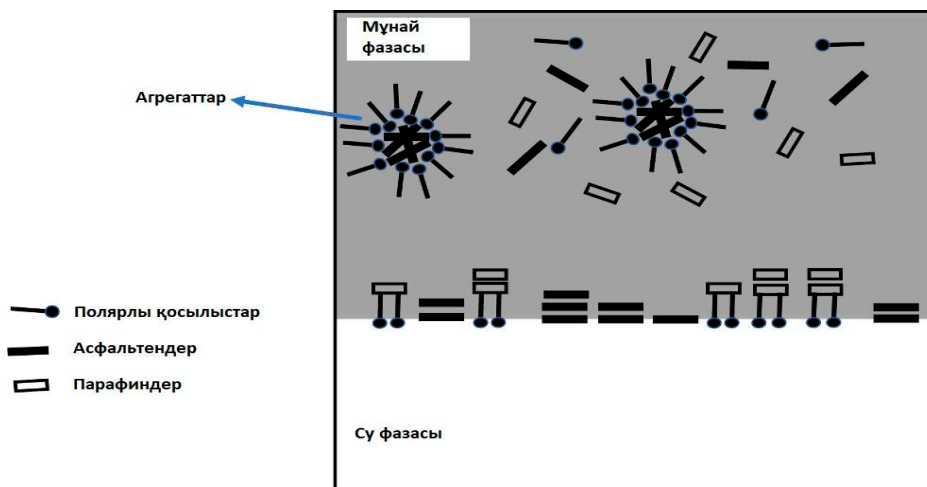
дергі жасалады, сондай-ақ сольваттық қабық пен дисперстік ортаның шекарасында беттік керілу болмауы да әсер етеді. Сольваттық қабықтың құрылысы мен құрамы мұнайдың құрамына және онда болатын дисперстік бөлшектердің мөлшеріне ғана емес, сонымен қатар қабат суының құрамына және онда еріген және диспергенттелген бөлшектерге де байланысты [5].

Тұрақты эмульсиялық жүйелердің түзілуінің негізінде термодинамикалық (энергетикалық) күштер жатады, олар екі электрлік қабат теориясы, Дерягин В.Б. және Ландау Л.Д. ұсынған қысымның ажырату теориясы, сондай-ақ құрылымдық-механикалық бөгеттің түзілуіне қатысты надмолекулярлық теориялар негізінде түсіндіріледі [6]. Осы теориялардың ортақтығы – эмульсияларды түзу үшін араласпайтын екі сұйықтыққа тұрақтандырғыш қызметін атқаратын үшінші компоненттің болуы міндетті.

Мұнай фазасында органикалық көмірсутекті және механикалық тұрақтандырғыштардың болуы, олардың мұнай қабатына химиялық әсер ету нәтижесінде түзілуі және ұңғы өнімдерімен бірге қабаттан шығарылуы су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығын арттырады. Ғылыми еңбектерде [7] тұрақты су-мұнай эмульсияларының түзілуіне келесі компоненттердің қатысатыны анықталған:

– күшті беттік-белсенді қасиеттерге ие заттар, олар фаза аралық шекарада адсорбцияланып, құрылымдалмаған молекулалық қабаттар түзе алады. Мұндай заттарға нафтен қышқылдары, май қышқылдары және төмен молекулалық шайырлар жатады;

– әлсіз беттік-белсенді қасиеттері бар заттар, олар фаза аралық шекарада құрылымды қабаттар – лиофильді коллоидты жүйелер түзіп, серпімділігі мен беріктігі арқасында су-мұнай



2-сурет. Мұнай-су шекарасындағы асфальтен мен парафиндердің агрегациясы және адсорбциясы

Figure 2. Aggregation and adsorption of asphaltenes and paraffins at the oil-water interface

эмульсияларын жоғары деңгейде тұрақтандырады. Бұл заттарға мұнай құрамындағы полярлы компоненттер – асфальтендер, шайырлар, асфальтоген қышқылдары мен ангидридтер жатады;

– минералдық және бейорганикалық сипаттағы механикалық қоспалар, олар судың глобулаларын таңдамалы ылғалдандыру арқылы қорғайтын берік қаптамалар түзеді. Бұл жағдайда қатты эмульгатор-бөлшектердің өлшемдері диспергирленген су глобулаларының өлшемінен әлдеқайда кіші болуы қажет.

Мұнай эмульсияларының тұрақтылығына тек тұрақтандырғыштардың концентрациясы ғана емес, сонымен қатар олардың коллоидтық күйі де айтарлықтай әсер етеді. Бұл жағдай мұнай құрамындағы парафинді және ароматты көмірсутектердің мөлшеріне, сондай-ақ дефлокуляциялық әсері бар заттардың болуына байланысты болады.

Зерттеулерде [8] фазааралық адсорбциялық қабаттың құрамы мен қасиеттері зерттеліп, асфальтендер, шайырлар және қиын балқитын парафиндер әрқашан «мұнай – су» шекарасында түзілетін фазааралық адсорбциялық қабаттың құрамына кіретіні анықталды (2-сурет). Мұнайдың эмульгирлеу қасиеттері ондағы асфальтендердің тек сандық мөлшерімен ғана емес, олардың коллоидты-дисперстік күйімен де анықталады. Асфальтендер флокуляция нүктесіне (ерітіндіден тұнбаға түсу шегіне) жақын коллоидты-дисперстік күйде болғанда, олардың эмульгирлеу әсері барынша жоғары болады. Асфальтендердің күйі олардың көмірсутектік құрамына және дефлокуляциялық әсері бар заттардың болуына байланысты, бұл заттар асфальтендердің бірігуіне және агрегациясына кедергі келтіреді.

Соңғы жылдары көптеген зерттеушілер [9] су-мұнай эмульсияларының негізгі тұрақтандырғыштары ретінде мұнайда ұсақ диспергирленген, мицеллярлық күйде болатын табиғи асфальтен-шайырлы заттарды (бұдан әрі – АШЗ) қарастырады. АШЗ коллоидтық бөлшектері мицеллалар түзіп, «мұнай – су» фазаларының шекарасында жинақталып, судың глобулаларының бетінде берік фазааралық адсорбциялық қабықша түзеді, бұл глобулалар дисперстік фазаның бүкіл көлеміне таралады. Су-мұнай эмульсияларының дисперстік дәрежесі мұнай компоненттерінің, әсіресе полиадролық арендер мен гетероорганикалық қосылыстардың (әсіресе АШЗ) арасындағы күшті молекулааралық әрекеттесулермен түсіндіріледі.

Зерттеуде [10] су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығына асфальтендердің әсері жөніндегі ғылыми әдебиеттерге талдау жасалды. Нәтижесінде, эмульсия тұрақтылығы мұнай құрамындағы асфальтендердің пайыздық мөлшеріне байланысты екені анықталды.

Авторлар [11] су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығын қамтамасыз ететін негізгі компоненттер ретінде АШЗ мен парафиндерді атап өтті. Сонымен қатар, су глобулаларының фазааралық адсорбциялық қабаттарының құрамы қабат суының минералдануына байланысты өзгеретіні зерттелді. Қабат суының минералдануы артқан сайын су глобулаларының қорғаныш қабығындағы АШЗ үлесі де артады. Бұл құбылыс қабат суындағы тұздардың полярлы асфальтен молекулаларымен әрекеттесуінен туындайды. Қабат суының мөлшері 30%-ға дейін жеткен кезде эмульсия тұрақтылығы шамалы ғана артады, ал одан кейін сулану өскен сайын эмульсия тұрақтылығы күрт өсіп, максимум мәнге жетеді. Бірақ қабат суының мөлшері одан әрі артқанда эмульсия тұрақтылығы ұлғаймайды.

Зерттеулерде [12] мұнайда диспергирленген қабат суының минералдануы артқан сайын су глобулаларының өлшемі кішірейіп, дисперстілік дәрежесі мен фазааралық бетінің ауданы ұлғайып, нәтижесінде су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығы да артады.

Су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығын қамтамасыз ететін басты фактор – мұнай фазасы жағынан мұнайда диспергирленген су глобулаларының бетінде түзілетін берік фазааралық адсорбциялық қабық. Бұл қабық құрылымды жүйе ретінде қарастырылып, оның құрамына табиғи тұрақтандырғыштар – нафтен қышқылдары, шайырлар, асфальтендер, парафиндер, церезиндер, порфириндер, металл-порфирин кешендері және механикалық бөлшектер кіреді.

Мұнайдағы асфальтен-шайырлы және парафинді қосылыстардың су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығына әсері

Ұңғы өнімінде механикалық қоспалардың едәуір мөлшерде пайда болуы, пласт қысымын ұстап тұру жүйесі арқылы құрамында оттегі бар тұщы суды айдау нәтижесінде орын алады. Сонымен қатар, тұщы суда оттегінің болуы кейбір мұнай компоненттерінің (нафтендер, парафиндер) тотығуына алып келеді, нәтижесінде жаңа асфальтендер түзіледі.

Су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығына механикалық бөлшектер (табиғи тұрақтандырғыштар) – саз бөлшектері, құм, бейорганикалық тұздардың микрокристалдары, металл коррозиясының өнімдері айтарлықтай әсер етеді. Эмульсиялардың тұрақтылығы мұнай құрамындағы осы табиғи тұрақтандырғыштардың бөлшектерінің өлшемі мен сандық мөлшеріне байланысты болады. Механикалық қоспа бөлшектерінің мөлшері мен концентрациясы артқан сайын су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығы жоғарылайтыны байқалады.

Жоғары минералданған қабат суларында саз бөлшектері жылдам коагуляцияға және гидрофобизацияға ұшырайды, ал тұщы суларда сілтілік электролиттердің болуымен саздардың гидрофильдігі артып, олар қатты ісініп, пептизацияға ұшырайды. Соның нәтижесінде саз бөлшектері коллоидтық күйге көшіп, мұнай фазасында механикалық қоспа бөлшектерінің мөлшерінің артуына алып келеді.

Авторлар [13] «мұнай – су» фазалар шекарасында асфальтен агрегаттарынан тұратын фазааралық адсорбциялық қабықтарды модельдеді. Бұл бөлшектер фазалар шекарасында жоғары серпімділік модулі бар қатты құрылымдық қаңқа түзеді. Сонымен қатар, дезэмульгаторды қолдану мен қолданбау жағдайларында түзілген қабаттардың механикалық беріктігі бағаланды.

Зерттеулер [14] көрсеткендей, өлшемі 0,75 мкм болатын механикалық бөлшектердің болуы су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығын ең жоғарғы деңгейде қамтамасыз етеді. Мұндай

дисперстік бөлшектерге фазалар шекарасында су глобулаларының бетінде ассоциациялану және агрегаттану қасиеті тән.

Мұнайдағы асфальтендер мен парафин микрокристалдарының өзі ғана эмульсияны тұрақтандыру үшін жеткіліксіз, өйткені олардың тұрақтылығын арттыру үшін мұнай ББЗ болуы қажет. Бұл ББЗ-тар асфальтен мен парафин бөлшектерінің бетіне адсорбцияланып, гидрофильді аймақтар түзеді. Бұл аймақтар судың сіңірілуі арқылы бөлшектердің су глобулаларының бетінде шоғырлануына және орнығуына мүмкіндік береді.

Мұнай құрамындағы жеке компоненттердің су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығына әсері әртүрлі. Мысалы, парафиндік компоненттердің әсері асфальт-шайырлы компоненттерге қарағанда әлдеқайда жоғары. Парафин микрокристалдары су глобулаларының бетіндегі фазааралық адсорбциялық қабыққа дезэмульгатордың әсеріне төзімділік береді. «Мұнай – су» шекарасындағы адсорбциялық қабаттың құрамдас бөлігі болып табылатын АШЗ парафин молекулаларының өзара және олардың су глобулаларының бетімен байланысын қамтамасыз етеді. Төмен температурада су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығын негізінен парафин компоненттері қамтамасыз етеді, ал жоғары температурада парафиндер еріген күйде болатындықтан, асфальт-шайырлы компоненттер шешуші рөл атқарады.

Зерттеулер [14] көрсеткендей, су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығы мұнайдағы АШЗ-ның дисперстік бөлшектер бетіне адсорбциясына да байланысты. Егер мұнай құрамындағы АШЗ концентрациясы 10–30 масс.% аралығында болса, эмульсия тұрақтылығы күрт артады, ал 30 масс.%-дан жоғары болғанда – тұрақтылық төмендей бастайды. Бұл құбылыс АШЗ-ның бөлшектер бетінде адсорбциялық қабат түзу барысында гидрофобты және гидрофильді аймақтардың арасындағы тепе-теңдіктің бұзылуымен түсіндіріледі.

Зерттеу жұмысында [15] масс-спектрометрияның түрлі әдістерін қолдана отырып, нафтен қышқылдарының асфальтендердің ірі молекулаларының (көп ароматты сақиналары бар) агрегатталуына жол бермейтіні анықталды. Бұл әсер нафтен қышқылдарының полярлы молекулалары мен асфальтен агрегаттары арасындағы дипольдік әрекеттесулер арқылы жүзеге асады.

Ғылыми [16] жұмысында асфальтен молекулалары агрегаттарының әртүрлі синтетикалық және табиғи нафтен қышқылдарымен әрекеттесу барысында дезинтеграциялану үрдісі сипатталғау. Нафтен қышқылдарын қосқаннан кейін уақыт өте келе асфальтен агрегаттарының өлшемі тез азаятыны анықталған.

Мақала [17] азот құрамдас асфальтендер мен нафтен қышқылдарының «қышқыл – негіз» типіндегі комплекстер түзе алатыны анықталған. Мұндай комплекстер фазааралық «мұнай – су» шекарасына жақын коллоидты жүйелер мен ірі

агрегаттардың түзілуіне жоғары белсенділік көрсетеді.

Бірқатар зерттеулерде нафтен қышқылдарының мұнайдағы коллоидтық жүйелермен және механикалық бөлшектермен иондық байланыс, қышқыл – негіз өзара әрекеттесуі және полярлық өзара байланыс механизмдері арқылы әрекеттесуге қабілетті екені дәлелденген. Бұл жағдай коллоидтық бөлшектердің гидрофобизациясына алып келеді, нәтижесінде олар жер асты флюидтерінің мұнай фазасында шоғырланады.

Нафтен қышқылдарынан басқа, мұнай құрамында олардың тұздары мен эфирлері – нафтенаттар да болады. [16] жұмысында нафтенаттардың сұйық кристалдық фазаға өтуі кезінде су-мұнай эмульсиясының тұрақтылығының артаыны көрсетілген. Бұл құбылыс авторлармен фазалар шекарасында сұйық кристалдық қабаттың түзілуімен түсіндіріледі.

Тұрақты су-мұнай эмульсияларының түзілуінде мұнайда еріген газдың маңызды рөл атқаратыны анықталған. Егер мұнайдың қысымы оның құрамындағы еріген газдардың қысымына жақындаса, онда сорбцияланған газдың бір бөлігі бос фазаға бөлініп шығып, нәтижесінде мұнайдағы жоғары молекулалық қосылыстардың (бұдан әрі – ЖМҚ) тұнуын туындатады. Осындай үдерістер бос газды барботажды кезінде де орын алады. Авторлардың [17] зерттеулері бойынша ЖМҚ не сұйық фазада болуы мүмкін, не газ көпіршіктерінің айналасында қорғаныш қабықшалардың құрамына енеді. Мұнайдан бөлініп шықпас бұрын ЖМҚ бөлшектері газ фазасының микрокөпіршіктерімен флотирленеді.

Сұйық көмірсутектер мен қабаттық судың араласуы кезінде мұнайда еріген газ сорбцияланған күйге өтеді және мұнайдың дегазациясы жүреді, бұл ретте сорбцияланған газдың бір бөлігі мұнай эмульсиясының су фазасының газсыздануына жұмсалады. Екінші жағынан, мұнайдың дегазациясы жүйе компоненттерінің диспергирленуін күшейтеді, мұнда көптеген газ көпіршіктері түзіледі, олар ЖМҚ бөлшектерімен және механикалық қоспалармен тұрақтандырылады. Егер газға қаныққан мұнай қабаттық сумен жанасса немесе өнімді мұнай қабатына газ фазасы бұзылып кірсе, онда су-мұнай эмульсиясының фазаларының ауысуы орын алады, бұл мұнай мен қабаттық судың қарқынды араласуына алып келеді.

Осылайша, мұнайда еріген газ мұнай мен судың фазаларының қарқынды араласуы нәтижесінде, сондай-ақ ЖМҚ бөлшектерінің, бейорганикалық тұздар кристалдарының және механикалық қоспалардың мұнайда диспергирленген су глобулаларының бетінде қорғаныш қабықша құрамына тартылуы нәтижесінде эмульсиялардың тұрақтылығын арттырады.

Уақыт өте келе «мұнай – су» шекарасындағы межфазалық адсорбциялық қабат қалыңдап, тығыздалып, кейіннен гельге айналады, бұл су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығын ай-

тарлықтай арттырады. Бұл құбылыс синерезис (эмульсиялардың қартаюуы) деп аталады. Асфальтендер мен шайырлы компоненттер басым болатын эмульсиялардың қартаюу үдерісі баяу жүреді, бұл кезде адсорбция мен тұрақтандырығыштардың құрамы тұрақты деңгейде қалады. Ал парафиндік компоненттері бар эмульсияларда қартаюу процесі әлдеқайда жылдам өтеді, өйткені тұрақтандырығыштың жалпы адсорбциясы артады. Осы құбылысты ескере отырып, су-мұнай эмульсияларын деэмульгатормен бірден өндіру кезінде немесе өндіру барысында реагентті үздіксіз мөлшерлеу арқылы өңдеу тиімді, өйткені бұл кезде фазалар шекарасында эмульгатор молекулаларының адсорбциялану уақыты барынша аз болады.

Аралық қабаттағы тұрақты су-мұнай эмульсияларының түзілу ерекшеліктері

Аралық эмульсиялық қабаттардың қалыптасуына әсер ететін динамикалық және құрылымдық факторлар

Қабаттық судың өнімге араласуының артуымен және жөндеу жұмыстары мен мұнай өндіруді интенсификациялау үшін қолданылатын химиялық реагенттердің көлемінің ұлғаюуы нәтижесінде кеш даму сатысындағы мұнай кен орындарында мұнайды дайындау қондырғысына түсетін су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығы артып, мұнайды жинау мен дайындау технологиялық процестері күрделенеді. Мұнайды дайындау қондырғысы жұмысы кезінде енгізілген шикі мұнайдан ерекшеленетін қасиеттері бар эмульсиялардың пайда болуы міндетті түрде – бұл көп сатылы эмульсиялар, «тұзатқық мұнайлар», аралық қабат эмульсиялары, мұнай-шлама сияқты қоспаларды қамтиды.

Аралық эмульсиялық қабат – су-мұнай эмульсиясын бөлу үдерісінде пайда болатын және кез келген тұндыру аппараты ішінде кездесетін қабат болып табылады. Ол пайда болу және жойылу үдерістері арасындағы динамикалық тепе-теңдік жағдайында қалыптасады. Қазіргі кезде мұндай гидродинамикалық эмульсиялық жүйелердің әрекет етуін сипаттайтын адекватты модельдер жоқ.

Аралық қабаттың кинетикасы мен қасиеттеріне термохимиялық және гидродинамикалық әдістердің әсер етеді. Химиялық реагенттерді қолдану нәтижесінде су-мұнай эмульсияларын бұзу кезінде табиғи эмульгаторлар мен тұрақтандырығыштар қорғаушы фазаралық адсорбциялық қабаттан мұнай немесе су фазасына ығысады. Олар еріген немесе коллоидты-дисперстік күйде болуы мүмкін. Деэмульгаторлардың селективті әсері нәтижесінде кейбір тұрақтандырығыштар (табиғи ББЗ) судың глобулаларының беткі қабатынан мұнайға, ал басқа элементтер су немесе мұнай фазаға өтіп, гидрофобты не гидрофильді болады. Фазалар шекарасында табиғи тұрақтандырығыштардың жиналуы – аралық эмульсиялық қабаттардың түзілуіне себеп болады.

Авторы [18] пікірінше, аралық қабат эмульсиясы – бұл эмульсияның тұрақтандырғыш бөлшектері адсорбцияланып тұрған су глобулаларынан тұратын көп сатылы эмульсия. Жұмыс [18] аралық қабат эмульсиясы «мұнай – су» дисперсиялық орталар шекарасындағы фазааралық беткі катармен бөлінген екі жоғары қабат – кері және тік эмульсия ретінде сипатталады. Аралық қабат эмульсиясының тұндыру аппараттарында түзілуі авторлар тарапынан сипатталған. Аппаратқа кіретін кері мұнай эмульсиясы су фазасында үзіліп, ішіндегі су тамшаларын қамтитын ірі мұнай тамшалары түзіледі, олар тез бетке көтеріліп, тығыз қабатпен тоқтайды. Су ортасында қалыптасқан мұндай ірі локальды мұнай тамшалары су тамшаларын қамти отырып, аралық қабаттың төменгі шекарасын құрайтын тік көп сатылы эмульсияның төменгі қабатын түзеді.

Судың кішігірім глобулаларын қамтитын кері эмульсия қабаты аралық қабаттың жоғарғы шекарасын құрайтын мұнай фазасы жағынан жоғарғы кері эмульсия қабатын қалыптастырады. Төменгі қабат – эмульсияның ең тығыз, мұнай глобулаларының тығыз орналасқан аймағы болып табылады, оның көлемі аралық қабаттың жалпы биіктігінің 10%-нан аспайды, ал судағы су мөлшері осы қабатта 40-60% дейін жетеді. Міне, осы қабатта эмульсияның су фазасымен жанасуы нәтижесінде су глобулаларының қарқынды коалесценциясы арқылы эмульсияның жеке фазаларға бөлінуі жүреді.

Кейбір авторлар [19] жоғарғы қабатты «теңестіруші» деп атайды, мұнда төменгі шекарада су мөлшері 30–60% аралығында өзгеріп, жоғарғы шекарада су мөлшері күрт төмендейді. Осы қабатта кейбір тамшылардың коалесценциясы болып, олардың өлшемдері критикалық мәнге жетіп, олар дисперстік фазаның қарсы ағысында шөгуі мүмкін.

Аралық қабат биіктігі оған түсетін су мөлшері мен фазааралық бетте коалесценцияға түскен су мөлшеріне теңескенге дейін арта береді. Аралық қабаттың биіктігінің шикі материалдың су құрамына тәуелділігі экстремалды сипатқа ие. Су құрамының төмен кезінде су глобулалары арасындағы қашықтық үлкен және аралық қабаттың тығыздығы төмен болғандықтан, тамшылардың және фазааралық бетпен глобулалардың коалесценция жылдамдығы төмен болады. Соның нәтижесінде аралық қабаттың биіктігі артады. Ал шикі материалдың су құрамының жоғары кезінде су глобулаларының критикалық мөлшері өседі, бірақ аралық қабаттың жоғарғы бөлігіне түсетін су мөлшері фазааралық бетте коалесценцияға түсетін судан артық болады, бұл да аралық қабаттың биіктігінің ұлғаюына алып келеді. Осылайша, аралық қабаттың минималды биіктігі шикі материалдың су құрамының 0,2–0,3 аралығында байқалады.

Аралық қабаттың белгілі бір қалыңдығында су глобулаларының астындағы су қабатына өту процесі толығымен тоқтайды. Авторлар [20] аралық қабат қалыңдығы 0,5 м-ден асқанда

мұнайдың суын алу процесі толық тоқтайтынын анықтады.

Аралық қабат – мұнайдағы су эмульсиясының жоғары концентрацияланған қабаты болып, дамыған фазааралық бетке ие. Аралық қабат эмульсиялары мұнай эмульсиясының ұсақ дисперсті құрамдас бөліктерін сүзгілеу элементі қызметін атқарып, су глобулаларының шығарылу жылдамдығын баяулатады. Аралық қабат олардың концентрациясының жоғары болуына байланысты дисперстік фазаның ірі глобулаларымен коалесценция процесін күшейтіп, шикі мұнайдан кіші су глобулаларын кетіруге ықпал етеді.

Су-мұнай эмульсияларын бөлу процесі су глобулаларының тұну жылдамдығы мен олардың коалесценция жылдамдығымен анықталады, ол шартты түрде аралық қабаттың биіктігімен сипатталады. Су глобулаларының коалесценция жылдамдығы төмендейді, ал олардың фазааралық бетте болуының уақыты эмульсия стабилизаторлары болған жағдайда айтарлықтай ұлғаяды. Аралық қабат эмульсиясын бұзу барысында фазааралық бет азайып, органикалық және бейорганикалық стабилизаторлар жиналады. Бұл уақыт өте келе аралық қабат эмульсиясының агрегативті тұрақтылығының артуына әкеледі.

Аралық қабат эмульсиясының агрегативті тұрақтылығы артқанда, су-мұнай эмульсиялары жеке фазалар – мұнай мен суға бөлінбейді, бұл мұнайды өңдеу технологиялық режимінің бұзылуына себеп болуы мүмкін. Аралық қабат эмульсиясының агрегативті тұрақтылығының артуы – бұл су глобулаларының қорғаныш қабықтарының толық бұзылмауының нәтижесі, олардың коалесценция және тұну процестері баяу жүреді, бұл органикалық және бейорганикалық стабилизаторлардың концентрациясының артуымен байланысты.

Су-мұнай эмульсияларының бөлінуі кезінде сыйымдылық жабдығында фазалар арасындағы бетте парафиннің, асфальтендердің және смола-лардың микрокристалдары шоғырланады. Механикалық қоспалардың негізгі көлемі де фазалар шекарасында шоғырланады, мұнда су глобулаларының қорғаныш қабықшалары толық бұзылмаған ең тұрақты су-мұнай эмульсияларының негізгі көлемі жиналады. Мұнай эмульсиясында деэмульгатордың жеткіліксіз мөлшері су глобулаларының қорғаныш қабықшаларының толық бұзылмауының және эмульсияның агрегативті және кинетикалық тұрақтылығының артуының себебі болып табылады.

Авторлардың айтуынша [21], аралық қабат эмульсияларының түзілуі динамикалық факторлардың әсерінен болады – судың және мұнайдың көлемдік үлестері тең болған кезде су глобулаларының (өлшемі 10 мкм-ден кем) басым бөлігі бар орташа микроэмульсиялық фазаның пайда болуы, ол су фазасының жоғарғы қабатын және мұнай фазасының төменгі қабатын толығымен шолып өтеді. Мұндай эмульсиялық құрылымның түзілуі смола – асфальтен жүйесіндегі фазалық өзгерістермен және коллоидтық

құрылымдардың күшті өзара әрекеттесуі нәтижесінде байланысты. Бұны растау ретінде су мөлшері 45–55% болғанда, дисперстік фазаның және дисперстік ортаның салыстырмалы көлемдері шамамен тең болатын белгілі бір температурада тіркелген аномальды тығыздық мәндері көрсетіледі.

Су глобулаларының соқтығысу кезінде олардың коалесценция процесінің тиімділігіне мұнай эмульсиясындағы механикалық қоспалардың болуы айтарлықтай әсер етеді [9]. Көптеген кен орындарында механикалық қоспалардың құрамы аралас болып, оған құм, саз, карбонат тастар, гипс, темір оксидтері, темір сульфидтері сияқты бөлшектер кіруі мүмкін. Кен орнындағы мұнай эмульсияларының құрамы мен механикалық қоспалардың мөлшері әр түрлі болуы мүмкін.

Механикалық қоспалардың түзілуі әртүрлі көмірсутек құрамындағы мұнайлардың араласуынан да болуы мүмкін. Мұнай эмульсияларының тұрақтылығын арттыру дәрежесіне қарай бейорганикалық табиғаттағы механикалық бөлшектер келесі ретпен орналасады: саз, құм > темір сульфиді > кальций (магний) карбонаттары > кальций (магний), барий сульфаттары > металлдың коррозия өнімдері [16].

Аралық қабат эмульсияларының тұрақтылығына механикалық бөлшектер мен бейорганикалық тұздардың әсері

Механикалық бөлшектер полярлы да, полярсыз да сұйықтықпен сұйылтылуы мүмкін. Гидрофильдік және гидрофобтық учаскелердің арақатынасы өзгеруіне байланысты механикалық бөлшектер тура және кері эмульсияларды тұрақтандыра алады. Практикада механикалық бөлшектер табиғаты мен кен орнына түсу көздеріне қарамастан асфальт-смолалық және парафиндік мұнай компоненттерімен гидрофобты құрылымдар түзеді, мұнай фазасының көлемінде таралады. Бұл компоненттердің кейбірі дисперсиялану кезінде су глобулаларының қорғаныш қабықшаларына кіреді. Мұнай эмульсиясын бөлу кезінде асфальт-шайырлы және парафиндік компоненттермен гидрофобтанған механикалық қоспалар мұнайда қалады немесе үлкен су глобулаларымен бірге фазалар шекарасында (аралық қабатта) шоғырланады [21].

Аралық қабатта механикалық бөлшектердің шоғырлануы олардың Стокс заңы бойынша шөгуі нәтижесінде жүреді. [22] деректеріне сәйкес, суспензиядан коллоидтық бөлшектерге өтетін өтпелі өлшемдегі механикалық бөлшектердің аралық қабаттағы шөгу жылдамдығы су глобулалары арқылы тасымалданатын механикалық бөлшектердің шөгу жылдамдығынан екі рет төмен болып табылады. Турбулентті араласу кезінде су глобулаларының бетінде механикалық бөлшектердің адсорбциясы мұнай фазасын механикалық қоспалардан тазартып, сонымен қатар кен орны өнімдерін технологиялық тұндырғыштарда бөлу

кезінде аралық қабат эмульсиясының түзілуін күшейтеді.

Механикалық қоспалар деэмульгаторлардың активті адсорбенттері болып табылады. Механикалық бөлшектердің дамыған бетінде реагент – деэмульгатор молекулаларының адсорбциясы жүреді, бұл мұнай эмульсиясын бұзу үшін қажетті деэмульгатордың бірлік шығынын айтарлықтай арттырады.

Ең қарқынды деэмульгатордың адсорбциясы сазда жүреді, темір оксиді реагентті күкірт темірінен белсендірек адсорбциялайды. Темір және күкірт иондарын қамтитын орта бір-бірімен әрекеттесіп, байланысқанда фазалар арасындағы бетте темір сульфиді түзіледі. Мысалы, суы көп девон және көмірлі эмульсияларды араластырғанда, бөліну беті арқылы сульфид сутегі диффузиясы арқылы Девон мұнайы тамшасына темір сульфиді өтеді. Темір сульфиді – мұнай эмульсиялары мен аралық қабат эмульсияларының ең маңызды тұрақтандырғышы болып табылады, оның кен орны өніміндегі мөлшері соңғы уақытта едәуір өсті. Бұл Девон қабаттық суларын, эквивалентті темір иондарын қамтитын суларды көмірлі қабаттардағы күкіртсутекті өнімдерге айдау, күкіртсутектің металл мен мұнай-өнеркәсіп жабдығының коррозия өнімдерімен әрекеттесуімен байланысты. Пластика темір сульфидінің түзілуіне жеткілікті күкіртсутектің түзілуі ішкі контурлы су айдау нәтижесі болуы мүмкін. Күкіртсутектің түзілуі сондай-ақ, сульфатты редуктор бактерияларының судың құрамында пластика енгенде, анаэробты жағдайда мұнай көмірсутектерімен бірге сульфаттарды азайтуы нәтижесінде де жүреді. Су құрамында темірдің көп болуы, газ бөлінуі және өндіруші ұңғымалардың лифтік құбырларындағы термобарикалық жағдайлардың өзгеруі темір сульфидінің түзілуіне әкеледі.

Деректеріне [23] сәйкес, мұнай эмульсиясындағы темір сульфидінің концентрациясы 50–100 г/м³-ден асқанда, мұнайдың суынан айрылуы кезінде аралық қабаттың қарқынды түзілуі байқалады, ол технологиялық тұндырғыштардан кезеңдік түрде «кесіп тасталуды» талап етеді. Темір сульфидінің концентрациясы 50 г/м³-ден төмен болған жағдайда аралық қабаттың түзілуі әлдеқайда баяу жүреді, алайда мұнайды суыту процесі жоғары температура мен деэмульгатордың көп мөлшерін қажет етеді.

Авторлар [24] анықтағандай, мұнайдағы темір сульфидінің концентрациясы 200–300 г/м³ болғанда су-мұнай эмульсияларының тұрақтылығы күрт артады. Эмульсиялардың тұрақтылығы тек темір сульфидінің белгілі бір дисперстілігі болғанда – бөлшектердің мөлшері коллоидтық шамада болғанда артады, ал 2–6 мкм көлемдегі темір сульфиді және механикалық бөлшектердің болуына эмульсия тұрақтылығының артуына әсері болмайды.

Темір сульфиді бөлшектері гидрофильді және гидрофобты аймақтарға ие болғандықтан, яғни су және мұнай фазаларына таңдамалы түрде сіңеді, бөлшектердің гидрофобталу не-

месе гидрофильдену дәрежесі олардың бетінде асфальт-шайырлы, парафиндік және мұнайдың басқа компоненттерінің молекулаларының, сондай-ақ мұнай өндіру технологиялық процестерінде қолданылатын химиялық реагенттердің (ББЗ) молекулаларының адсорбциясына байланысты өзгеруі мүмкін.

Темір сульфидінің эмульсияда болуы әрқашан оның тұрақтылығының артуына себеп болмайды. Мысалы, мұнай фазасының бүкіл көлемінде біркелкі таралған ірі темір сульфиді бөлшектері эмульсияның тұрақтануына қатыспайды.

Темір сульфидінің дисперстік күйі эмульсия қоспасының су фазасының рН мәнімен анықталады. $\text{pH} < 3$ болғанда темір сульфиді түзілмейді, ал $\text{pH} > 7$ болғанда темір сульфиді бөлшектерінің беті гидрофильді болып, оңай су фазасына өтеді. Коллоидтық күйдегі темір сульфидінің пайда болуы $\text{pH} > 3,5$ кезінде жүреді, ал pH 5-тен 6,5-ке дейінгі аралықта түзіліп жатқан барлық темір сульфиді мұнай фазасына өтеді және мұнай эмульсиясының максималды тұрақтылығы байқалады. Бұл кезде темір сульфиді су глобулаларының қорғаныш қабығының бетіне жабысып, шайыр-парафиндік бөлшектермен қосылып тұрақты агрегаттар түзеді, олар гравитациялық күштердің әсерінен фазалар шекарасында шоғырланып, аралық қабатты қалыптастырады.

Пласт суы мен күкіртсутек пен тотықсыз темір иондарын қамтитын суы көп мұнайларды араластырғанда, аралық қабат эмульсиясының тұрақтылығы сульфиттер мен барий сульфаты тұздарының аралық қабықтар құрамында жиналуына байланысты артады. Зерттеулер көрсеткендей, сульфиттер мен барий сульфаты тұздарының ең көп мөлшері көмір және Девон горизонттарының пласт суы эмульсияларын 3 : 1 қатынасында араластырғанда түзіледі.

Механикалық қоспаларды қамтитын аралық қабат эмульсияларының тұрақтылығының артуы тек олардың жоғары концентрацияда болуы арқылы түсіндірілмейді. Механикалық қоспа бөлшектерінің белсенді орталарында мұнайдың ЖМҚ адсорбцияланады. Фазалар шекарасында су тамшыларының коалесценциясы кезінде аралық қабатта механикалық қоспалар мен тұрақтандырғыш бөлшектердің шоғырлануы жүреді, себебі су глобулаларының қорғаныш қабықшалары құрамындағы механикалық қоспалар су фазасына өтпейді. Механикалық қоспа бөлшектері фазалар шекарасында тұрақты қабаттар түзеді, онда тұрақтандырғыштар мен толық бұзылмаған эмульсияның саны артады. Уақыт өте келе бұл процестер механикалық бөлшектердің бетінде адсорбцияланған мұнайдың көмірсутекті бөлігінің қартаюуы, тотығуы және шайырлануы, толық бұзылмаған эмульсияның қартаюумен қатар жүреді. Эмульгирлеуші заттардың жоғары концентрациясын қамтитын бұл эмульсиялар фазалар арасындағы берік қорғаныш қабықшасын қалыптастырады, су глобулаларының коалесценциясының алдын алады және аралық қабат

эмульсияларының агрегаттық тұрақтылығы одан әрі артады. Мұндай эмульсиялар «ұстап қалған» немесе «амбары» мұнайлардың негізін құрайды [25].

Эмульсиялардың тұрақтылығы механикалық қоспа бөлшектерінің қатысуынсыз да артуы мүмкін. Зерттеулер [25] аралық қабат эмульсияларының тұрақтылығы олардың құрамындағы ББЗ-тардың, соның ішінде дезэмульгаторлардың болуы арқасында арта алатынын көрсетті. Бұл заттар эмульгирленген су глобулаларынан ұзақ уақыт бұзылмайтын гель тәрізді ассоциаттар түзеді. Мұнай эмульсиясындағы дезэмульгатор концентрациясы оңтайлы деңгейден жоғары болған жағдайда гель тәрізді ассоциаттардың саны мен көлемі артып, эмульсияның тұрақтылығы артады. Бұл мұнайды өндіру және дайындау жүйесінде қолданылатын дезэмульгаторларды бақылауды және олардың мөлшерін дұрыс дозалауды талап етеді.

Аралық қабатты тұрақтандыратын гель тәрізді ассоциаттарды ИК-спектроскопия әдісімен зерттеген кезде [26] олар гидрофобты, жоғары молекулалық салмағы бар ББЗ – этилен оксиді және пропилен оксидінің блок-кополимерлерінен құралғаны анықталды. Гель тәрізді ассоциаттардың түзілу себебі – су-мұнай эмульсияларын бұзуға арналған реагенттердегі, атап айтқанда дезэмульгаторлар құрамындағы гидрофобты және жоғары молекулалық ББЗ-тардың артық қолданылуы.

Мұнайдың құрамы, оның су құрамының деңгейі және эмульгирлеуші заттардың концентрациясына байланысты аралық қабат эмульсиялары әртүрлі физика-химиялық қасиеттерге ие болады. Аралық қабат эмульсиялары әдеттегі су-мұнай эмульсияларынан едәуір ерекшеленеді.

Су-мұнай эмульсиялары мен аралық қабат эмульсияларының бұзылу механизмі

Су-мұнай эмульсиялары мен аралық қабат эмульсияларын бұзу процестерінің физикалық және химиялық негіздері

Судың-мұнайдың эмульсиялары мен аралық қабат эмульсияларын бұзу үшін глобула суының бетінде пайда болған берік фазааралық адсорбциялық қабатты жою қажет, бұл үшін процесті бұзудың белсенділік энергиясының тосқауылын еңсеру керек. Активация энергиясын төмендету және адсорбциялық қабатты бұзу үшін қажетті уақытты азайту – екі фаза арасындағы тепе-теңдікті бұзатын әсер ету арқылы жүзеге асырылады.

Бүгінгі таңда су-мұнай эмульсияларын бұзудың бірнеше негізгі әдістері бар: физикалық, химиялық және біріктірілген. Физикалық әдіс – бұл массалмасу процесі қарқынды жүретін жағдайларда эмульсиялық жүйеге әсер ету, нәтижесінде су глобулаларының қорғаныш қабықшаларында ақаулар пайда болады. Бұл әсерге механикалық әсер, белгілі бір күшке ие электр

өрісімен әсер ету, жүйені дегазациялау немесе қыздыру жатады.

Химиялық әдіс – бұл арнайы химиялық реагенттер – деэмульгаторларды қолдану арқылы жүзеге асады.

Өнеркәсіпте ең көп таралған әдіс – бұл физикалық және химиялық тәсілдерді түрлі комбинацияда біріктіретін кешенді әдіс. Солардың ішінде ең қолжетімді және арзан түрі – термохимиялық әдіс.

Деэмульгаторлар – бұл мұнайда диспергирленген су глобулаларының бетінен табиғи тұрақтандырғыштарды ығыстырып шығарып, олардың полярлы компоненттерден, парафин бөлшектерінен және механикалық қоспалардан тұратын қорғаныш қабықтарын бұза алатын ББЗ. Деэмульгатордың рөлі – бастапқыда жоғары агрегативтік тұрақтылыққа ие ұсақ дисперсті эмульсияны төмен кинетикалық тұрақтылыққа ие ірі дисперсті жүйеге айналдыру болып табылады.

Деэмульгаторлар да эмульгаторлар сияқты ББЗ класына жатады. Бұл заттар класының нақты шекаралары жоқ. Егер деэмульгаторлар концентрациясы оңтайлы мөлшерден артып кетсе, олар керісінше эмульсияның тұрақтандырғыштары – эмульгаторлар сияқты әрекет ете бастайды.

«Мұнай суда» типті эмульсияларда ББЗ фазааралық бетте молекуланың гидрофобты бөлігі диспергирленген бөлшек ішіне, ал гидрофильді бөлігі сыртқа бағытталатындай орналасады. Бүгінгі күнге дейін деэмульгаторлардың кеңінен қолданылуына қарамастан, олардың әсер ету механизміне қатысты бірыңғай пікір жоқ. Реагенттердің әсерін түсіндіретін бірнеше теориялар белгілі.

Кейбір зерттеушілердің пікірінше, деэмульгатор арқылы эмульсия бұзылған кезде фазалардың кері айналуы жүреді, сондықтан деэмульгаторлар – бұл эмульгаторларға қарама-қарсы типті эмульсияны түзе алатын ББЗ.

Басқалары жүйеге енгізілген ББЗ су глобулаларындағы электр өрісін жояды деп есептейді. Бұл электр өрістер, қос электр қабаты теориясына сәйкес, глобулалардың коалесценциясына кедергі келтіреді. Де Грот теориясы бойынша деэмульгатордың мұнайға енгізілуі нәтижесінде эмульсияны тұрақтандыратын гидрофобты молекулалар мен деэмульгатордың гидрофильді молекулалары арасында кешенді қосылыстар түзіледі, соның салдарынан табиғи тұрақтандырғыштар эмульгирлеу қасиетінен айырылады.

Неман теориясы бойынша эмульсияны бұзу – бұл коллоидтық-физикалық процесс, және мұнда деэмульгатордың химиялық құрылымынан гөрі оның коллоидтық қасиеттері маңыздырақ [27].

Тағы бірқатар зерттеушілердің пікірінше [27], жүйеге деэмульгатор енгізілгенде, реагенттің таңдамалы адсорбциясы нәтижесінде табиғи эмульгаторлардың концентрациясы төмендейді. Бұл өз кезегінде жүйенің бос энергиясының өзгеруіне және эмульсияның тұрақтылығының жойылуына әкеледі. Сонымен қатар деэмульгатор-

лардың эмульгаторлардың қатты қабыршақтарын «ыдыратушы» әсері анықталған.

Академик П.А. Ребиндер ұсынған теория кеңінен мойындалған. Оның еңбектерінде [3] деэмульгаторлар арқылы деэмульгация механизмінің негіздері жан-жақты зерттелген. Эмульсияда коалесценция процесінің жүруі үшін дисперсиялық ортаның жағынан су глобулаларының бетінде түзілетін құрылымдық-механикалық тосқауылды жою қажет, бұл тосқауыл олеофильді коллоидты тұрақтандырғыштардан құралады. Мұндай тосқауылды – яғни, тамшылардың жақындасуы кезінде қабықтың қалыңдығының азаюына және, тиісінше, коалесценция процесінің жүруіне кедергі келтіретін бөгетті – тек коллоидты тұрақтандырғыштардан да беттік белсенділігі жоғары затты жүйеге енгізу арқылы ғана жоюға болады.

Деэмульгаторлар эмульгирлеуші заттарға қарағанда жоғары беттік белсенділікке ие бола отырып, су глобулаларының беттік қабатынан оларды ығыстырады. Су глобуласының фазааралық бетінде адсорбциялана отырып, деэмульгатор механикалық тұрғыдан берік гель тәрізді қабаттың диспергирленуіне, пептизациясына немесе коллоидтық ерітілуіне ықпал етеді. Деэмульгатордың фазалар шекарасында адсорбциялануы тек фазааралық қабықтың керілу энергиясы енгізілген реагенттің сұйықтық-сұйықтық шекарасындағы беттік сипаттамасына теңескен жағдайда ғана мүмкін. Сондықтан деэмульгаторды енгізу жылу беру, араластыру, ультрадыбыстық әсер секілді сыртқы әрекеттермен қатар жүруі қажет.

Деэмульгатор су глобулаларының бетінен табиғи эмульгаторларды ығыстырған соң, олардың бетінде құрылымдық-механикалық беріктігі жоқ, бірақ глобулалардың бір-бірімен жанасқанда мұнайда тез коалесценциялануына ықпал ететін гидрофильді адсорбциялық қабат түзеді.

Механикалық қоспалармен тұрақтандырылған эмульсияларды деэмульгациялау жолдары

Зерттеулер көрсеткендей, эмульсияларды бұзу тек физикалық емес, сонымен қатар межфазалық беттегі химиялық әрекеттесулердің нәтижесінде де жүзеге асады. Мысалы, деэмульгаторлар фазааралық өзгерістердің катализаторы ретінде әрекет етіп, химиялық реакциялардың жылдамдығын бірнеше есе арттыра алады.

«Мұнай – су» фазааралық бетінде жүретін химиялық әрекеттесулерге табиғи ББЗ-ның эмульгаторлық қасиетін бейтараптандыру процестері жатады. Бұл деэмульгатормен байланысып, белсенділігі жоқ кешендер түзу немесе деэмульгатор молекуласының полярлы бөлігінің табиғи ББЗ-дан үзілуі арқылы жүзеге асады.

[28] зерттеу жұмысында фазааралық шекара құрайтын кешенді қосылыстардың түзілу құбылысы сипатталған. Бұл қосылыстар мұнай құрамындағы гидрофобты эмульгаторлар мен гидрофильді ББЗ арасында түзіледі, нәти-

жесінде табиғи эмульгаторлардың эмульгирлеу қасиеттері бейтараптанады.

Сонымен қатар, табиғи эмульгатор молекуласының гидрофобты бөлігі дезэмульгатор жүйесіне енетін, құрылымында белгілі өлшемдегі гидрофобты қуыс бар дезэмульгатор молекуласымен әрекеттесе алатын жағдайлар да болуы мүмкін. Бұған мысал ретінде фенолформальдегид шайырларын оксизтириллеу арқылы алынған синтетикалық реагенттер – полинол жатады.

Осылайша, ғылыми әдебиеттерді талдау эмульсиялық жүйелерді бұзу процесінде табиғи ББЗ бен дезэмульгаторлар арасында физикалық та, химиялық та әрекеттесулер болатынын көрсетті. Эмульсия бұзылу механизмінің қай түрі басым болатыны көбіне дезэмульгатордың қасиеттеріне байланысты болады, ал табиғи ББЗ-ның құрылымына тәуелділігі аздау. Эмульсияны дезэмульгатормен бұзу процесі күрделі болғанымен, бұл процестің жүруі үшін дезэмульгатордың қатысуы міндетті, және оның фазааралық беттегі концентрациясын төмендететін кез келген фактор дезэмульгация тиімділігін азайтады.

Бұл эмульсиялардың адсорбциялық қабықшасының құрамына кіретін заттармен дезэмульгирлеуші қоспа компоненттерінің әрекеттесу механизмі көпфакторлы сипатқа ие болғандықтан, жоғары тиімді композициялық дезэмульгаторларды жасаудың қажеттілігін дәлелдейді [26].

Механикалық қоспалармен тұрақтандырылған аралық қабат эмульсияларын бұзу мәселелері дезэмульгаторларға қосымша талаптар қояды. Дисперстік бөлшектермен тұрақтандырылған мұнай эмульсияларын бұзу үшін дезэмульгатор механикалық қоспалар мөлшері мен өлшемдерінің кең диапозонында тиімді болуы керек. Сонымен қатар, ол дисперстік бөлшектердің сіңірілген табиғи эмульгаторларымен әрекеттесе алатындай жоғары сіңіру (жуғыштық) және сылану қасиеттеріне ие болуы тиіс. Дезэмульгатор молекулалары дисперстік бөлшектердің сылану қабілетін өзгертеді, бұл олардың фазалар шекарасынан мұнай немесе су фазасына өтуін жеңілдетеді.

Автормен [29] дезэмульгатор әсер ету механизмі, су глобулаларының қорғаныс қабықшасының компоненттерінің сылану қабілетін өзгертумен байланысты, жан-жақты қарастырылады. Дезэмульгатор молекулалары су глобулаларының қорғаныс қабатына еніп, ол қатты дисперстік бөлшектерден тұратын қаңқасы бар көпқабатты құрылым болып табылады. Бұл құрылымдағы бос аралықтар екі сұйық фазаға да толы. Дезэмульгатор молекулалары мұнай фазасы жағынан су мен мұнай арасындағы шекарада адсорбцияланады. Оның полярлы бөлігі сумен берік байланысады, ал гидрофобты бөлігі стабилизатордың гидрофильді бетіне бағытталады. Нәтижесінде, су глобуласы беті мен ондағы полярлы топтар арасындағы әрекеттесу күші күрт төмендейді. Бұл құбылыс тұрақтандырғыштың дисперстік бөлшектерінің гидрофильді аймақтардағы шеткі сылану бұрышын өзгертеді және сы-

лану инверсиясы орын алады. Мұнай эмульсиясы бұл учаскелерге өздігінен жайылады, ал толық мұнаймен сыланған дисперстік бөлшектер мұнай фазасына өтеді де, су глобулалары қорғаныс қабықшаларынан айырылады. Бұл дезэмульгатор әсер ету механизмі эмульгирленген судың глобулаларындағы тұрақтандырғыштың адсорбциясы ұлғайған сайын қажетті дезэмульгатор мөлшері неге артатынын түсіндіреді, себебі тұрақтандырғыш қабатындағы су мен мұнайдың жанасу беті үлкейеді. Су глобулалары қосылып, эмульсия мұнай мен суға бөлінгеннен кейін, фазааралық беттің күрт азаюына байланысты дезэмульгатор көлемдік фазаларға өтеді.

Механикалық қоспалармен тұрақтандырылған тұрақты мұнай эмульсияларын бұзу үшін қолданылатын дезэмульгаторлар құрамында диспергаторлар, сыландырғыштар, жуғыш заттар, флокулянттар және басқа да қосылыстар болуы мүмкін. Бұл заттар су глобулаларының қорғаныс қабықшаларынан майда дисперстік механикалық қоспаларды жоюға көмектеседі.

Жұмыста [29] көрсетілгендей, механикалық қоспалармен тұрақтандырылған эмульсияларды бұзу кезінде ең жоғары тиімділікті сыландырғыш және жуғыш қасиеттері ең жоғары дезэмульгаторлар көрсетеді. Мысалы, сыландырғыш және жуғыш қасиеттері жоғары реагенттерді қолдану мұнай құрамындағы темір сульфидінің мөлшерін төмендетуге алып келді.

Зерттеулерде [30] сыландырғыш-жуғыш әсері бар ББЗ-тардың дисперстік бөлшектердің ішкі және сыртқы «қабыршақтариді» құрылымдарына «ыдыратқыш» әсері бар екені анықталған. Бұл бөлшектердің өзегі бейорганикалық механикалық қоспалардан тұрып, олардың бетінде көмірсутекті қосылыстар мен табиғи эмульгаторлар – АШЗ адсорбциялық қабаты орналасқан.

Ассоциирленген адсорбциялық қабатты пептизациялау процесі ББЗ-реагенттің сыландырғыш және жуғыш қасиеті болған жағдайда дисперстік бөлшектің бүкіл бетінде жүзеге асуы мүмкін. Бұл ретте жуғыш әсердің рөлі – асфальт-шайырлы «фрагменттерді» коллоидты-дисперстік күйден молекулалық ерітуге немесе ассоциативті құрылымға көшіру. Ал сыландырғыш реагенттің басты міндеті – бейорганикалық бөлшектің жалаңаш бетінің максималды гидрофильділігін қамтамасыз ету, сол арқылы оның мұнай фазасына (дисперстік ортаға) өтуін болдырмау.

Ионсыз ББЗ пен сыландырғышты бірге қолдану синергетикалық әсерге алып келуі мүмкін. Зерттеуде [30] сыландырғыш ретінде алкилфенол қышқылдарының октаглицеридтерін және ионсыз ББЗ ретінде оксизтирилленген алкилфенолформальдегидті шайырдан тұратын композицияны қолдану ұсынылады.

Физика-химиялық тұрғыдан су глобулаларының қорғаныс қабықшасынан қатты бөлшектерді жою механизмі адсорбциялық ығыстыру, эмульгирлеу және солюбилизация процестерімен түсіндіріледі. Анионды ББЗ арасында ең жоғары

сыландырғыш-жуғыш қасиетке тармақталмаған радикалы және полярлы тізбегі соңында орналасқан ББЗ ие [23].

Жоғарыда айтылғандардан мынаны қорытындылауға болады: табиғи және синтетикалық ББЗ-пен, сондай-ақ механикалық қоспалармен тұрақтандырылған тұрақты су-мұнай эмульсияларын бұзудың міндетті элементі – химиялық реагент – деэмульгатор болуы тиіс. Аралық қабат эмульсияларын тиімді бұзу үшін деэмульгатор тек жоғары беттік-белсенді қасиеттерге ғана емес, сондай-ақ сыландырғыш, жуғыш, пептизирлеуші және флокулянттық қабілеттерге ие болуы керек. Бұл қасиеттер ББЗ негізіндегі деэмульгаторлардың құрамына жоғары беттік белсенділік беру үшін қажет.

Мұндай деэмульгаторлар – бұл кешенді әсері бар, жоғары сыландырғыш қабілетімен, жақсы реологиялық қасиеттерімен және тұрақты су-мұнай эмульсияларын тиімді бұзу мүмкіндігімен ерекшеленетін көпфункционалды реагенттер.

Заманауи жоғары тиімді композициялық деэмульгаторлар

Заманауи коммерциялық деэмульгаторлар негізден (композициялық қоспалардан) және еріткіштен тұрады. Белсенді негіз ретінде олар әртүрлі табиғаттағы бір немесе бірнеше ББЗ компоненттерінің қоспасын қамти-

ды. Су жоғарыдисперсті күйде болатын ауыр және жоғары тұтқыр мұнайларды бұзу – олардың тұтқырлығы мен тығыздығының жоғарылығына, сондай-ақ қатты бөлшектердің көп болуына байланысты – едәуір күрделі үдеріс. Сондықтан дәстүрлі деэмульгаторлар, әсіресе біркөппонентті түрлері, мұндай эмульсияларды тиімді бұзу үшін жеткіліксіз болып табылады.

ББЗ-дың тиімді деэмульгирлеу қасиеттерін көрсетуі үшін ол келесі қасиеттердің үйлесіміне ие болуы керек: гидрофильді-липофильді баланстың оңтайлы шамасы, жоғары беттік белсенділік пен сіңіргіштік қасиеттер, мицелла түзілуінің төмен концентрациясы және т.б. Осындай сипаттамалар жиынтығына ие бейиондық ББЗ синтездеу іс жүзінде мүмкін емес. Сол себепті құрамында бейиондық, катионды және анионды ББЗ-дар мен басқа да белсенді қоспалары бар композициялық деэмульгаторларды жасау – болашағы зор бағыт болып табылады. Әр түрлі құрамдағы және химиялық сипаттағы жеке ББЗ деэмульгирлеу қасиеттері туралы әдебиеттегі үлкен ақпаратқа, қолда бар тәжірибеге, сондай-ақ су-мұнай эмульсияларын жою механизмі туралы идеяларға сүйене отырып, деэмульгаторлардың құрамына келесі негізгі функциялары бар компоненттерді қосу ұсынылады: деэмульгаторлар, тамшылатқыштар және ылғалдандырғыштар [22]:

1-кесте. Деэмульгаторлар үшін ұсынылатын негізгі функциялар

Table 1. Recommended main functions for demulsifiers

Деэмульгаторлар	Тамшы түзгіштер	Ылғалдандырғыштар
Бұл топтағы заттардың негізгі рөлі өлшемдері микроннан кіші суспензияланған дисперсті су тамшыларының көп мөлшерінің флокуляциясы болып табылады. Бұл кезеңде коалесценция болмайды немесе су тамшыларын қоршап тұрған фазааралық пленка өте әлсіз болған жағдайда ғана болады. Тамшылардың флокуляциясы негізінен эмульсиялардың ыдырау процесінде кинетикалық тұрақтылығын төмендетеді.	Коалесценция – бұл заттардың негізгі қызметі. Сонымен қатар, дайындық процесінде осы заттардың қосылуы үлкен үлкен су тамшыларының пайда болуына, содан кейін олардың бөлінуіне әкеледі.	Осы топтағы заттарды қолдану нәтижесінде пайда болады фазалық интерфейсте адсорбцияланған бөлшектердің бетін ылғалдандыру және гидрофиллизациялау.

Гибридті топ компоненттері деэмульгаторлар мен тамшы түзуге арналған агенттердің (көп мақсатты функциялар) үйлесімін білдіреді. Кейбір жағдайларда гибридртер деэмульгаторлар мен тамшы түзуге арналған агенттердің жай қоспаларымен салыстырғанда тұзсыздандыру процесінде эмульсияларды бұзуға неғұрлым тиімді әсер етеді. Құрамында деэмульгатор ретінде изобутилен мен формальдегидтен алынған изопрен өндірісінің жоғары қайнайтын өнімдерімен және ионсыз ББЗ қоспасымен 50–70% құрайтын қоспа, сондай-ақ М-2 жоғары қайнайтын фракцияларының 10–20% бар. Құрамында бір уақытта су-мұнай эмульсияларын бұза алатын және жабдықты коррозиядан қорғайтын композициялық құрамдар жасалды.

Мұнай эмульсиясындағы асфальтөндер мен шайырлардың болуы эмульсия түзілуін тежеу үшін химиялық қоспаларды қажет етеді. Су-мұнай эмульсиясын бұзуда деэмульгатордың қабілеттілігі мен жағымсыз липофильді асфаль-

төндердің болуына байланысты өзара байланыс бар. Физика-химиялық формула концепциясына сәйкес, деэмульгатор – бұл су-мұнай шекаралық аймағында оңтайлы формула түзе алатын гидрофильді ББЗ. Деэмульгатор липофильді және гидрофильді ББЗ қоспасынан тұрады, олар деэмульгация процесін жүзеге асыруға қабілетті. Бұл компоненттер арасында өзара ымырашыл әрекеттестікті қамтамасыз ете алады. Осылайша, белгілі бір синергиялық әсер кезінде мұндай қоспа әдетте деэмульгатор ретінде жақсы өнімділікке ықпал ете алады.

[30] зерттеуінде гидрофильді-липофильді теңгерім негізінде деэмульгаторлардың оңтайлы құрамдары зерттелді. Олар деэмульгатор жүйесінің негізгі мақсаты – аралық фазада жеңіл адсорбция арқылы эмульгирлеу механизмін болдырмау және шикі мұнаймен байланысқан асфальтөндер немесе шайырлар қабатын әлсірету екенін анықтады. Аралық фазада жақсы дестабилизацияға қол жеткізу үшін бірнеше ме-

ханизмдерді қарастыру қажет. Осыған байланысты деэмульгатор шекаралық бетке бәсекелі түрде адсорбцияланып, асфальтендік агрегаттарды жоюы және бұзуы, сондай-ақ көмірсутекті және су фазалары арасындағы интерфейстік керілуді азайтып, тамшылардың коалесценция кинетикасына ықпал етуі тиіс.

Бірнеше ауыр мұнай сорттарындағы қышқылдылықтың жоғары болуына байланысты мұнай өңдеу зауыттары бірқатар мәселелерге тап болды, әсіресе ұңғыма сағасында, мұнай сорғыларында, клапандарда және өндірістік нысандарда коррозия пайда болды, бұл өз кезегінде мұнай компанияларының табысының төмендеуіне алып келуі мүмкін. Ауыр иран мұнайында наносұйықтық деэмульгаторын пайдалана отырып, қышқылдылықты жою бойынша зерттеу [30] жүргізілді. Бұл зерттеудің мақсаты – қышқылдылықтың жоғары концентрациясын 1 мг КОН/г үлгіден төмен деңгейге дейін азайту. Өлемдегі мұнай өңдеу зауыттарының көпшілігі жалпы қышқыл саны 0,5-тен төмен мұнайды өңдеуге бейімделген.

Зерттеушілер шикі мұнайдағы қышқыл санын арттыратын негізгі фактор судың түзілуі екенін анықтады. Зерттеу нәтижелері температураның тұз бен суды бөліп алу және мұнай қышқылдығын төмендету үдерісінде маңызды рөл атқаратынын көрсетті. Температура жоғарылаған сайын шикі мұнайдың тұтқырлығы төмендейді, бұл бейорганикалық және су фазаларын бөлуді жеңілдетеді. Зерттеулерде оңтайлы жағдайларда – температура 100°C-тан жоғары және центрифугалау жылдамдығы 2500 айн/мин-нан жоғары болғанда – ең жақсы бөлу нәтижелері алынды. Нәтижесінде, шикі мұнайда су түзілуін жою арқылы ауыр мұнайдың қышқыл саны 80%-ға дейін төмендегені байқалды.

Қолданылатын деэмульгаторлар API¹ тығыздығы, асфальтендер мөлшері және шикі мұнайдың молекулалық массасына байланысты таңдалды.

ББЗ олардың қолданылуына, суда диссоциациялануына және заряд тасымалдаушысына байланысты экономикалық тұрғыдан жіктеледі. Суда амфифильді анион мен катионға диссоциацияланатын ББЗ, әдетте, сілтілік металдармен (Na⁺, K⁺ немесе төрттік аммониймен байланысқан, анионды ББЗ деп аталады). Олар көптеген өнеркәсіп салаларында кеңінен қолданылады және өлемдегі барлық ББЗ өндірісінің шамамен жартысын құрайды. Оларға алкилбензолсульфонаттар (жуу құралдары), май қышқылдары, лаурилсульфат (көбік түзуші агент), диалкилсульфосукцинат (сіңіргіш агент) және лигносульфонаттар (диспергаторлар) жатады. Бұл заттар теріс заряд тасымалдайды, мысалы, сабындағыдай: (C₁₇H₃₅COO⁻Na⁺) – натрий стеараты. Сонымен қатар, катионды ББЗ суда амфифильді катион мен анионға (көбіне галогенді тип) диссоциацияланады. Бұл заттарды синтездеу кезінде жоғары қысымда гидроге-

низация реакциясы жүргізілуі қажет, бұл оларды анионды ББЗ-мен салыстырғанда қымбатырақ етеді. Сондықтан олар тек арзанырақ балама болмаған жағдайда ғана қолданылады. Олар оң зарядқа ие, мысалы, төрттік аммоний тұздарында: (C₁₈H₃₇)₂N⁺(CH₃)₂Cl⁻ – диметилдиоктадецил аммоний хлориді. Егер бір молекула анионды да, катионды да диссоциация көрсетсе, ондай ББЗ амфотерлі немесе цвиттерионды ББЗ ретінде танылады. Мысалы, синтетикалық өнімдер – беттаиндер немесе сульфобетаиндер, ал табиғи қосылыстар – аминқышқылдары мен фосфолипидтер. Мұндай молекулада оң және теріс зарядтар болады, бұл олардың суда ерігіштігін қамтамасыз етеді, мысалы: C₁₂H₂₅N⁺(CH₃)₂CH₂CH₂COO⁻ – β-N-алкил аминопропион қышқылы. Сонымен қатар, ионсыз ББЗ-дың үлесі өлемдік өндірісте шамамен 45%-ға дейін өсті. Олардың гидрофильді тобы диссоциацияланбайтын болғандықтан, бұл заттар суда ионизацияланбайды. Соның арқасында олар көптеген күрделі қоспаларда, оның ішінде көптеген коммерциялық өнімдерде, кеңінен қолданылады. Полиоксисетилениоксид топтарының сольватациялану қасиеті олардың суда ерігіштігін қамтамасыз етеді, мысалы: C₉H₁₉C₆H₄(OCH₂CH₂)₉OH – нонилфенолэтоксилат. Ең жиі қолданылатын деэмульгаторларға ионды және ионсыз деэмульгаторлар жатады. Ионды деэмульгаторлар майда еритін және суда еритін деэмульгаторлар түрінде жіктеледі, олардың қасиеттері 2-кестеде көрсетілген.

2-кесте. Мұнайда және суда еритін деэмульгаторларды салыстыру
Table 2. Comparison between oil-soluble and water-soluble demulsifiers

Мұнайда еритін деэмульгаторлар	Суда еритін деэмульгаторлар
Молекулалық массасы, а.б.б. 2000–50000. Үлкен молекулалық масса артықшылыққа ие.	Молекулалық салмақ, а.б.б. 10000–15000 төмен молекулалық салмаққа артықшылық беріледі
Полидисперсті фазааралық белсенді полимерлер	Тетраполимер немесе пентаполимер
Тетраполимер немесе пентаполимер	Полимер гидрофильді (-COOH) және гидрофобты (алкил) топтарды білдіреді
Қайыпты және қымбат химиялық заттар (этилен, пропилен оксиді)	Қарапайым химиялық заттар (метилметакрилат, бутилакрилат, акрил қышқылы, метакрил қышқылы)

«Мұнай – су» типті эмульсиялардың тұтқырлығы мен тамшылар өлшемі эмульсияның араласу жылдамдығына әсер етеді. Эксперименттік жұмыста тұтқырлық 25–65°C температура аралығында және ығысу кернеуі 30–200 айн/мин диапазонында өлшенді. Зерттеу нәтижесінде араластыру жылдамдығы 1000-нан 1500 айн/мин-ге дейін артқанда тамшылардың өлшемі азаятыны, ал 1500-ден 2500 айн/мин-ге дейін одан әрі арттырғанда тамшылардың өлшемі өзгермейтіні анықталды. Сондай-ақ, 1000-нан 1500 айн/мин-ге дейін араластыру

¹ API – American Petroleum Institute — Америка мұнай институты

жылдамдығы артқанда эмульсияның тұтқырлығы шамамен 150 сП-ға артатыны анықталды. Одан әрі 1500-ден 2500 айн/мин-ге дейін арттырғанда тұтқырлық тек шамамен 110 сП-ға ғана ұлғаяды. Эмульсияның тұрақтылығын «мұнай – су» типті эмульсияларды араластыру ұзақтығы мен жылдамдығын арттыру арқылы жақсартуға болады. Бұл май тамшыларының диаметрін

азайтып, эмульсияның да, оның тұтқырлығының да тұрақтылығын арттырады. Бұл аралық бетінің ауданын ұлғайтып, фазалар арасындағы бөлшектердің өзара әрекеттесуін жақсартуға ықпал етеді. Диспергирленген тамшылардың диаметрі 1 мкм-ден аз болатын жүйелерде коллоидтық бет пен броундық қозғалыс күштері гидродинамикалық күштерден күшті болатыны дәлелденген [29].

3-кесте. Отандық және шетелдік дезэмульгаторлардың салыстырмалы талдауы

Table 3. Comparative analysis of domestic and foreign demulsifiers

Критерий	Шетелдік дезэмульгаторлар	Отандық дезэмульгаторлар
Шығу тегі	АҚШ (Baker Hughes, Nalco), Германия (BASF ¹), Қытай (CNPC ²), Ресей (ТНК ³ , Роснефть)	Қазақстан (PayAnTex, Uralchemtech, KazChemicals), кейбір ЖОО және ФЗИ әзірлемелері
Қолдану саласы	Өлемдік мұнай гиганттары мен ірі кен орындарында кеңінен қолданылады (Теңіз, Қашаған, Каспий)	Көбіне жергілікті кен орындарда (Қаражанбас, Өзенмұнайгаз, Ембімұнайгаз)
Құрамы	Күрделі көпкомпонентті жүйелер (синтетикалық эфирлер, этоксилаттар, силикондар)	Қарапайым полимерлер, өсімдік майы негізіндегі реагенттер, азотты қосылыстар
Эффективтілік	Жоғары (әсіресе күрделі эмульсияларда)	Орташа/жақсы, бірақ тұрақты W/O эмульсияларда тиімділігі төмендеуі мүмкін
Техникалық икемділік	Температура, тұтқырлық, минералдылығы жоғары ортада бейімделуі жақсы	Көбіне белгілі бір кен орнының шарттарына бейімделген
Құны	Жоғары (импорт, логистика, валюта тәуелділігі)	Орташа/төмен (жергілікті өндіріс, кейбірі мемлекеттік қолдаумен)
Экология	Экологиялық талаптарға сай, биоыдырайтын түрлері дамуда	Өлі де экологиялық талаптарға толық сай келмейтін түрлері кездеседі
Жеткізу мен қолжетімділік	Импорттық шектеулер, логистикаға тәуелділік	Жергілікті нарыққа бейімделген, жедел жеткізу мүмкіндігі жоғары

АҚШ – Америка Құрама Штаттары; ЖОО – жоғары оқу орны; ФЗИ – ғылыми-зерттеу институты; W/O – Water in Oil (мұнайдағы су)

¹BASF – Baden Aniline and Soda Factory (gem. Badische Anilin- und Soda-Fabrik). [basf.com](https://www.basf.com)

²CNPC – China National Petroleum Corporation. [cnpc.com.cn](https://www.cnpc.com.cn)

³ТНК / TNK – Төмен мұнай компаниясы (орыс. Тюменская нефтяная компания) / Tyumen Oil Company

3-кестеде елімізде және шетелде қолданылатын дезэмульгаторлардың салыстырмасы берілген. Бұл кестеде отандық және шетелдік өнеркәсіптік дезэмульгаторлардың негізгі қасиеттері мен сипаттамалары салыстырмалы түрде берілген. Кестеде өнімдердің шығу тегі, қолдану салалары, химиялық құрамы, тиімділік деңгейі, баға саясаты, техникалық икемділігі, экологиялық талаптарға сәйкестігі және жеткізу мүмкіндіктері қарастырылған.

Шетелдік дезэмульгаторлар әдетте жоғары технологиялы және күрделі эмульсияларды шешуге бағытталған, олар көп компонентті және кең температуралық диапазонда тиімді жұмыс істейді. Бірақ олардың бағасы жоғары болып, жеткізу мен логистика мәселелеріне тәуелді. Ал отандық дезэмульгаторлар көбіне жергілікті мұнай кен орындарының ерекшеліктеріне сай жасалып, қолжетімді баға мен жылдам техникалық қолдаумен ерекшеленеді. Дегенмен, олардың кейбір түрлері күрделі эмульсияларда шетелдік өнімдер сияқты жоғары нәтижеге жетпеуі мүмкін. Бұл салыстырмалы талдау мұнай өндірісіндегі дезэмульгаторларды таңдау кезінде олардың артықшылықтары мен кемшіліктерін анықтауға, сондай-ақ экономикалық және техникалық тиімділікті бағалауға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Қорыта келе, бұл әдеби шолу мұнай өнеркәсібіндегі шикі мұнай эмульсияларын және дезэмульгирлеу үдерісін жан-жақты қарастыруға бағытталғанын атап өткен жөн. Өртүрлі өндірістік платформаларда эмульсиялардың түзілуі мұнай өңдеушілер үшін көптеген қиындықтар туғызды. Барлық аталған дезэмульгирлеу әдістерінің ішінде негізгі мақсат – тұрақтандырушы қабықшаның беріктігін төмендету арқылы фазааралық қабықшаны жұқарту процесін жеделдету және мұнай-су шекарасында эмульгаторлардың адсорбциясын тежеп, бөлінуге кедергі келтірмеу. Эмульсия мәселесін шешу үшін эмульсияларды бұзу әдістерін ғана емес, сонымен қатар тиімді дезэмульгаторларды терең түсініп, мұқият зерттеу қажет. Бұл екі аспект шолу барысында келтірілген нәтижелердің шынайылығы мен практикалық маңыздылығы үшін өте маңызды және ұзақ мерзімді салдарға ие.

Дезэмульгирлеу үдерісінде қолданылатын процестер мен эксперименттік қондырғылар барлық зерттеулерде дерлік бірдей. Алайда механизмдер зерттеуден зерттеуге қарай өзгереді, себебі біз эмульсиялардың түрлері мен қасиеттерін, эмульсияларды тұрақтандыратын қатты заттардың рөлін және мұндай эмульсияларды өңдеуге сәйкес келетін дезэмульгаторлардың

сипаттамаларын ескеруіміз керек. Бұл шолудан байқауға болады: көптеген зерттеушілер деэмульгирлеу механизмдерін зерттеу тұжырымдамасына, атап айтқанда, қабықшаның дренажын тудыратын химиялық қоспаларды қолдануға назар аударады. Бұл тәсіл қазіргі таңда ең жиі қолданылатын және практикалық болып табылады. Дегенмен, деэмульгирлеу тиімділігі арқылы байқауға болатын белгілі бір артықшылықтар мен кемшіліктер де бар.

Деэмульгирлеу жүйесінің формуласы белгілі бір шикі мұнайға сәйкес келетін деэмульгаторларды анықтау мақсатында зерттелді. Авторлардың білуінше, эмульсияларды бөлу бойынша біріктірілген режимдерді зерттейтін жұмыстар аз, бірақ олар саланың дамуына айтарлықтай оң әсер етуі мүмкін. Сондықтан болашақ зерттеулерде жүйенің жеке бөліктерінің жұмысын зерттеу арқылы көрінетін нақты физикалық аспектісін қамтитын тәсілді

енгізу көзделуде. Эмульсиялардың мінез-құлқын түсіну – эмульсияларды бұзудың неғұрлым стратегиялық жолдарын әзірлеу және мұнай өнеркәсібінде экономикалық шығындарды азайту үшін маңызды фактор болып саналады.

Отандық және шетелдік деэмульгаторлардың әрқайсысының өз артықшылықтары мен кемшіліктері бар. Шетелдік деэмульгаторлар жоғары технологиялы, күрделі эмульсияларды тиімді бұза алады, бірақ олардың бағасы жоғары әрі жеткізу мәселелері болуы мүмкін. Ал отандық деэмульгаторлар жергілікті мұнай кен орындарының ерекшеліктеріне жақсы бейімделіп, қолжетімді әрі жылдам жеткізіледі, бірақ кейбір жағдайларда күрделі эмульсияларды бұзу тиімділігі төмендеуі мүмкін. Сондықтан мұнай өндірісінде деэмульгаторларды таңдау кезінде техникалық, экономикалық және экологиялық факторларды ескеру маңызды.

ҚОСЫМША

Қаржыландыру көзі. Авторлар зерттеуге сыртқы қаржыландыру жоқ екенін мәлімдейді.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар осы мақаланы жариялауға байланысты айқын және ықтимал мүдделер қақтығысының жоқтығын жариялайды.

Авторлардың қосқан үлесі. Барлық авторлар өздерінің авторлығының ICMJE халықаралық критерийлеріне сәйкестігін растайды (барлық авторлар тұжырымдаманы әзірлеуге, зерттеу жүргізуге және мақаланы дайындауға айтарлықтай үлес қосты, жарияланғанға дейін соңғы нұсқасын оқып, мақұлдады). Ең үлкен үлес келесідей бөлінді: Мұқамбетқалиева А.Н. – мақаланың тақырыбын ұсынды және жалпы ғылыми жетекшілік етті; Бисенғалиев М.Д. – әдебиеттерді іздеу және іріктеу жұмыстарын жүргізіп, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындады; Ихсанов К.А. – материалды құрылымдауға және мәтінді редакциялауға қатысты.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declares that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The largest contribution is distributed as follows: Ainash N. Mukambetkaliyeva – author of the article's concept and overall scientific supervisor; Max D. Bissengaliyev – responsible for the literature search, selection of sources, and preparation of the initial manuscript draft; Kayrbek A. Ikhsanov – responsible for structuring the material and editing the text.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Wong S.F., Lim J.S., Dol S.S.* Crude oil emulsion: Are view on formation, classification and stability of water-in-oil emulsion // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2015. Vol. 135. P. 498–504. doi: [10.1016/j.petrol.2015.10.006](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.10.006).
2. *Feitosa F.X., Alves R.S.* Synthesis and application of additives based on cardanol as demulsifier for water-in-oil emulsions // Fuel. 2019. Vol. 245. P. 21–28. doi: [10.1016/j.fuel.2019.02.081](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.081).
3. *Grenoble Z., Trabelsi S.* Mechanisms, performance optimization and new developments in demulsification processes for oil and gas applications // Adv Coll Interface Sci. 2018. Vol. 260. P. 32–45. doi: [10.1016/j.cis.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.08.003).
4. *Pasban A.A., Sadeghpour S., Masoumi M., et al.* Acidity removal of Iranian heavy crude oils by nanofluid demulsifier: an experimental investigation // J. Nano Anal. 2017. No. 4, Issue 01. P. 112–118.
5. *Umar A.A., Saaid I.B.M., Sulaiman A.A., Pilus R.B.M.* A review of petroleum emulsions and recent progress on water-in-crude oil emulsions stabilized by natural surfactants and solids // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 165. P. 673–690. doi: [10.1016/j.petrol.2018.03.014](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.014).
6. *Zolfaghari R., Fakhru'l-Razi A., Abdullah L.C., et al.* Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry // Sep Purif Technol. 2016. Vol. 170. P. 377–407. doi: [10.1016/j.seppur.2016.06.026](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.026).
7. *Liu M., Cao X., Zhu Y.W., et al.* The effect of demulsifier on the stability of liquid droplets: A study of micro-force balance. Journal of Molecular Liquids. 2019. Vol. 275. P. 157–162. doi: [10.1016/j.molliq.2018.11.094](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.094).
8. *Sun H., Wang Q., Li X., He X.* Novel polyether-polyquaternium copolymer as an effective reverse demulsifier for O/W emulsions: Demulsification performance and mechanism // Fuel. 2020. Vol. 263. doi: [10.1016/j.fuel.2019.116770](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116770).
9. *Abdulredha M.M., Hussain S.A., Abdullah L.C.* Optimization of the demulsification of water in oil emulsion via non-ionic surfactant by the response surface methods // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 184. doi: [10.1016/j.petrol.2019.106463](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106463).
10. *Hazrati N., Beigi A., Abdouss M.* Demulsification of water in crude oil emulsion using long chain imidazolium ionic liquids and optimization of parameters // Fuel. 2018. Vol. 229. P. 126–134. doi: [10.1016/j.fuel.2018.05.010](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.010).

11. Zhang X., He C., Zhou J., et al. Demulsification of water-in-heavy oil emulsions by oxygen-enriched non-ionic demulsifier: Synthesis, characterization and mechanisms // *Fuel*. 2023. Vol. 338. doi: [10.1016/j.fuel.2022.127274](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127274).
12. Wang D., Yang D., Huang C., et al. Stabilization mechanism and chemical demulsification of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry: A review // *Fuel*. 2021. Vol. 286. doi: [10.1016/j.fuel.2020.119390](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119390).
13. Belhaj A.F., Elraies K.A., Alnarabiji M.S., et al. Experimental investigation, binary modelling and artificial neural network prediction of surfactant adsorption for enhanced oil recovery application // *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 406. doi: [10.1016/j.cej.2020.127081](https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127081).
14. Ma J., Li X., Zhang X., Sui H., et al. A novel oxygen-containing demulsifier for efficient breaking of water-in-oil emulsions // *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 385. doi: [10.1016/j.cej.2019.123826](https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123826).
15. Fuentes J.V., Zamora E.B., Li Z., et al. Alkylacrylic-carboxyalkylacrylic random bipolymers as demulsifiers for heavy crude oils // *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 256. doi: [10.1016/j.seppur.2020.117850](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117850).
16. Xu H., Li Z., Wang C., et al. Synthesis and application of amphiphilic copolymer as demulsifier for super heavy oil emulsions // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023. Vol. 669. doi: [10.1016/j.colsurfa.2023.131498](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131498).
17. Abdulrahim A.M. Green polymeric surface active agents for crude oil demulsification // *Journal of Molecular Liquids*. 2018. Vol. 271. P. 329–341. doi: [10.1016/j.molliq.2018.08.153](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.153).
18. Wang Z., Li N., Sun Z., et al. Molecular dynamics study of droplet electrocoalescence in the oil phase and the gas phase. Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 278. doi: [10.1016/j.seppur.2021.119622](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119622).
19. Dong H., Liu Y., Zhou Y., et al. Mechanism investigation of coalescence behaviors of conducting droplets by molecular dynamics simulations // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019. Vol. 570. P. 55–62. doi: [10.1016/j.colsurfa.2019.03.014](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.03.014).
20. Yan L., Xia X., Ma J., et al. Esterified polyether demulsifier efficiently breaking water-in-heavy oil emulsions at low temperature. Separation and Purification Technology. 2025. Vol. 374. doi: [10.1016/j.seppur.2025.133678](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133678).
21. Seidy-Esfahlan M., Tabatabaei-Nezhad S.A., Khodapanah E. Comprehensive review of enhanced oil recovery strategies for heavy oil and bitumen reservoirs in various countries: Global perspectives, challenges, and solutions // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Issue 18. doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e37826](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37826).
22. Li J., Duan M., Nie M., et al. Synthesis of Multibranched Polyacrylate Demulsifiers via RAFT Polymerization and Investigation of Their Demulsification Performance Under Coupled Electric Field Conditions // *Journal of Applied Polymer Science*. 2025. Vol. 142, Issue 37. doi: [10.1002/app.57445](https://doi.org/10.1002/app.57445).
23. Wang X., Zhang Z., Zhang Y., et al. Study on association behavior and solution properties of poly(acrylic acid-alkyl polyoxyethylene acrylate) amphiphilic copolymers // *Iranian Polymer Journal*. 2024. Vol. 33. P. 943–953. doi: [10.21203/rs.3.rs-2649576/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2649576/v1).
24. Politova N., Tcholakova S., Denkov N.D. Factors affecting the stability of water-oil-water emulsion films // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017. Vol. 522. P. 608–620. doi: [10.1016/j.colsurfa.2017.03.055](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.03.055).
25. Grenoble Z., Trabelsi S. Mechanisms, performance optimization and new developments in demulsification processes for oil and gas applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2018. Vol. 260. P. 32–45. doi: [10.1016/j.cis.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.08.003).
26. Dong X., Liu H., Chen Z. Chapter 2 – Existing problems for steam-based enhanced oil recovery processes in heavy oil reservoirs // *Developments in Petroleum Science*. 2021. Vol. 73. P. 47–98. doi: [10.1016/B978-0-12-823954-4.00005-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823954-4.00005-9).
27. Lang Ch., Han B., Zou H., et al. Characterization of Hydrate Formation and Flow Influenced by Hydrophilic–Hydrophobic Components within a Fully Visual Rocking Cell // *Energy & Fuels*. 2024. Vol. 38, Issue 5. P. 3670–3681. doi: [10.1021/acs.energyfuels.3c04492](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c04492).
28. Xu R., Feng Y., Yan W., et al. Review and Perspectives of Anionic Dispersants for Coal–Water Slurry // *Energy & Fuels*. 2023. Vol. 37, Issue 7. P. 4816–4834. doi: [10.1021/acs.energyfuels.2c03938](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03938).
29. Alvarado J.G., Delgado-Linares J.D., Forgiarini A.M., Salager J.-L. Breaking of Water-in-Crude Oil Emulsions. 8. Demulsifier Performance at Optimum Formulation Is Significantly Improved by a Small Aromatic Content of the Oil // *Energy & Fuels*. 2019. Vol. 33, Issue 3. P. 1928–1936. doi: [10.1021/acs.energyfuels.8b03994](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b03994).
30. Tang L., Wang T., Xu Y., et al. Research and Application Progress of Crude Oil Demulsification Technology // *Processes*. 2024. Vol. 12, Issue 10. doi: [10.3390/pr12102292](https://doi.org/10.3390/pr12102292).

REFERENCES

1. Wong SF, Lim JS, Dol SS. Crude oil emulsion: Are view on formation, classification and stability of water-in-oil emulsion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015;135:498–504. doi: [10.1016/j.petrol.2015.10.006](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.10.006).
2. Feitosa FX, Alves RS. Synthesis and application of additives based on cardanol as demulsifier for water-in-oil emulsions. *Fuel*. 2019;245:21–28. doi: [10.1016/j.fuel.2019.02.081](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.081).
3. Grenoble Z, Trabelsi S. Mechanisms, performance optimization and new developments in demulsification processes for oil and gas applications. *Adv Coll Interface Sci*. 2018;260:32–45. doi: [10.1016/j.cis.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.08.003).
4. Pasban AA, Sadeghpour S, Masoumi M, et al. Acidity removal of Iranian heavy crude oils by nanofluid demulsifier: an experimental investigation. *J. Nano Anal*. 2017;4(01):112–118.
5. Umar AA, Saaid IBM, Sulaiman AA, Pilus RBM. A review of petroleum emulsions and recent progress on water-in-crude oil emulsions stabilized by natural surfactants and solids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;165:673–690. doi: [10.1016/j.petrol.2018.03.014](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.014).
6. Zolfaghari R, Fakhru'l-Razi A, Abdullah LC, et al. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry. *Sep Purif Technol*. 2016;170:377–407. doi: [10.1016/j.seppur.2016.06.026](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.026).
7. Liu M, Cao X, Zhu YW, et al. The effect of demulsifier on the stability of liquid droplets: A study of micro-force balance. *Journal of Molecular Liquids*. 2019;275:157–162. doi: [10.1016/j.molliq.2018.11.094](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.094).
8. Sun H, Wang Q, Li X, He X. Novel polyether-polyquaternium copolymer as an effective reverse demulsifier for O/W emulsions: Demulsification performance and mechanism. *Fuel*. 2020;263:116770. doi: [10.1016/j.fuel.2019.116770](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116770).
9. Abdulredha MM, Hussain SA, Abdullah LC. Optimization of the demulsification of water in oil emulsion via non-ionic surfactant by the response surface methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020;184:106463. doi: [10.1016/j.petrol.2019.106463](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106463).

10. Hazrati N, Beigi A, Abdouss M. Demulsification of water in crude oil emulsion using long chain imidazolium ionic liquids and optimization of parameters. *Fuel*. 2018;229:126–134. doi: [10.1016/j.fuel.2018.05.010](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.010).
11. Zhang X, He C, Zhou J, et al. Demulsification of water-in-heavy oil emulsions by oxygen-enriched non-ionic demulsifier: Synthesis, characterization and mechanisms. *Fuel*. 2023;338:127274. doi: [10.1016/j.fuel.2022.127274](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127274).
12. Wang D, Yang D, Huang C, et al. Stabilization mechanism and chemical demulsification of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry: A review. *Fuel*. 2021;286:119390. doi: [10.1016/j.fuel.2020.119390](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119390).
13. Belhaj AF, Elraies KA, Alnarabji MS, et al. Experimental investigation, binary modelling and artificial neural network prediction of surfactant adsorption for enhanced oil recovery application. *Chemical Engineering Journal*. 2021;406:127081. doi: [10.1016/j.cej.2020.127081](https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127081).
14. Ma J, Li X, Zhang X, Sui H, et al. A novel oxygen-containing demulsifier for efficient breaking of water-in-oil emulsions. *Chemical Engineering Journal*. 2020;385:123826. doi: [10.1016/j.cej.2019.123826](https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123826).
15. Fuentes JV, Zamora EB, Li Z, et al. Alkylacrylic-carboxyalkylacrylic random bipolymers as demulsifiers for heavy crude oils. *Separation and Purification Technology*. 2021;256:117850. doi: [10.1016/j.seppur.2020.117850](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117850).
16. Xu H, Li Z, Wang C, et al. Synthesis and application of amphiphilic copolymer as demulsifier for super heavy oil emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023;669:131498. doi: [10.1016/j.colsurfa.2023.131498](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131498).
17. Abdulraheim AM. Green polymeric surface active agents for crude oil demulsification. *Journal of Molecular Liquids*. 2018;271:329–341. doi: [10.1016/j.molliq.2018.08.153](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.153).
18. Wang Z, Li N, Sun Z, et al. Molecular dynamics study of droplet electrocoalescence in the oil phase and the gas phase. *Separation and Purification Technology*. 2021;278:119622. doi: [10.1016/j.seppur.2021.119622](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119622).
19. Dong H, Liu Y, Zhou Y, et al. Mechanism investigation of coalescence behaviors of conducting droplets by molecular dynamics simulations. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019;570:55–62. doi: [10.1016/j.colsurfa.2019.03.014](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.03.014).
20. Yan L, Xia X, Ma J, et al. Esterified polyether demulsifier efficiently breaking water-in-heavy oil emulsions at low temperature. *Separation and Purification Technology*. 2025;374:133678. doi: [10.1016/j.seppur.2025.133678](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133678).
21. Seidy-Esfahlan M, Tabatabaei-Nezhad SA, Khodapanah E. Comprehensive review of enhanced oil recovery strategies for heavy oil and bitumen reservoirs in various countries: Global perspectives, challenges, and solutions. *Heliyon*. 2024;10(18):e37826. doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e37826](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37826).
22. Li J, Duan M, Nie M, et al. Synthesis of Multibranched Polyacrylate Demulsifiers via RAFT Polymerization and Investigation of Their Demulsification Performance Under Coupled Electric Field Conditions. *Journal of Applied Polymer Science*. 2025;142(37). doi: [10.1002/app.57445](https://doi.org/10.1002/app.57445).
23. Wang X, Zhang Z, Zhang Y, et al. Study on association behavior and solution properties of poly(acrylic acid-alkyl polyoxyethylene acrylate) amphiphilic copolymers. *Iranian Polymer Journal*. 2024;33:943–953. doi: [10.21203/rs.3.rs-2649576/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2649576/v1).
24. Politova N, Tcholakova S, Denkov ND. Factors affecting the stability of water-oil-water emulsion films. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017;522:608–620. doi: [10.1016/j.colsurfa.2017.03.055](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.03.055).
25. Grenoble Z, Trabelsi S. Mechanisms, performance optimization and new developments in demulsification processes for oil and gas applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2018;260:32–45. doi: [10.1016/j.cis.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.08.003).
26. Dong X, Liu H, Chen Z. Chapter 2 – Existing problems for steam-based enhanced oil recovery processes in heavy oil reservoirs. *Developments in Petroleum Science*. 2021;73:47–98. doi: [10.1016/B978-0-12-823954-4.00005-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823954-4.00005-9).
27. Lang Ch, Han B, Zou H, et al. Characterization of Hydrate Formation and Flow Influenced by Hydrophilic–Hydrophobic Components within a Fully Visual Rocking Cell. *Energy & Fuels*. 2024;38(5):3670–3681. doi: [10.1021/acs.energyfuels.3c04492](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c04492).
28. Xu R, Feng Y, Yan W, et al. Review and Perspectives of Anionic Dispersants for Coal–Water Slurry. *Energy & Fuels*. 2023;37(7):4816–4834. doi: [10.1021/acs.energyfuels.2c03938](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03938).
29. Alvarado JG, Delgado-Linares JD, Forgiarini AM, Salager J-L. Breaking of Water-in-Crude Oil Emulsions. 8. Demulsifier Performance at Optimum Formulation Is Significantly Improved by a Small Aromatic Content of the Oil. *Energy & Fuels*. 2019;33(3):1928–1936. doi: [10.1021/acs.energyfuels.8b03994](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b03994).
30. Tang L, Wang T, Xu Y, et al. Research and Application Progress of Crude Oil Demulsification Technology. *Processes*. 2024;12(10). doi: [10.3390/pr12102292](https://doi.org/10.3390/pr12102292).

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

***Мұқамбетқалиева Айнаш Нурболатовна**

ORCID [0009-0003-8922-3613](https://orcid.org/0009-0003-8922-3613)

e-mail: ainashmukambetkaliyeva@gmail.com.

Бисенғалиев Макс Даулбаевич

т.ғ.к., қауымдастырылған профессор

ORCID [0000-0002-4776-2251](https://orcid.org/0000-0002-4776-2251)

e-mail: maks_bisengali@mail.ru.

Ихсанов Кайрбек Айтжанович

т.ғ.к., қауымдастырылған профессор

ORCID [0000-0003-4284-9048](https://orcid.org/0000-0003-4284-9048)

e-mail: ikhсанov_k@mail.ru.

AUTHORS' INFO

***Ainash N. Mukambetkaliyeva**

ORCID [0009-0003-8922-3613](https://orcid.org/0009-0003-8922-3613)

e-mail: ainashmukambetkaliyeva@gmail.com.

Max D. Bissengaliyev

Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor

ORCID [0000-0002-4776-2251](https://orcid.org/0000-0002-4776-2251)

e-mail: maks_bisengali@mail.ru.

Kayrbek A. Ikhsanov

Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor

ORCID [0000-0003-4284-9048](https://orcid.org/0000-0003-4284-9048)

e-mail: ikhсанov_k@mail.ru.

*Корреспондент автор / Corresponding Author