

# **AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI**

*Əlyazması hüququnda*

## **MÜRƏKKƏB REOFİZİKİ SİSTEMLƏRİN ÇIXARILMASI VƏ NƏQLİ ÜZRƏ TEXNOLOJİ PROSESLƏRİN SƏMƏRƏLİLİYİNİN ARTIRILMASI ÜÇÜN ELMI ƏSASLARIN İŞLƏNMƏSİ**

**İxtisas:** 2526.01 - Dəniz faydalı qazıntı yataqlarının işlənməsi  
texnologiyası

**Elm sahəsi:** Texnika elmləri

**İddacı:** Mustafayeva Gülşən Rəsul qızı

Texnika elmləri doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün  
təqdim edilmiş dissertasiyanın

### **AVTOREFERATI**

**Bakı – 2025**

Dissertasiya işi SOCAR-ın "Neftqazəlmətdəqiqatlayihə" İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi  
məsləhətçilər:

AMEA-nın müxbir üzvi, texnika elmləri  
doktoru, professor

**Tulparxan Şarabudinoviç Salavatov**

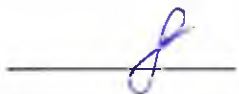
texnika elmləri doktoru, professor  
**Sakit Rauf oğlu Rəsulov**

Rəsmi  
opponentlər

Texnika elmləri doktoru, dosent  
**Hacan Qulu oğlu Hacıyev**  
Texnika elmləri doktoru, professor  
**Mübariz Mustafa oğlu Vəliyev**  
Texnika elmləri doktoru  
**Vüqar Məhərrəm oğlu Fətəliyev**  
Texnika elmləri doktoru, dosent  
**Mübariz Sevdimalı oğlu Xəlilov**

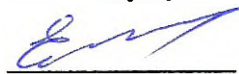
Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya  
Komissiyasının Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin  
nəzdində fəaliyyət göstərən BED 2.03 Dissertasiya Şurası

Dissertasiya şurasının sədri:



Texnika elmlər doktoru, dosent  
**Arif Ələkbər oğlu Süleymanov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi:



Texnika elmləri namizədi, dosent  
**Yelena Yevgenyevna Şmonçeva**

Elmi seminarın sədri:



AMEA-nın müxbir üzvi, texnika üzrə  
elmlər doktoru, professor  
**Qarib İsaq oğlu Calalov**

**İmzaları təsdiq edirəm:**

ADNSU-nun

Elmi katibi:

Texnika elmləri namizədi, dosent  
**Nəriminə Tərhan qızı Əliyeva**



## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi.** Hazırda neft sənayesi dünya iqtisadiyyatında mühüm rol oynayır və digər sahələrin inkişafına əhəmiyyətli təsir göstərir. Bir çox dövlətlər, o cümlədən Azərbaycan üçün neft hasilatı və emalı əsas gəlir mənbəyi olaraq qalır. Lakin, neft ehtiyatlarının çıxarılma səviyyəsinin aşağı olması və hasilatın sürətinin azalması əhəmiyyətli bir problemə çevrilmişdir.

Son illərdə yüksək özlülü neftlərin hasilatına daha çox diqqət yetirilir. Bu neftlər qeyri-nyuton xassələrinə malikdir və aşağı hərəkətlilik qabiliyyəti ilə xarakterizə olunur ki, bu da onların hasilatını və daşınmasını çətinləşdirir. Hazırda bu növ neftlərin hasilatı üzrə mövcud texnologiyalar yüksək kapital xərclərinə görə geniş tətbiq olunmamışdır.

Hasil olunmayan qalıq neft ehtiyatları ilkin geoloji ehtiyatların 55%-dən 75%-ə qədərini təşkil edə bilər ki, bu da onların səmərəli hasilatı üçün yeni üsulların işlənilib hazırlanmasının zəruriliyini vurğulayır.

Dəniz yataqlarında neft və qaz hasilatı zamanı məhsullarda qum, parafin və digər qarışıqların mövcudluğu ilə bağlı əlavə çətinliklər yaranır. Bu amillər asfalt-qətran-parafin çöküntülərinin (AQPÇ) əmələ gəlməsinə səbəb ola bilər ki, bu da istismarın çətinləşməsinə və və tez-tez təmir işlərinə ehtiyac yaranmasına gətirib çıxarır.

AQPÇ müəyyən şərtlərdə kristallaşma qabiliyyətinə malikdir, bu da neftin hərəkətini çətinləşdirir və hətta boru kəmərlərinin tutulmasına səbəb ola bilər. Bu faktorlar dəniz neft yataqlarının layihələndirilməsi və istismarı zamanı, xüsusən də məhdud hərəkətlilik və xarici təsirlərin olduğu şəraitdə əlavə çətinliklər yaradır. Nəticədə, hasil olunan məhsulların reoloji xassələri ilə bağlı problemlər yaranır.

Neftin tərkibindəki AQPÇ, onun reoloji xassələrini əhəmiyyətli dərəcədə dəyişdirir, axıcılığını pisləşdirir və nəql prosesinə təsir edir. Bu problemi uğurla həll etmək üçün həm üfüqi, həm də şaquli axınlarda bərk hissəciklərin, damcıların və qabarcıqların hərəkət xüsusiyyətlərini, eləcə də neft sistemlərinin ayrılması, təbəqələşməsi və təsnifatı proseslərini nəzərə almaq vacibdir.

Bundan əlavə, məhsulun nəqli və yığılması ilə bağlı çətinliklər dəniz yataqlarının relyef şəraiti ilə daha da artır. Burada hasilat quyuları və məhsul yığma məntəqələri müxtəlif platformalarda yerləşir, nəqliyyat kollektorları isə tez-tez sualtı sahələrdən keçir ki, bu da əlavə mexaniki və hidrodinamik problemlər yaradır. Belə xüsusiyyətlər boru kəmərlərinin və məhsul yığma sistemlərinin layihələndirilməsi və istismarı işini daha da çətinləşdirir, kütlə və istilik ötürülməsi parametrlərinə, eləcə də axının hidrodinamikasına təsir göstərir.

Bu problemlər birbaşa olaraq neft və qazın hasilatı və nəqli proseslərinin səmərəliliyinə təsir edir. Buna görə də, bu proseslərin səmərəliliyini artırmaq üçün reoloji xüsusiyyətləri, həmçinin dəniz şəraiti və nəql texnologiyalarının spesifikasiyini nəzərə alan kompleks həllərin hazırlanması zəruridir.

Yuxarıda qeyd olunan problemləri nəzərə alaraq, neft və qazın hasilatı, yığılması və nəqli üzrə texnoloji proseslərin səmərəliliyinin artırılması üçün elmi əsasların və praktiki tövsiyələrin işlənilib hazırlanması, xüsusilə də çətin çıxarılan və yüksək özlülüyə malik neftlərlə işləməyin çətinliyini, eləcə də neft axınlarının reoloji xüsusiyyətlərini yaxşılaşdırmaq məqsədilə yeni üsulların işlənilib hazırlanması aktual bir vəzifə kimi qarşıda durur.

**Tədqiqatın obyektı** mürəkkəb reofiziki sistemlər və onlarda baş verən proseslərdir. Qətran, asfalt və parafinlərin əhəmiyyətli miqdarda olduğu strukturlu neftlərin davranış xüsusiyyətləri öyrənilir və bu proseslər xətti və qeyri-xətti diferensial tənliklər formasında təsvir olunan riyazi modellərlə ifadə edilir. **Tədqiqatın predmeti** mürəkkəb reofiziki sistemlərin hasilatı və nəqli zamanı yaranan problemlər, eləcə də onların reoloji xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi və xam neft resurslarının hasilat səviyyəsinin artırılması ilə bağlı məsələlərdir.

**Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri** neft yataqlarının təbəqə sistemlərində neftlərin süzülmə və strukturlaşma proseslərinin riyazi modellərinin qurulması, strukturlu neftlərin reoloji xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi yolu ilə mürəkkəb reofiziki sistemlərin hasilatı və nəqli üzrə texnoloji proseslərin səmərəliliyini artırmaq üçün elmi əsasların işlənilib hazırlanmasıdır.

Qarşıya qoyulan məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:

1. Xam neft ehtiyatlarının çıxarılma səviyyəsini artırmaq sahəsində təcrübənin təhlili və ümumiləşdirilməsi. Neft yatağının ən əhəmiyyətli parametrlərinin qiymətləndirilməsi və seçilməsi, həmçinin hasilat proseslərinin təsvir edilməsi üçün müvafiq riyazi modellərin qurulması.

2. Neft və neft məhsullarının nəqli ilə bağlı reoloji xüsusiyyətlərdən irəli gələn problemlərin araşdırılması. Neft emulsiyasının boru kəmərləri vasitəsilə neft hazırlama qurğularına qədər səmərəli nəqli metodlarının işlənilib hazırlanması, neft emulsiyasının axınının xarakteristikalarının hesablanması üçün riyazi modellərin yaradılması.

3. Neft-qaz hasilatı vəziyyətinin qiymətləndirilməsi və yataqların istismar səmərəliliyini qiymətləndirmə üsullarının işlənilib hazırlanması üçün riyazi modellərin yaradılması.

4. Neftin məsaməli mühitlərdə süzülməsi proseslərinin riyazi modelləşdirilməsi. Tərkibindəki qarışıqların və asfalt-qətranlı maddələrin məsamə səthində çökməsi ilə əlaqədar neft yatağının sıxlaşma modelinin yaradılması, həmçinin qeyri-nyuton neftlərin qeyri-stasionar süzülməsi modelinin işlənməsi. Neft yataqlarının süzülmə xüsusiyyətlərinin müəyyən edilməsi və neft tullantı sularının asfaltlənərdən təmizlənməsi texnologiyasının işlənilib hazırlanması.

5. Məsaməli mühitlərdə neft süzülməsi tənliklərinin qeyri-xətti xüsusiyyətlərinin araşdırılması, bu qeyri-xətti tənliklərin Reynold ədədindən asılılığı və Darsi ədədinin dəyişmə zonaları üçün təsvir modellərinin işlənilib hazırlanması.

6. Çökdürücü qurğunun aralıq emulsiya qatında baş verən proseslərin riyazi modelləşdirilməsi. Təbii emulqatorların emulsiya olunmuş su damcısının səthində fiziki-kimyəvi adsorbsiyası, qoruyucu qatların islanması, emulsiyalı su damcısının səthində və mexaniki qarışıqlarda ikili elektrik qatının yaranması proseslərinin tədqiq edilməsi. Neft emulsiyasının yaranma və parçalanma proseslərinin riyazi modellərinin qurulması.

7. Neftdən parafinlərin kristallaşması və boru kəmərlərinin divarlarında asfalt-qətran maddələrin çökməsinin diffuziya modelinin

hazırlanması. Diffuziya-miqrasiya və kristallaşma proseslərinin, habelə çöküntü qalınlığının axının hidrodinamik və istilik-kütlə mübadiləsi parametrlərinə təsirinin tədqiq edilməsi.

8.Strukturlu neftlərin əsas parametrlərinin araşdırılması və onların davranışını təsvir edən modellərin yaradılması. Strukturlaşma nəzərə alınmaqla reoloji dispers sistemlərin özlülüyünün hesablanması üçün modellərin işlənilib hazırlanması.

**Tədqiqat metodları.** Təklif olunan işdə qoyulmuş məsələlər suspenziya və emulsiyalarda hissəciklərin ayrılması və çökmə proseslərinin struktur-sistem təhlili, dispers mühitlərdə hidrodinamika və kütlə ötürülməsi üsulları, strukturlu neft dispers sistemlərinin reologiyası və neft emulsiyalarının ayrılma proseslərində fiziki-kimyəvi hadisələrin modelləşdirilməsi vasitəsilə həll edilmişdir.

#### **Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar.**

- 1.Strukturlu neftlərin reofiziki xüsusiyyətləri.
- 2.Neft yatağının vəziyyətinin qiymətləndirilməsi.
- 3.Asfaltenlərin çökməsi və neftin qeyri-stasionar süzülməsi nəzərə alınmaqla neftin məsaməli mühitlərdə süzülmə və strukturlaşma proseslərinin modelləşdirilməsi.
- 4.Neft emulsiyasının yaranma və parçalanma proseslərinin riyazi modelləri, polidispers sistemlərdə hissəciklərin toqquşma tezliyinin müəyyən edilməsi, həmçinin fiziki sahələrin və termodinamik sistemlərin su-neft emulsiyalarının xassələrinə təsiri.
- 5.Neft axını zamanı asfalt-qətran maddələrin boru divarlarına çökməsinin tədqiqi, diffuziya-miqrasiya, kristallaşma, kinetik və dinamik proseslər əsasında bərk fazanın yaranma və çökmə mexanizmlərinin müəyyən edilməsi.

6.Strukturlu neftlərin əsas parametrlərinin tədqiqi nəticəsində eksperimental məlumatları qənaətbəxş şəkildə təsvir edən yarıempirik xarakterli reoloji modellər.

#### **Tədqiqatın elmi yəniliyi.**

1.Neftlərin lay sistemlərində süzülmə və strukturlaşma proseslərinin yeni riyazi modelləri hazırlanmışdır. Bu modellər, neftin boşluqdan keçmə vaxtından asılı olaraq onun özlülüyünün dəyişmə dinamikasını təsvir edir. Modellər eksponensial xarakterə malikdir və

karbohidrogen ehtiyatlarının çıxarılmasının artırılması məsələlərinin həlli üçün istifadə oluna bilər.

2. Hissəciklərin ölçülərinin paylanma funksiyasını nəzərə alaraq, toqquşma tezliyinin müəyyən edilməsi üçün model yaradılmışdır. Model dispers fazanın paylanmasının toqquşma tezliklərinə təsirini nəzərə almağa imkan verir ki, bu da neft sistemlərindəki proseslərin modelləşdirilməsi üçün əhəmiyyətlidir.

3. Turbulent axınlar üçün neft emulsiyasında su damcılarının koalesensiyası və parçalanma proseslərini təsvir edən modellər hazırlanmışdır. Bu modellər damcı ölçülərinin dəyişməsinə və onların “neft-su” maye fazalarının ayrılması prosesinə təsirini izah etməyə imkan verir.

4. Məsələli mühitdə neftlərin süzülmə məsələləri həll edilmiş və müəyyən edilmişdir ki, koagulyasiya strukturları (aqreqatlar və klasterlər) şəklində yaranan asfaltenlər neftin reoloji xassələrinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir. Məsələli mühit səthində asfaltenlərin çökməsi onun məsələliliyini dəyişir, bu da qayunun debitinin dalğalı şəkildə azalmasına və strukturun sıxlaşmasına səbəb olur.

5. Müxtəlif aromatik karbohidrogenlərdə asfaltenlərin həllolma analizinə əsaslanaraq əhəmiyyətli ekoloji problemin həlli - çirkab suların asfaltenlərdən və bərk hissəciklərdən təmizlənməsi və ayrılması texnologiyası təklif edilmişdir. Koalesensiya və parçalanma hadisələrindən, “maye-maye” sistemlərində kütlə ötürülməsi və eksperimental tədqiqatlardan istifadə etməklə maye fazalı ekstraksiya texnologiyası işləni hazırlanmışdır.

6. Məsələli mühitdə neftin qeyri-stasionar süzülmə tənliyinin məhdud sahə üçün həlli təklif edilmişdir. Pyezo keçiricilik və məsələli mühitin keçiricilik əmsallarını qiymətləndirmək üçün alqoritmlər hazırlanmışdır ki, bu da neft hasilatı şəraitində süzülmə proseslərinin daha dəqiq modelləşdirilməsinə imkan verir.

7. Dispers axından hissəciklərin çökmə mexanizmlərini təsvir edən riyazi modellər hazırlanmışdır. Bu modellərin eksperimental məlumatlarla müqayisəsi göstərmişdir ki, boru divarlarında hissəciklərin sıx təbəqələrinin yaranması kütlə və istilik ötürülməsi hadisələrinə əhəmiyyətli təsir göstərir.

8.Aromatik həlledicilərdə asfalt-qətran maddələrinin temperaturdan asılı olan həllolma prosesini təsvir edən kinetik model yaradılmışdır. Model izotrop turbuləntlik şəraitində və sərhəd təbəqə daxilində kütlə ötürülməsini nəzərə alınmaqla hazırlanmışdır ki, bu da həll olunan maddənin konsentrasiya paylanması üçün müxtəlif növləri üçün həllolma kinetikasını və əmsallarını müəyyən etməyə imkan verir.

9.Strukturlaşdırılmış dispers sistemlərin reoloji xassələrini nəzərə alaraq, özlülüyün hesablanması üçün ümumiləşdirilmiş tənlik təklif edilmişdir. Strukturlaşmanın ilkin mərhələlərində özlülük əyrisinin xüsusiyyətləri müəyyən edilmişdir ki, bu da müxtəlif dispers hissəcikləri olan neft sistemlərinin davranışını daha dəqiq modelləşdirməyə imkan verir.

10.Özlülüyün hissəciklərin həcm payından asılılığını təsvir edən model hazırlanmışdır. Bu model əsasında müəyyən edilmişdir ki, hissəciklərin yavaş koagulyasiyası zamanı dispers sistemin effektiv özlülüğü koagulyasiya vaxtından asılıdır. Bu isə neft hasilatı və nəqli prosesləri üçün praktik əhəmiyyətə malikdir.

11.Asfalten hissəciklərinin molekulyar və turbulent diffuziyasını nəzərə alaraq nanoaqreqatların ölçülərinin və kütlələrinin zamanla dəyişməsinə qiymətləndirməyə imkan verən modellər hazırlanmışdır. Maksvell tənliklərinin həllinə əsaslanan süzülmə və reologiya modelləri təklif edilmişdir. Temperaturdan asılı olaraq, neftin effektiv özlülüyünü və hərəkətiliyini qiymətləndirmək üçün tənliklər əldə edilmişdir.

**Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti.** Bu işdə əldə olunan nəticələr strukturlu neft dispers sistemlərində hidrodinamika və kütlə ötürülməsi, eləcə də məsaməli mühitlərdə neftlərin süzülməsi məsələləri ilə məşğul olan mütəxəssislər tərəfindən aşağıdakı hallarda istifadə oluna bilər:

- dispers mühitlərdə baş verən əsas hadisələrin struktur-sistem analizinin aparılmasında;
- asfalten hissəciklərinin məsamələrdə, borularda və neft emulsiyalarındakı su damcılarının səthində diffuziya ilə çökməsi məsələlərinin həllində;

- aqreqativ və sedimentativ qeyri-sabit sistemlərə, borulardakı turbulent axınlara, mühitdə strukturlaşma proseslərinə və hissəciklərin zamanla paylanmasının təkamülünə yanaşmada;

- qeyri-nyuton neftlərinin reologiyası məsələlərinin və neft emulsiyalarının təbəqəyə ayrılma proseslərinin modelləşdirilməsində.

Dissertasiya işində təklif olunan elmi müddəalar mürəkkəb reofiziki sistemlərin hasilatı və nəqli üzrə texnoloji proseslərin səmərəliliyinin artırılması zamanı istifadə oluna bilər. Bu işdə əldə olunan nəticələr əsasən G.İ. Kəlbəliyev, S.R. Rəsulov, D.B. Tağıyev və G.R. Mustafayevanın “Neft dispers sistemlərinin mexanikası və reologiyası” adlı monoqrafiyasında öz əksini tapmışdır. Monoqrafiya Moskva şəhərində “Maska” nəşriyyatında 2017-ci ildə nəşr olunmuşdur (462 səhifə). Bu kitab əsasında Kazan Federal Universiteti tərəfindən magistr hazırlığı üzrə “Neft dispers sistemlərinin reoloji analizinin əsasları” fənni üçün tədris proqramı hazırlanmışdır və qeyd olunan monoqrafiya əsas dərs vəsaiti kimi qəbul edilmişdir (bax əlavəyə).

**Aprobasiyası və tətbiqi.** Dissertasiyanın əsas nəticələri aşağıdakı beynəlxalq konfranslarda məruzə edilmiş və müzakirə edilmişdir:

- akademik A.X. Mirzəcanzadənin xatirəsinə həsr edilmiş beynəlxalq elmi-texniki konfransı (Ufa şəhəri, 2016, səh. 295-297);

- Tatarıstan Respublikasında ali neft-qaz təhsilinin 60 illiyinə həsr olunmuş beynəlxalq elmi-praktik konfransı (Almetyevsk şəhəri, 2016, səh. 40-43);

- “Rassoxin oxunuşları” beynəlxalq konfransı (Uxta şəhəri, 2017, I hissə, səh. 231-234);

- “Ağır neftin hasilatı, nəqli və emalı problemləri” mövzusunda elmi-texniki konfransı (Uxta şəhəri, 2021, səh. 149-153).

SOCAR “Neftqazəlmətdəqiqatlayihə” İnstitutu tərəfindən dissertasiya işində əldə olunan nəticələrin neft-qaz kompleksində texnoloji proseslərinin hesablanması və layihələndirilməsi zamanı tətbiqinin məqsədəuyğun olduğunu təsdiq edən arayış təqdim edilmişdir.

**Elmi işlərin nəşri.** Dissertasiya işinin əsas nəticələri 35 elmi işdə əks olunmuşdur ki, onlardan 10 məqalə Web of Science və Scopus

beynəlxalq indeksləşmə bazalarına daxil olan jurnallarda nəşr olunmuş, bir monoqrafiya isə Moskva şəhərində nəşr edilmişdir.

**Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı.**

Dissertasiya işi SOCAR “Neftqazəlmətdəqiqatlayihə” İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

**Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi.** Dissertasiya işi giriş, 6 fəsil, əsas nəticələr və 283 ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Cədvəllər, şəkillər və ədəbiyyat siyahısı ilə birlikdə dissertasiya 407 səhifədən ibarətdir. Giriş hissəsi 14008 işarə, I fəsil 81065 işarə, II fəsil 24398 işarə, III fəsil 59351 işarə, IV fəsil 96927 işarə, V fəsil 65037 işarə, VI fəsil 63250 işarədən ibarətdir. Dissertasiyanın ümumi həcmi 408811 işarə təşkil edir.

## İŞİN ƏSAS MƏZMUNU

**Girişdə** tədqiqatın aktuallığı əsaslandırılmış, işin məqsədi və vəzifələri müəyyən edilmiş, elmi yeniliyi, tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti göstərilmişdir. Müdafiəyə təqdim olunan əsas müddəalar, həmçinin tədqiqatın predmeti, obyektı, metodları, işin həcmi və quruluşu, onun aprobasıyası, fəsilərin qısa məzmunu və əldə edilmiş nəticələrin tətbiq sahələri qeyd edilmişdir.

**Birinci fəsil** dəniz şəraitində quyulardan çıxarılan, yığılan və nəql olunan mürəkkəb heterogen məhsulların hasilatının vəziyyəti və mövcud problemlərin təhlilinə həsr edilmişdir. Aparılmış təhlil əsasında qarşıya qoyulan məsələlər müəyyən edilmiş və reofiziki sistemlərdə baş verən proseslərin təsvir edilməsi üçün riyazi modellərin işlənilməsi hazırlanmasının zəruriliyi göstərilmişdir.

Azərbaycanda neft-qaz sənayesində problemin aktuallığı ondan ibarətdir ki, yataqların əksəriyyəti işlənmənin son mərhələsindədir, bu da yüksək səviyyədə su ilə doyma və aşağı hasilat göstəriciləri ilə xarakterizə olunur. Nəticədə, təbəqələrin neftverimini artırmaq və texnoloji prosesləri təkmilləşdirmək üçün effektiv həllərin axtarılması tələb olunur.

İşdə həm Azərbaycanda, həm də xaricdə neft yataqlarının işlənməsi və neft laylarına təsir üsullarına dair tədqiqatların icmalı təqdim edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, aktiv komponentləri ehtiva edən neftlər aşağı temperaturda dinamik şəraitdə struktur-mexaniki xüsusiyyətlərə malikdir ki, bu da neft yataqlarına soyuq su vurulması prosesinin effektivliyinin azalmasına səbəb olur. Xüsusilə qeyd olunmuşdur ki, su tətbiq edildikdə yataqların işlənməsi və neftin çıxarılması prosesinə təsir edən geoloji-fiziki parametrlər lay neftlərinin reoloji xüsusiyyətlərini, kollektora aid xassələri və layların heterogenliyini müəyyən edir. Bu, çıxarılması çətin olan neft ehtiyatlarına malik yataqların işlənmə səmərəliliyini artırmaq üçün təzyiqləndirmə metodlarının təkmilləşdirilməsinin zəruriliyini vurğulayır.

Daha sonra suyun neft yuma qabiliyyətini artırmaq məqsədilə işlənilən hazırlanmış fiziki-kimyəvi təsir üsulları nəzərdən keçirilmişdir. Bunlar neft-qaz yataqlarının işlənməsi prosesində üçüncü dərəcəli

üsullar kimi, həmçinin yataqların işlənməsinin müxtəlif mərhələlərində işçi agentlərin (su, qaz) təsiri ilə neftverimi əmsalının artırılması üçün tətbiq edilir. Qeyd etmək vacibdir ki, bu üsullar həm ilkin, həm də işlənmənin son mərhələlərində istifadə edilə bilər.

Aparılmış işlərin təhlili zamanı müəyyən edilmişdir ki, əksər tədqiq edilmiş yataqlarda neftin özlülüyünün suyun özlülüyündən yüksək olması və kollektorun heterogenliyi səbəbindən məhsuldar quyuların erkən su ilə dolması baş verir ki, bu da aşağı neftvermə əmsalına səbəb olur. Bununla əlaqədar olaraq, təbəqələrə fiziki-kimyəvi təsir üsulları ilə neftin və suyun hərəkətliliyinə nəzarət etmək, onların reoloji xassələrini və süxurun səthi ilə qarşılıqlı təsirini idarə etməyə yönəldilmişdir.

İş çərçivəsində neft resurslarının çıxarılma səviyyəsinin artırılmasına yönəldilmiş neft yataqlarının işlənməsi üsullarının təhlili aparılmışdır. İlk araşdırılan üsul idarə olunan minerallaşma səviyyəsinə malik suyun vurulması texnologiyasıdır, bu isə neftveriminin artırılması üçün üçüncü dərəcəli üsullara aiddir. Bu üsul süxurun hidrofilizasiyası hesabına neftvermə göstəricilərini artırmağa imkan verir. Lay süxurlarını təşkil edən süxurların mineral tərkibini öyrənmək üçün kern materialı üzərində geniş laboratoriya tədqiqatları aparılmışdır. Gildən ibarət mineralların tərkibi rentgen-struktur analizi ilə müəyyən edilmişdir və bu analiz zamanı su ilə təmasda gil şişməsinə səbəb olan minerallar aşkar edilməmişdir. Lakin qeyd etmək lazımdır ki, bu metodun bir neçə çatışmazlığı mövcuddur. Bunlara yüksək xərclər, layın tükənməsi nəticəsində zamanla effektivliyin azalması, layın tutulma riski, yeraltı su təminatı zamanı ətraf mühitə mənfi təsir, həmçinin əlavə təzyiq nəticəsində baş verə biləcək seysmik hadisələr və geoloji dəyişikliklər daxildir.

İkinci üsul isə mürəkkəb karbonat laylarına və yüksək özlülüyə malik çətin çıxarılan neft ehtiyatlarına təsir göstərən yeni, effektiv kombinə edilmiş və termik texnologiyalarıdır. Bu üsullar neft hasilatı üzrə dünya təcrübəsində analoqa malik deyil və və artıq sənaye səviyyəsində tətbiq edilmişdir. Bunlara aşağıdakılar daxildir:

- maye fazalı oksidləşmə yolu ilə neftveriminin artırılması;
- yüksək özlülüklü neft yataqlarına termo-polimerlərlə təsir;
- laylara impuls-dozalı termik təsir;

- vurucu sistemlərdən istifadə etməklə kombinə edilmiş istilik-tsiklik təsir;

- laydaxili tsiklik termik təsirlər.

Lakin bu metodların da bir sıra çatışmazlıqları mövcuddur, bunlara daxildir:

- layda temperaturun yüksəlməsi - süxurların deformasiya olunmasına və dağılmasına səbəb ola bilər, nəticədə neft və qaz hasilatını çətinləşdirir;

- buxar emissiyaları - ətraf mühitin çirklənməsinə səbəb olaraq ekoloji problemlər yaradır;

- yüksək enerji xərcləri - neft və qaz hasilatının dəyərini artırır;

- reaksiya məhsullarının çöküntü əmələ gətirməsi - quyu tıxanmasına və layın məhsuldarlığının azalmasına gətirib çıxarır.

İşdə neft yataqlarına təsir göstərən kombinə edilmiş üsullar da təhlil edilmişdir ki, onlardan biri də səthi-aktiv maddələrdən (SAM) istifadə etməklə neftveriminin artırılması üçün universal üsuldur. Bu üsul məhsulun su ilə doyma səviyyəsinin artmağa başladığı ilkin mərhələdə effektiv şəkildə istifadə edilə bilər. Bu üsulları istifadə edən layihələr də nəzərdən keçirilmişdir.

Xarici təcrübədə polimerlərdən istifadə etməyə əsaslanan metodlar geniş tətbiq olunur, çünki bu maddələr duzların tərkibinə çox həssasdır və bu da neftin özlülüyünü kəskin şəkildə azaldır. Yaranmış problemlərin həlli üçün qeyri-ion səthi aktiv maddələrdən istifadəsi təklif edilmişdir.

Səthi aktiv maddələrin tətbiqi ilə bağlı üsulun həm üstünlükləri, həm də çatışmazlıqları var. Üstünlüklərə daxildir:

- layların kollektor xüsusiyyətlərinin qorunub saxlanması;

- neftin hazırlanması və nəqli prosesinə mənfi təsirin olmaması;

- “neft-su” sərhədində səthi gərginliyin azalması, bu da neftin keçiriciliyini asanlaşdırır.

Lakin üsulun çatışmazlıqları da vardır, məsələn:

- polimerlərin süxurların səthində yüksək adsorbsiya səviyyəsi;

- polimer məhlulunun neftlə zəif qarışması, bu da sıxışdırma effektivliyini azaldır.

Neftin və neft məhsullarının nəqli zamanı onların reoloji xüsusiyyətləri ilə bağlı problemlər yaranır. Bu problemlərin həlli üçün bərk hissəciklərin, damcıların və qabarcıqların axın içində hərəkət qanunauyğunluqlarını, həmçinin ayrılma, təbəqələşmə və neft sistemlərinin təsnifatını nəzərə almaq vacibdir.

Bu hadisələrin yaranma səbəblərini şərti olaraq bir neçə amilə bölmək olar:

1. Neft sistemlərinin mürəkkəb hidrodinamik strukturu vardır, bu struktur müxtəlif axın istiqamətlərini, həmçinin hidrodinamik və qeyri-hidrodinamik təbiətli fiziki qarşılıqlı təsirləri əhatə edir.

2. Dispers mühitlərdə dispers fazanın hissəcikləri arasında müxtəlif qarşılıqlı təsirlər baş verir, məsələn, koagulyasiya, aqlomerasiya, parçalanma, həmçinin səthlərlə (divar effekti) və daşıyıcı faza ilə qarşılıqlı təsirlər. Bu proseslər hissəciklərin toqquşması, onların deformasiyası, quruluşun dağılması və aşınması ilə müşayiət olunur. Bu hadisələrin intensivliyi axının yüksək turbulentlik səviyyəsində və hissəciklərin yüksək sıxlığında artır.

3. Axında hissəciklərin yüksək sıxlığı zamanı hissəciklərin hidrodinamik sahələri qarşılıqlı təsirlər nəticəsində deformasiyaya uğrayır. Bu, hissəciklərin hərəkətini məhdudlaşdırır və nəticədə koagulyasiya, parçalanma və digər fiziki proseslərə səbəb olur.

4. Dispers fazanın komponentlərinin özlülüyü, sıxlığı, səthi gərginliyi və həllolma, buxarlanma, sublimasiya və kondensasiya kimi fiziki-kimyəvi proseslər sistemdəki hissəciklərin davranışına əhəmiyyətli təsir göstərir.

5. Şaquli və üfüqi kanallarda turbulent axında hissəciklərin diffuziya yolu ilə daşınması və çökməsi baş verir.

6. Hissəciklərin parametrlərinin çevrilməsi və yayılması prosesi, konsentrasiyaların dəyişməsi və hissəciklərin istiqaməti polidispers sistemin stoxastik təbiətinə gətirib çıxarır.

7. Dinamik özlülük - mayenin kəsilmə qüvvələrinin təsiri altında deformasiyaya məruz qalma qabiliyyətini müəyyən edən xassədir. Yüksək kəsilmə özlülüyü dar kanallardan keçid zamanı və ya digər mayelərlə qarışma zamanı çətinliklər yarada bilər.

8. Temperatur şərtləri. Neftin və neft məhsullarının reoloji xassələri temperaturdan asılı olaraq dəyişir. Aşağı temperaturlarda

donma problemləri yarana bilər ki, bu da nəqli çətinləşdirir və boru kəmərlərində tıxanmalara səbəb ola bilər.

Yuxarıda göstərilənlərdən belə nəticə çıxır ki, bu problemi həll etmək üçün hissəciklərin miqrasiyası, çökməsi və ayrılması ilə bağlı bütün proseslərin kompleks tədqiqi tələb olunur.

Tədqiqat işində hissəciklərin turbulent diffuziya əmsalının dinamik sürət və çökmə sürəti nəzərə alınmaqla hesablanması üçün bir sıra ifadələr təqdim edilmişdir. Həmçinin, reofiziki sistemlərdə sedimentasiya mexanizmi təhlil edilmişdir. Müxtəlif tipli bərk hissəciklərin axından çökmə sürətini müəyyən etmək üçün geniş eksperimental məlumatlar təqdim olunmuşdur. Çökmə sürəti üzrə eksperimental və hesablanmış məlumatlar arasında uyğunsuzluq müşahidə olunur, bu da hissəciklərin sıxlığından asılıdır - sıxlıq artdıqca fərq daha da artır.

Aparılmış tədqiqatların icmalı aşağıdakıları göstərir:

1. Eksperimental tədqiqatların və onları təsvir edən formulların çoxluğu, xüsusilə Stoks hissəcikləri istisna olmaqla, hissəciklərin çökmə və üzmə sürətini hesablayan vahid formulun yaradılmasını çətinləşdirir. Bu, hissəciklərin ölçüləri və formalarının dəyişkənliyi, axın tərəfindən əhatə olunması, fiziki hadisələr və müqavimət əmsalının Reynolds ədədindən asılılığı ilə bağlıdır.

2. Hissəciklərin konsentrasiyasındakı dəyişikliklər, onların qeyri-bircins sahələrdə paylanması, eninə sürət dəyişiklikləri və enerji dissipasiyası sedimentasiya proseslərinin stoxastik olmasına gətirib çıxarır. Bu problemin həlli üçün xüsusi empirik yanaşmadan istifadə tələb olunur.

3. Borularda və kanallardakı izotrop turbulent axınlarda müxtəlif miqyaslı turbulentlik üçün hissəciklərin çökmə proseslərinin öyrənilməsi sedimentasiya sürətinə təsir edən əsas turbulentlik xüsusiyyətlərini müəyyən etməyə imkan vermişdir: enerji dissipasiyasının xüsusi göstəricisi, turbulentlik miqyası və mühitin özlülüyü.

4. Hissəciklərin ölçülərinin dəyişməsi çökmə prosesində məhdudiyyətlərə səbəb olur ki, bu da hissəciklər arasında tez-tez toqquşmalar və qarşılıqlı təsirlərə səbəb olur. Bu proseslərin nəticəsində koagulyasiya, hissəciklərin formasının deformasiyası,

onların parçalanması və bölünməsi baş verir, nəticədə polidispers hissəciklərin çökməsi müşahidə olunur.

5. Neft hasilatının müasir inkişaf mərhələsində bütün yataqlara tətbiq edilə biləcək universal neftvermə artırma metodu mövcud deyil. Bu, müxtəlif yataqlarda kollektor və fiziki-kimyəvi xüsusiyyətlərin fərqliliyi ilə bağlıdır. Buna görə də, neftverməni artırmaq üçün hər bir yataq üçün fərdi olaraq texnoloji təsir üsulunun işlənib hazırlanması və seçilməsi tələb olunur.

Aparılmış analitik icmal əsasında bir sıra vacib məsələlərin həll edilməsinin zəruriliyi ortaya çıxır, məsələn:

- neft-qaz hasilatının vəziyyətinin qiymətləndirilməsi metodlarının riyazi modelləşdirmə ilə işlənib hazırlanması;

- neftin məsaməli mühitlərdə süzülməsi proseslərinin riyazi modelləşdirilməsi;

- neft emulsiyalarının yaranması və dağılması proseslərinin modelləşdirilməsi;

- asfalt-qətran maddələrin daşınma zamanı boruların divarlarında çökməsi proseslərində diffuziya-miqrasiya və kristallaşma proseslərinin tədqiqi;

- strukturlaşdırılmış neftlərin reoloji xarakteristikalarının tədqiqi və müvafiq modellərin işlənib hazırlanması.

**İkinci fəsil** neft yatağının vəziyyətinin qiymətləndirilməsi üsulunun işlənib hazırlanmasına həsr edilmişdir ki, bu da vacib istehsalat məsələsini təşkil edir. Neft yataqlarının işlənməsi zamanı aktual problemlərdən biri layların neftvermə qabiliyyətinin artırılmasıdır. Laydan neftin çıxarılma əmsalının aşağı olması, əsasən, neft, süxur əmələ gətirən minerallar və vurulmuş su arasında sərhəd səthində baş verən molekulyar-səthi proseslərlə bağlıdır. Bu, layda neftlə birbaşa təmasda olan hidrofob sahələrin mövcudluğu ilə əlaqədardır. Belə ki, qalıq neftin əhəmiyyətli hissəsi sərhəd-bağlı vəziyyətdə olur.

Asfaltenlərin ion-mübadilə proseslərindəki rolu və nanotexnologiyalar neft yatağında baş verən proseslərin riyazi modellərinin işlənib hazırlanmasında nəzərə alınmalıdır. Bu yanaşma neft hasilatının intensivləşdirilməsinə və işlənmənin son

mərhələlərində olan layların neftvermə qabiliyyətinin artırılmasına kömək edəcəkdir. Neft yatağında proseslərin təsvir edilməsi üçün adekvat riyazi modellərin yaradılması kompleks yanaşma tələb edir. Bu yanaşma, yeraltı proseslərin sistemli təhlilini və modeldə nəzərə alınması vacib olan əsas parametrlərin seçimini əhatə edir. Bu yanaşma çərçivəsində, neft hasilatının əsas göstəricilərini və prosesin parametrlərini əks etdirən ümumiləşdirilmiş struktur sxem təklif edilmişdir.

Bu sxem əsasında Kolmoqorov-Yerofeyevin kinetik tənliyinin modifikasiyasından istifadə edən metodika<sup>1</sup> hazırlanmışdır. Bu metodika ilk dəfə olaraq neft laylarının vəziyyətinin kəmiyyətə qiymətləndirilməsi üçün fundamental riyazi yanaşmaların tətbiqinə imkan verir. Onun əsas xüsusiyyəti, başlanğıc şərtlərdə tənliklərin analitik həllindən istifadə etməklə model əmsallarının müəyyən edilmə imkanının olmasıdır. Bu, metodikanı cari neft hasilatının dəyişməsinə proqnozlaşdırmaq və layların perspektiv xüsusiyyətlərini qiymətləndirmək üçün praktik edir ki, bu da əvvəllər Arps tənliyi kimi klassik modellərdən istifadə edərkən mümkün deyildir. Beləliklə, təklif olunan yanaşma neft hasilatı proseslərinin təhlili və idarə olunması üçün yeni perspektivlər açır.

Neftin (neft emulsiyasının) özlülüyünün artması və nəticədə nasos-kompressor borusunda mayelərin hərəkəti zamanı yaranan hidravlik müqavimət (sürtünmə qüvvəsi) problemi müzakirə edilmişdir.

Üfüqi boru xətlərində və neft quyularının gövdəsində istilik mübadiləsi proseslərinin müasir vəziyyəti sistemli şəkildə təhlil edilmişdir. Mövcud istilik mübadiləsi proseslərinin riyazi modelləşdirilməsinə yanaşmaların çatışmazlıqları vurğulanmışdır. Lay mayelərinin (neft, qaz və su) neftçıxarma quyusunun dibi ilə ağzı arasında nasos-kompressor borusunda hərəkəti zamanı axının temperaturu tədricən azalır. Bu, neftin özlülüyünün artmasına və nəticədə, boru daxilində mayelərin hərəkəti zamanı hidravlik müqavimətin (sürtünmə qüvvəsinin) artmasına səbəb olur.

---

<sup>1</sup> Рзаев, Аб.Г., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Разработка метода оценки состояния нефтяной залежи // Нефтепромысловое дело, 2015. №5, - с. 21-23.

Temperaturun azalması xüsusilə yüksək özlülüyə malik, çətin əridilən parafinləri və strukturlaşdırılmış asfaltenləri (klasterlər şəklində) ehtiva edən neftlər üçün çətinlik yaradır. Çünki bu, təkcə axına özlülük müqavimətini artırmaqla kifayətlənmir, həm də bu komponentlərin nasos-kompressor borusunun daxili səthində çökməsinə gətirib çıxarır, nəticədə dərinlik nasosunun işində əlavə problemlər yaradır. Bu problemin həllinə həsr olunmuş çoxsaylı işlər mövcuddur və onlar problemin araşdırılmasına əhəmiyyətli töhfə vermişdir. Bununla belə, bu tədqiqatlarda nasos-kompressor borusu ilə mexaniki boru arasında yerləşən su-neft qatının və qaz örtüyünün istilikkeçirmə qabiliyyəti nəzərə alınmamışdır. Halbuki, onların istilikkeçirmə qabiliyyəti karbonlu poladın istilikkeçirmə qabiliyyətindən xeyli aşağıdır. Bu amillər, quyunun çıxış xəttində əldə olunan termoqramma əsasında neftçıxarma quyusunun hasilatını dolayı yolla müəyyən edən işlərdə nəzərə alınmışdır. Lakin, həmin işlərdə müxtəlif istilikkeçirmə qabiliyyətinə malik olan bir neçə təbəqə vasitəsilə qalxan maye axınından süxurlara istilik ötürülməsi prosesinin riyazi modeli işlənib hazırlanmamışdır. Bundan əlavə, bəzi tədqiqatlarda mayələrin kütləvi axını və temperaturunun, eləcə də nasos-kompressor borusunun hündürlüyünə görə ətraf mühitin (suxurların) temperaturunun dəyişməsi nəzərə alınmır. Nasos-kompressor borusu ilə qazma borusu arasında yaranan boşluqda yerləşən maye və qaz təbəqəsinin təsiri də nəzərə alınmamışdır.

Bu işdə əvvəlki çatışmazlıqları aradan qaldıran kompleks yanaşma və neft hasil edən quyunun nasos-kompressor borusundakı qalxan maye axınından ətraf süxurlara istilik ötürülməsinin yeni riyazi modeli<sup>2</sup> təklif edilir. Əvvəlcə, Furiyinin empirik qanunu və Nyutonun soyuma empirik düsturu tətbiq edilir. Daha sonra, neftçıxarma quyusunun qaldırıcı borusunda qalxan maye axınından ətrafdakı dağ süxurlarına istilik ötürülməsi prosesinin yekun riyazi modeli kimi aşağıdakı ifadə əldə edilir:

---

<sup>2</sup> Гулуев, Г.А., Рзаев, Аб.Г., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Математическое моделирование процесса теплопередачи в стволе нефтяных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2015. №1, - с. 44-47.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda_{\phi}} \ln r_B + \frac{1}{\lambda_{CT}} \ln \frac{r_H R_H}{r_B R_B} + \left( \frac{\ell}{H \lambda_{\kappa}} + \frac{\ell}{((\ell-H) \lambda_{\Gamma})} \right) \ln \frac{R_B}{r_H} + \frac{1}{\lambda_{\Pi}} \ln \frac{R_K}{R_H} = \\ = \frac{2\pi f t [t_{\phi}(z) - (t_3 - q_z)]}{Q(z)} \end{aligned} \quad (1)$$

Burada  $t_{\phi}(z) = t_3 - b(1 - e^{-az})$ ;  $a = \frac{\pi D \lambda_{CT}}{Q^* \rho C}$ ,  $b = \frac{Q \rho i}{\pi \lambda_{CT} D E}$ ,  $i = \lambda^* \frac{1}{D} \times \frac{v^2}{2g}$ ,  $\lambda^*$ -hidrodinamik müqavimət əmsalı;  $t_3$ -flüid axınının dibdəki temperaturu;  $R_k$ -qidalanma konturunun radiusu;  $D$ -nasos-kompresor borusunun diametri;  $Q^*$ -nasos-kompresor borusundakı flüidlərin sərfi;  $\rho$ -flüidlərin sıxlığı;  $C$ -flüidlərin xüsusi istilik tutumu;  $E$ -istiliyin mexaniki ekvivalenti;  $i$ -hidravlik meyil;  $v$ -quyunun gövdəsində flüid axınının sürəti;  $g$ -sərbəstdüşmə təcili;  $t_{\phi}$ -flüidlərin temperaturu;  $\lambda_{\phi}$ ,  $\lambda_{CT}$ ,  $\lambda_{\kappa}$ ,  $\lambda_{\Gamma}$ ,  $\lambda_{\Pi}$ -müvafiq olaraq flüidlərin, mayenin, qazın, süxurun, nasos-kompresor borusu və qazma borusunun istilikkeçirmə qabiliyyətləri;  $z$ -şaquli koordinat;  $\ell$ -silindrin divarının uzunluğu;  $Q$  - ötürülən istilik miqdarı;  $R_B, R_H$  -qazma borusunun daxili və xarici resursları;  $r_B, r_H$ -nasos-kompresor borusunun daxili və xarici radiuslarıdır.

Təklif olunan riyazi model, dağ süxurlarının geometrik gradientini və neftçıxarma quyusunun dibindən çıxış xəttinə qədər temperaturun dəyişməsinə nəzərə alır. Model, həmçinin nasos-kompresor borusu ilə qazma borusu arasında yaranan boşluqdakı mayenin miqdarını və onların istilikkeçirmə qabiliyyətini də nəzərə alır.

Bu model, neft quyusunda nasos-kompresor borusundan çıxan flüid axınından ətraf qazma borusuna istilik ötürülməsi prosesini təsvir edir.

**Üçüncü fəsil**də neft yataqlarının lay sistemlərində neftlərin süzülməsi və strukturlaşma proseslərinin riyazi modelləşdirilməsinin nəticələri təqdim olunur. Tədqiqatın məqsədləri aşağıdakılardır:

- Qeyri-Nyuton neftlər üçün sıxılma və qeyri-stasionar süzülmənin reoloji modelinin işlənilib hazırlanması, süzülmənin sürətinin sönməsinin modelləşdirilməsi;
- Neft layının süzülmə xüsusiyyətlərinin müəyyən edilməsi;

• Neftlərin məsaməli mühitlərdə süzülməsi tənliklərinin qeyri-xətti təsirlərinin Reynolds ədədindən asılılığının araşdırılması və Darsi ədədinin müxtəlif dəyişmə zonaları üçün təsvir modellərinin işlənilib hazırlanması.

İşdə, maye və qazın sərhəd səthində süxur əmələ gətirən minerallarla baş verən proseslər tədqiq edilmişdir.

Müəyyən edilmişdir ki, laydan neftin az çıxarılmasının səbəblərindən biri neft, süxur əmələ gətirən minerallar və vurulmuş su arasındakı sərhəd səthində baş verən molekulyar-səthi proseslərdir. Hidrofil və hidrofob sahələrin paylanması, onların sayı və ardıcılığı süxur əmələ gətirən mineralların təbiətindən, layı doyduyan mayələrin fiziki-kimyəvi xüsusiyyətlərindən və suyun miqdarından asılıdır.

Qeyd etmək lazımdır ki, məsaməli kanalların əhəmiyyətli bir hissəsi (65-85%) hidrofob xüsusiyyətlərə malikdir və neft və qazla hidrofoblaşdırılmışdır. Göstərilən xüsusiyyətləri nəzərə alaraq, kollektor layının kapilyarlarında neftin strukturlaşma prosesi zamanla özlülüyn dəyişməsi vasitəsilə təsvir edilmişdir. Bu özlülük dəyişikliyi öz növbəsində neft və neft emulsiyalarının axınının hidrodinamik xüsusiyyətlərinə təsir göstərir ki, bu da onların daşınması prosesində mühüm rol oynayır.

Beləliklə, hasil edilən neft emulsiyasının boru kəmərləri vasitəsilə neftin hazırlanması qurğusuna daşınmasına rəşional yanaşma, neftin qeyri-Nyuton mayesi kimi struktur və reoloji xüsusiyyətlərini nəzərə alan riyazi modellərin işlənilib hazırlanmasını tələb edir. Sürüşmə gərginliyinin sürüşmə sürətindən asılılığına dair eksperimental məlumatlar ədəbiyyat mənbələrindən götürülür<sup>3</sup> və bu prosesin təsviri üçün eksponensial qanun təklif edilir.

$$\tau = A \left[ 1 - \exp \left( \frac{\dot{\gamma}}{\lambda} \right) \right] + B \quad (2)$$

---

<sup>3</sup>Расулов С.Р. Математическое моделирование процесса структурообразования нефти в пласте-коллекторе нефтяных месторождений / С. Р. Расулов, Аб. Г. Рзаев, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2016, №3, - с.98-101.

Burada:  $\tau$ -sürüşmə gərginliyi;  $A$ ,  $B$  və  $\lambda$ -eksperimental əmsallar;  $\dot{\gamma}$ - sürüşmə sürətidir.

Düstur (2) eksperimental məlumatları təsvir edir və qeyri-Nyuton axın xüsusiyyətlərinə malik anomal neftlərin və neft emulsiyalarının davranışını modelləşdirmək üçün istifadə edilə bilər.

Qeyri-nyuton neftlərin məsaməli mühitlərdə axını, xam neftdəki asfalt-qətran və parafin birləşmələrinin, eləcə də bərk hissəciklərin məsamələrdə çökməsi ilə xarakterizə olunur ki, bu da mühitin məsaməliliyinə əhəmiyyətli təsir göstərir. Asfaltenlərin çökməsi neft sənayesinin bütün sahələrində - hasilat, yığım, nəql, neftin hazırlanması və emalı proseslərində ciddi problem yaradır.

“Maye-bərk cisim” fazalarının sərhəd səthində sıx təbəqənin yaranma mexanizmi olduqca mürəkkəbdir və bir çox faktorlarla müəyyən edilir, o cümlədən: maye-bərk divar səthindəki sərhəd təbəqənin mövcudluğu, asfalten hissəciklərinin sərhəd səthə diffuziya və turbulent keçidi, sərhəd təbəqədə və borunun divarında temperatur rejimi və s.

Qeyd etmək lazımdır ki, hissəciklərin çökməsi miqrasiya-diffuziya və miqrasiya-qravitasiya mexanizmləri ilə baş verir (şaqlı və üfüqi borularda).

Ayındır ki, asfaltenlərin səthdə çökmə prosesi kütlə mübadiləsi prosesi olub, kütlə ötürmə sürəti molekulyar və turbulent diffuziya ilə müəyyən edilir, bu isə maili və üfüqi borularda qravitasiya çökməsi ilə daha da mürəkkəbləşir.

Bundan əlavə, asfalten hissəciklərinin toqquşması zamanı baş verən koagulyasiya da kütlə mübadiləsi prosesidir. Bunun nəticəsində nanoaqreqatlar, klasterlər yaranır, həmçinin onların parçalanması və dağılması da baş verir ki, bu da strukturlaşdırılmış neftin axınına əhəmiyyətli təsir göstərir.

Miqrasiya-diffuziya mexanizmi asfalt-rezin hissəciklərinin çökməsini müşayiət edir və bu proseslərə məsaməli layda baş verən çökmələr, neft emulsiyasının ayrılması və digər proseslər daxildir. Layın məsamələrində asfaltenlərin çökməsi onun məsaməliliyinin dəyişməsinə gətirib çıxarır ki, bu da məsaməli strukturun sıxılmasına,

tıxanmasına və neftdəki müxtəlif qarışıqların (asfaltenlər, qatranlar, bərk faza) çökməsinə səbəb olur.

İşdə<sup>4</sup>məsaməli mühitin xarici deformasiyaedici gərginliklərin, məsələn, yuxarıdakı layların kütləvi qüvvələrinin təsiri altında sıxılması problemi, həmçinin məsamələrin daxili səthində asfalt-qətran maddələrinin və xırda dispers bərk fazanın çökməsi nəticəsində tıxanması prosesi araşdırılır.

Bu tədqiqatda, məsaməli mühitin məsaməliliyinin zamanla dəyişməsi nəticəsində süzülmənin sönmə prosesi modelləşdirilir.

Qeyd etmək lazımdır ki, məsamələrdə mayenin turbulent axını zamanı süzülmənin sönmə prosesi laminar axınla müqayisədə daha sürətlə baş verir. Neft layının çirklənməsi onun məsaməliliyinin dəyişməsinə birbaşa təsir edir ki, bu da layın hidrodinamik xassələrindən və quyunun hasilatından asılıdır. İşdə bu asılılığı nəzərə alan və quyunun hasilatının dəyişməsini hesablamağa imkan verən metodika təklif edilmişdir.

Ədəbiyyat məlumatlarına əsaslanaraq, məsaməlilikdən asılı olan keçiricilik əmsalı mürəkkəb bir funksiya kimi qəbul edilərək istifadə olunmuşdur. Kozeni-Karman tənliyi ilə dəqiqləşdirilmişdir ki, məsaməli mühitin keçiriciliyi hissəciklərin səth sahəsindən, əyilmə əmsalından və məsamələrin formasından asılıdır.

Beləliklə, işlənmiş model quyunun hasilatının məsaməlilik və zamandan asılılığını təsvir edir ki, bu da onu real laylarda süzülmə proseslərinin qiymətləndirilməsi üçün praktik alət edir.

Azərbaycanda neft quyularının istismarı zamanı aparılmış çoxsaylı tədqiqatlar və eksperimental məlumatlar göstərmişdir ki, quyunun debitinin zamanla dəyişməsi impulsvari sönən xarakter daşıya bilər.

İşdə məsaməli mühit üçün neftin qeyri-stasionar süzülməsi tənliyinin məhdud sahə üçün həlli nəzərdən keçirilmişdir. Bu həll

---

<sup>4</sup> Келбалиев, И.Г. Моделирование фильтрации нефтей в пористой среде и технология жидкофазной экстракции асфальтенов / Г.И. Келбалиев, С.Р. Расулов, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Теоретические основы химической технологии, 2016. Т.50, №6, - с.673-682.

əsasında məsaməli mühitin pyezo keçiricilik və keçiricilik əmsallarını qiymətləndirmək üçün alqoritmlər hazırlanmışdır

$$\chi = -\frac{0,1729 \varepsilon R_k^2}{t} \ln \frac{0,626(P_k - P)}{P_k - P_c}. \quad (3)$$

$$k = \chi \eta_c \beta^*. \quad (4)$$

Burada:  $t$ -vaxt;  $P, P_k, P_c$  -müvafiq olaraq təzyiq, kontur təzyiqi, quyu dibi təzyiqi;  $R_k^2$  -lay konturunun radiusu;  $\beta^*$  -layın gətirilmiş elastiklik əmsalı;  $\eta_c$  -neftin dinamik özlülüyü.

Süzülmə proseslərinin daha dərin təhlili üçün məsaməli mühitin oxşarlıq kriteriyaları təklif edilmişdir. Məsələn  $Kr = \frac{V_o R_k}{\chi} = Re Q_k$ , Burada  $Kr$  konvektiv daşınmanın piezo keçiricilik vasitəsilə impuls daşınmasına nisbətini xarakterizə edir, kütlə və istilik ötürülməsi üçün Pekle ədədinə bənzərdir.

Bundan əlavə,  $Q_k = \frac{V_s}{\chi}$  kriteriyası daxil edilmişdir. Bu kriteriya, məsaməli mühitin fiziki xüsusiyyətlərini əks etdirir və Prandtl ədədinin istilik ötürülməsi, Şmidt ədədinin isə kütlə ötürülməsi üçün analoqudur.

Təklif olunan modellərin eksperimental məlumatlarla müqayisəsi, onların yüksək dəqiqliyini və real nəticələrlə hesablamaların yaxşı uyğunluğunu göstərmişdir. Məsaməli mühitdə maye və qazların süzülmə qanunauyğunluqlarına təkcə neft, qaz və su arasında sərhəd bölgüləri deyil, həm də bərk cisimlərin və mayələrin sərhədlərində baş verən səthi hadisələr də təsir göstərir. Bu hadisələr Reynolds ədədinin geniş dəyişmə diapazonunda süzülmə qanununun xətti xarakterinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir.

İşdə<sup>5</sup> məsaməli mühitlərdə neftin süzülməsi tənliklərinin qeyri-xətti xüsusiyyətləri araşdırılmış və Darsi ədədinin müxtəlif dəyişmə sahələri üçün onların təsvir modelləri hazırlanmışdır. Süzülmənin qeyri-xətti xüsusiyyətləri məsaməli mühitin strukturlarının

---

<sup>5</sup> Келбалиев, Г.И. Проблемы нелинейностей уравнений фильтрации нефтей в пористых средах / Г.И. Келбалиев, С.Р.Расулов, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Нефтепромышленное дело, 2015. №8, - с.23-26.

mürəkkəbliyi, xassələrinin anizotropiyası və axın xarakteri ilə əlaqədardır.

Real neft və qaz kollektorlarında anizotropiya çatların olması, təbəqəlilik və məsaməli məkanın təsadüfi dəyişiklikləri ilə bağlı ola bilər. Bu, süzülmənin xüsusiyyətlərinin üç istiqamətdəki fərqliliyini nəzərə almağı tələb edir və nəticə etibarilə keçiriciliyin paylanması müəyyənəndirilməsindəki çətinliklər səbəbindən Darsi tənliliklərinin praktiki həllini mürəkkəbləşdirir. Hətta, mühitin izotrop olduğu fərz edildikdə belə, özlülük və konvektiv axınların olması qeyri-xəttiliklərə gətirib çıxarır. Bu proseslərin tədqiqinin əhəmiyyətli olmasını vurğulayır.

Darsi qanununun tətbiq hüddudlarının analizinə həsr olunmuş çoxsaylı tədqiqatlar aşağıdakı kritik sərhədləri müəyyən etməyə imkan vermişdir:

a) yuxarı sərhəd, kifayət qədər yüksək süzülmə sürətlərində inert konvektiv qüvvələrin təzahürü ilə əlaqəlidir;

b) aşağı sərhəd, kifayət qədər aşağı süzülmə sürətlərində mayenin qeyri-nyuton reoloji xassələrinin, onun məsaməli mühitin bərk skeleti ilə qarşılıqlı təsirinin və özlülük axınının təzahürü ilə əlaqədardır.

Darsi qanununun tətbiq hüddudlarının yuxarı və aşağı sərhədləri, adətən, müəyyən kritik Reynolds ədədi  $Re$  ilə əlaqələndirilir  $Re_{cr}$ .

Darsi ədədini Reynolds ədədinin geniş dəyişmə sahəsində ümumi təsvir etmək üçün yarımempirik ifadə təklif olunmuşdur:

$$Da = 1 - \exp(-5 \times 10^6 Re^3) - 0,01Re \times (1 + 0,000122Re^2)^{-0,5} \quad (5)$$

Bütün ifadələrdə Darsi ədədinin hesablanması üçün Reynolds ədədi aşağıdakı kimi müəyyən olunur:

$$Re = \frac{Va}{(0,75\varepsilon + 0,23)v_c} \quad (6)$$

Burada:  $V$ -axının və ya süzülmə sürəti;  $a$ -məsaməli mühitin xarakterik ölçüsü;  $\varepsilon$ -məsaməlilik;  $v_c$ -mühitin kinematik özlülüğü.

Bu tədqiqat işində məsələlərin daxili səthində müxtəlif qarışıqların və asfalt-qətran maddələrin çökməsi ilə bağlı layın sıxılması proseslərinin təsviri məsələləri araşdırılmışdır. Məsələliliyin dəyişmə tənliyi laminar və turbulent rejimlərdə kütlə ötürülməsi hadisələri əsasında qurulmuşdur. Süzülmənin sönmə prosesi keçiricilik əmsalının və layın məsələliliyinin zamandan asılı olaraq dəyişməsi ilə əlaqələndirilmiş model vasitəsilə təsvir edilmişdir. Hasilat göstəricisinin dəyişməsi ilə bağlı hesablama nəticələrinin təcrübi məlumatlarla müqayisəsi qənaətbəxş şəkildə uyğunluq təşkil etmiş və süzülmə sürətinin zamandan asılı olaraq impulsvari sönən xarakterini aşkara çıxarmışdır.

**Dördüncü fəsil** dəniz neft hasilatının boru kəmərləri şəbəkəsində neft emulsiyalarının yaranması, dağılması və hidrodinamik xüsusiyyətlərinin modelləşdirilməsinə həsr olunmuşdur.

Neft emulsiyalarının, heterogen mühitlər kimi, yaranma, stabilləşmə və dağılma mexanizminə bir çox tədqiqat işləri həsr olunmuşdur. Lakin, neft-su sərhədində baş verən hadisələrlə su damcılarının koalesensiyası və parçalanması, təbəqələşmə və çökmə ilə bağlı bir çox problemlər hələ də dəqiq həll yollarını tapmamışdır. Neft emulsiyalarının ayrılma effektivliyinə təsir edən vacib faktorlar, fazalararası pərdənin nazikləşmə və qırılma şəraiti, koalesensiya sürəti, həmçinin su damcılarının səthindəki asfalt-qətran maddələrin adsorbsiya olunmuş pərdəsinin dağılması ilə bağlıdır. Bundan əlavə, bu prosesdə deemulqatorların iştirakı da əhəmiyyətlidir.

Suspenziyaların və emulsiyaların axını ilə bağlı problemlərin nəzəri həlli məqsədilə müxtəlif tərkibli və ölçülü hissəciklərdən ibarət polidispers mühitin real axın mənzərəsini sadələşdirmək üçün müəyyən yanaşmalar tətbiq edilmişdir. Suspenziyaların və emulsiyaların hərəkətinin ümumi hallarını təsvir edən diferensial tənliklər, mühitin prinsipial fasiləliliyini, istilik və kütlə mübadiləsi ilə bağlı baş verən fiziki-kimyəvi prosesləri nəzərə almalıdır.

Turbulent və laminar axın rejimlərində hidrodinamik məsələlərin həllini asanlaşdıran müəyyən sadələşdirmələr və yanaşmalar əsasında çoxfazlı sistemlərin ümumi hərəkət tənliyi təklif edilmişdir. Bundan əlavə, suspenziyada ayrı-ayrı sferik hissəciyin hərəkətini xarakterizə edən diferensial tənlik verilmişdir.

Çoxfazalı sistemdə baş verən proseslər təhlil edilmiş və fazaların qarşılıqlı təsirinin fazalararası mübadiləni dəyişdirdiyi qənaətinə gəlinmişdir. Turbulent axında xırda dispersli suspenziyaların hərəkəti nəzərdən keçirilmişdir. Mayədə müxtəlif tip hissəciklərin mövcudluğunun həm turbulent, həm də laminar axın zamanı hidromexanika məsələlərinin həllini çətinləşdirdiyi qeyd olunmuşdur.

Sərt sferik hissəciyə ətraf mayədə göstərilən müqavimət qüvvəsini müəyyən etmək üçün aşağıdakı ifadə təklif edilmişdir.

$$F_T = 6\pi\rho_c v_c aV_0. \quad (7)$$

Burada:  $\rho_c$ -mühitin sıxlığı;  $a$ -hissəciyin diametri;  $V_0$ -hissəciyin ilkin sürətidir.

Neft emulsiyalarının ayrılması prosesi xam neftin sudan, mineral duzlardan və müxtəlif qarışıqlardan təmizlənməsi və hazırlanmasının vacib mərhələsidir. Kimya texnologiyası proseslərinin və qurğularının, məsələn, maye ekstraksiyası, heterogen sistemlərin ayrılması, həllolunmayan maye sistemlərində reaksiyalar və digər proseslərin hesablanması dispers hissəciklərin koagulyasiya kinetikasının (sürətinin) müəyyən edilməsi tələb olunur. Damcılardan və hissəciklərin axında toqquşma tezliyinin hesablanması üçün nəzəri cəhətdən əhəmiyyətli olan ifadələrə baxmayaraq, onların konkret praktiki tətbiqlərdə istifadəsi mürəkkəb bir vəzifədir.

Bu məqsədlə, müxtəlif müəlliflər tərəfindən təklif edilmiş və yalnız monodispers sistemlərdə hissəciklərin toqquşma tezliyini ifadə etmək üçün faydalı olan düsturlar təqdim edilmişdir. Lakin real sistemlər, o cümlədən neft emulsiyaları, polidispers xarakter daşıyır və dispers hissəciklərin ölçülərinə görə paylanması geniş spektrə malikdir (ən kiçik hissəciklərin ölçüsü orta çəki hissəciklərinin ölçüsündən təxminən 100 dəfə kiçik ola bilər). Bu isə, yuxarıda qeyd olunan düsturların polidispers sistemlərdə dispers hissəciklərin toqquşma tezliyini hesablamaq üçün tətbiqini problemli edir, çünki bu, nəticələrin aşağı qiymətləndirilməsinə səbəb ola bilər.

Bu problemin həlli üçün Hans Müllər tərəfindən bir cəhd edilmişdir. O, Smoluxovski nəzəriyyəsini və müxtəlif ölçülü iki hissəciyin toqquşma ehtimalını xarakterizə edən əmsalı (onların

radiuslarının nisbət funksiyasını) istifadə edərək, yalnız iki paylanma spektrini nəzərə alan bir düstur əldə etmişdir. Lakin, bu düstur tətbiq zamanı məhdudiyyətlərə malikdir, çünki o, diskretdir (yalnız iki hissəciyin paylanma spektri nəzərə alınır) və buna görə də, daha mürəkkəb polidispers sistemlər üçün sadələşdirilmişdir

$$\theta_r = 4\pi a D n \gamma_{ik} = \frac{4\pi a D n \left(1 + \frac{r_i}{r_k}\right)^2}{4 \frac{r_i}{r_k}}, \quad (8)$$

Burada:  $r_i, r_k$ -müvafiq olaraq  $i$ -ci və  $k$ -cı hissəciklərin orta radiuslarıdır;  $\theta_r$ -dispers hissəciklərin toqquşma tezliyi;  $D$ -hissəciklərin mühitdə diffuziya sürətini təsvir edən diffuziya əmsalı;  $n$ -vahid həcmə düşən hissəciklərin sayı;  $\gamma_{ik}$ -müxtəlif ölçüdə iki hissəciyin toqquşma ehtimalını xarakterizə edən əmsal;  $a$ -sistemdəki hissəciklərin radiusudur.

Göstərilən çatışmazlığı aradan qaldırmaq (və ya düsturu təkmilləşdirmək) məqsədilə hissəciklərin ilkin ölçü paylanmasının onların toqquşma tezliyinə təsirini nəzərə alan tənliyin çıxarılması təklif olunur. Polidispers sistemlərdə damcıların toqquşma tezliyinin nəzəri təhlilini apararaq və müvafiq fərziyyələri qəbul edərək, hissəciklərin toqquşma tezliyini onların ilkin paylanmasını nəzərə almaqla aşağıdakı ifadəni almaq olar

$$\frac{\theta^x}{\theta} = \left[ \left( \frac{\sigma}{r_{cp}} \right)^2 + 1 \right]^3 = z^x, \quad (9)$$

Burada  $\theta^x$ -hissəciklərin ilkin paylanması nəzərə alınmaqla toqquşma tezliyi;  $\theta$ -vahid vaxtda hissəciklərin toqquşma tezliyi;  $\sigma$ -hissəciklərin toqquşma radiusu;  $z^x$ -polidisperslik əmsalıdır və hissəciklərin ilkin paylanma xüsusiyyətlərinin ( $r_{cp}, \sigma$ ) toqquşma tezliyinə təsirini xarakterizə edir.

Alınan ifadə<sup>6</sup> dispers fazanın dispers hissəciklərin ölçülərinə görə paylanmasının onların toqquşma tezliyinə təsirini tam nəzərə alır.

---

<sup>6</sup> Рзаев, Аб.Г. Определение частоты столкновения частиц в полидисперсных системах / Аб.Г. Рзаев, С. Р. Расулов, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Ученые записки НИИ «Геотехнологические проблемы нефти, газа и химия», 2015. Т. XVI, - с.433-438.

Bu düsturdan görünür ki, kolloid sistemlərin polidispersliyi artdıqca toqquşma tezliyi ( $z^x$ ) də artır və yaxud əksinə. Daha sonra, işdə neft emulsiyalarının ayrılması və təbəqələşməsi proseslərinin modelləşdirilməsinin əsas problemləri araşdırılmışdır. Bu proseslər turbulent axında su damcılarının koalesensiyası və parçalanması ilə müşayiət olunur. Asfalt-qətran maddələrin su damcılarının səthində adsorbsiya pərdələrinin əmələ gəlməsinə, həmçinin onların koalesensiyasına, damcıların parçalanmasına və damcıların ölçüləri və zamana görə paylanma funksiyasının təkamülünə təsiri araşdırılmışdır. Müxtəlif neft yataqlarından olan xam neftdə su damcılarının səthində neft emulsiyalarını stabilləşdirən qoruyucu qatların tərkibi analiz edilmişdir. Nəticədə, əsas stabilləşdiricilərin yüksək ərimə temperaturuna malik parafinlər və qeyri-üzvi mexaniki qarışıqlar ehtiva edən asfaltenlər və qətranlar olduğu göstərilmişdir.

Damcıların səthində adsorbsiya pərdələrinin əmələ gəlmə mexanizmi nəzərdən keçirilmişdir. Bu mexanizm neftin içərisindən su damcılarının səthinə kütlə ötürülməsinin (asfalt-qətran maddələr və bərk faza) diffuziya mərhələsini, damcıların səthində pərdənin əmələ gəlməsi ilə maddənin adsorbsiyasını, pərdənin desorbsiyası və səthi aktiv maddələrin iştirakı ilə adsorbsiya qatının dağılmasını əhatə edir.

Təklif olunan tənliklər damcıların sayının və ölçülərinin zamana görə dəyişməsinə qiymətləndirmək üçün təqdim edilmişdir. Bu tənliklər parçalanma və birləşmə tezliklərindən asılıdır:

$$N(t) = \frac{N_0 \exp(\omega_d t)}{1 + \frac{1}{2} \omega_k v N_0 t}. \quad (10)$$

Burada:  $\omega_k$  və  $\omega_d$  -müvafiq olaraq birləşmə və parçalanma tezliyi;  $N_0$ -vahid həcmdə başlanğıc damcı sayı;  $(t)$ -dəyişməsinə təsir edən zaman göstəricisidir.

$\omega_k \gg \omega_d$ -olduqda, parçalanma prosesləri üstünlük təşkil edir.

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + \omega_k v N_0 t}. \quad (11)$$

$\omega_d \gg \omega_k$ -də birləşmə prosesləri üstünlük təşkil etdikdə isə aşağıdakı kimi ifadə olunur.

$$N(t) = N_0 \exp(\omega_d t) \quad (12)$$

Təklif olunan riyazi modellər neft emulsiyasındakı su damcılarının ölçülərinin dəyişməsinə izah etməyə imkan verir ki, bu da neft-su maye fazalarının ayrılma proseslərinə təsir göstərir. Damcıların paylanması və fazaların ayrılmasına təsir edən əsas parametrlər emulsiyanın fiziki xüsusiyyətləri (sıxlıq, özlülük) və turbulentliyin parametrləridir (enerjinin dissipasiyası, turbulent dəyişikliklərin miqyası).

Neft emulsiyalarının ayrılması proseslərinin intensivləşdirilməsi ilk növbədə, aralıq qatdakı axının turbulentləşdirilməsi ilə bağlıdır, çünki turbulent sürət dalğalanmaları damcıları əhatə edən bronlaşmış qabıqların adsorbsiya edilmiş komponentləri arasında mövcud olan molekulyar əlaqələrin zəifləməsinə, onların dağıdılmasına, həmçinin damcılarının toqquşma tezliklərinin artmasına səbəb olur.

Hazırda, neft emulsiyalarının ayrılma proseslərinin intensivləşdirilməsi üçün bir çox üsullar mövcuddur, bunların arasında sabit elektrik sahəsindən istifadə xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Sabit elektrik sahəsi ilə neft emulsiyalarının ayrılması prosesi nəzərdən keçirilərkən məlum olmuşdur ki, dəyişən elektrik sahəsindən fərqli olaraq, sabit sahədə polyarizasiya dəyişmir. Buna görə də, keçirici zəncirlərin yaranmasının qarşısını almaq üçün xüsusi tədbirlərin görülməsi tələb olunur.

Sabit elektrik sahəsi neftin emalı proseslərində, suyun həcm payı 1-2%-dən az olan seyrəkləşmiş sistemlərdə istifadə olunur. Bu hallarda damcılar arasında məsafə onların diametrindən bir neçə dəfə böyük olur. Belə şəraitdə yerli elektrik sahələrinin təsiri o qədər zəif olur ki, elektrodlar arasında keçirici zəncirlərin yaranma ehtimalı sıfıra yaxınlaşır.

Sabit elektrik sahəsində dispers sistemlərin davranışının xarakterik xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, sahə məkan baxımından hətta homogen (gradiyentsiz) olsa belə, dispers fazanın su damcıları müəyyən istiqamətdə hərəkət edir və elektrodların birinə doğru yönəlir. Bu, ikili elektrik təbəqəsi səbəbindən yaranan elektrokinetik potensialın mövcudluğu ilə izah olunur.

Neft emulsiyalarının və fiziki sahələrin onlara təsirinin təhlili əsasında damcılarının koalesensiyası və parçalanması proseslərinin

mühüm xüsusiyyətləri müəyyən edilmişdir. Bunlara aqreqativ qeyri-sabitlik, bununla əlaqədar məkan qeyri-bircinsliyi, damcıların deformasiyası və çökməsi, yeni hissəciklərin yaranması və digər amillər daxildir. Göstərilmişdir ki, real şəraitdə koalesensiya və parçalanma prosesləri arasında kvazitarazlıq vəziyyətinin mövcudluğu mümkündür ki, bu da stasionar paylanma funksiyalarına gətirib çıxarır.

Neftin hazırlanmasının, o cümlədən suyun çıxarılması və duzsuzlaşdırılmasının effektivliyi, emulsiyalaşmış su damcılarının bronlaşmış qabıqlarının aradan qaldırılmasından və onların neft və suya ayrılmasından asılıdır. Təbii emulsifikatorlar tərəfindən formalaşan bronlaşmış qabıqlar damcıların birləşməsinə mane olur, onların molekulyar səviyyədə (0,1-100 nm) dağılması isə əsas mərhələ hesab edilir. Emulsiyaların dayanıqlığına emulsifikatorların fiziki-kimyəvi xüsusiyyətləri, yüklü qarşılıqlı təsirlər, islanma qabiliyyəti, temperatur, deemulqatorların sərfiyyatı və lay suyunun xüsusiyyətləri təsir göstərir.

Su və neft təbəqələri arasında yerləşən aralıq emulsiya qatı mühüm texnoloji funksiyaları yerinə yetirir, koalesensiyanı və süzülməni təşviq edir. Bronlaşmış qabıqlarının yaranma və dağılma prosesləri təbii emulsifikatorların adsorbsiyası, qabıqların islanması və ikili elektrik təbəqəsinin formalaşmasından asılıdır.

Aparılan tədqiqatlar göstərmişdir ki, aralıq emulsiya qatı müxtəlif emulsiyalardan ibarətdir və tərkibində mexaniki qarışıqlar (sulfidlər, gil və s.) vardır. Aralıq emulsiya qatının effektivliyinin qiymətləndirilməsi metodu hazırlanmışdır ki, bu da girişdə xırda dispers emulsiya su damcılarının miqdarının çıxışda çökdürücü suyun qalıq miqdarı ilə müqayisəsindən ibarətdir. Əsas mərhələlər bunlardır:

1. Stoks qanunu əsasında damcıların kritik radiusunun müəyyən edilməsi.

2. Çökdürücünün çıxışında nəzəri su tərkibinin hesablanması.

3. Faktiki su tərkibinin müəyyən edilməsi.

4. Aralıq emulsiya qatının effektivliyinin suyun saxlanma göstəricisi ilə qiymətləndirilməsi.

Fokker-Plank, Darsi və Kozeni-Karman qanunlarına əsaslanan riyazi modellər koalesensiya, damcıların parçalanması və onların

ölçülərinə görə paylanması proseslərini təsvir edir. Məlum olmuşdur ki, neft emulsiyalarının dayanıqlığı ikili elektrik təbəqəsinin yaranması, eləcə də aralıq emulsiya qatının hidravlik filtr kimi funksiyası ilə əlaqəlidir.

Üfüqi və kürə formalı çökdürücülərdə neftin qalma müddətini hesablamaq üçün alqoritmlər hazırlanmışdır

$$\tau_{H1} = (nl/x_1)\sqrt{[6R_1(2R_1 - h_1^*) + (2R_1 - h_1^*)^2]R_1^2/3 - \sqrt{[2R_1(2R_1 - h_1^*) + (2R_1 - h_1^*)^2](R_1 - h_1^*)^2}} \quad (13)$$

$$\tau_{H2} = \pi(2R_2 - h_2^*)^2 (R_2 + h_2^*)/3x_1 \quad (14)$$

Burada:  $n$ -axınların sayını əks etdirən əmsal;  $l$ -üfüqi qurğunun uzunluğu,  $R_1$  və  $R_2$ -müvafiq olaraq üfüqi və kürə formalı qurğuların radiusları;  $h_1^*$  və  $h_2^*$ -üfüqi və kürə formalı qurğularda su yastığı və aralıq emulsiyalı qatın ümumi səviyyəsi;  $x_1$ -sistemdə axının sürətini və ya axına qarşı müqaviməti əks etdirən əmsaldır.

Modellər, susuzlaşdırılmış neftdə qalan suyun miqdarını proqnozlaşdırmağa və neftin termokimyəvi hazırlanma proseslərini optimallaşdırmağa imkan verir.

Təklif olunan riyazi modellər<sup>7</sup> neftin termokimyəvi susuzlaşdırılması proseslərinin hərtərəfli təsvirini təmin edir, o cümlədən koalesensiya, damcılardan parçalanması və onların ölçülərinə görə paylanmasını da əhatə edir. Bu modellər yalnız emulsiyaların dağılma dinamikasını əks etdirmir, həm də neftin hazırlanma texnologiyalarının inkişafı və optimallaşdırılması üçün elmi əsaslı platforma yaradır.

**Beşinci fəsil**, dəniz şəraitində neftin yığılması və daşınması üçün istifadə edilən mürəkkəb quruluşlu boru kəmərlərində asfalt-

---

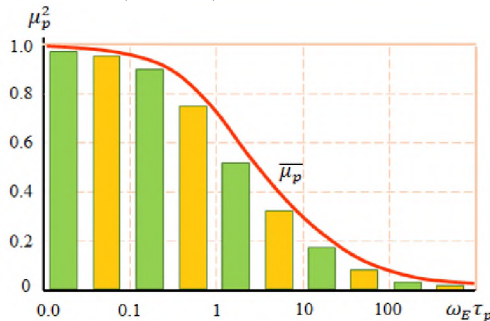
<sup>7</sup> Rzayev, A.G. Modeling of Emulsion Formation and Breaking in Thermochemical Oil Treatment Process / A.G., Rzayev, G.I. Kelbaliyev, G.R. Mustafayeva [et al.] // Chemistry and Technology of Fuels and oils, 2018. Vol.54, №3, - p.249-264.

qətran maddələrin çökməsi zamanı diffuziya-miqrasiya və kristallaşma proseslərinə həsr olunmuşdur.

Çökmə və fazaların yerdəyişməsi prosesləri, neft emulsiyalarının qravitasiya sahəsində ayrılması və təbəqələşməsi proseslərinin əsasını təşkil edir. Bu proseslər hidrodinamik struktur və axın istiqaməti, hissəciklərin qarşılıqlı təsiri, polidispers hissəciklərin ölçü paylanması, onların forması və konsentrasiyası, eləcə də hissəciklərin və daşıyıcı mühitin fiziki-kimyəvi xassələri ilə sıx əlaqəlidir.

Bundan əlavə, fiziki-kimyəvi çevrilmələr, diffuziya ilə ötürülmə və turbulent axınlarda hissəciklərin çökməsi, həmçinin polidispers sistemlərin stoxastik təbiəti də mühüm rol oynayır.

Tədqiqatda<sup>8</sup> maye axınından hissəciklərin çökməsinin xüsusiyyətləri araşdırılmışdır. Göstərilmişdir ki, hissəciklərin ölçüsü artdıqca, onların turbulent mühitin pulsasiya təsiri ilə hərəkət etmə ehtimalı sıfıra yaxınlaşır (şəkil 1).



**Şəkil 1. Pulsasiya təsiri ilə turbulent mühitdə hissəciklərin daxil olma dərəcəsi**

Xırda dispers hissəciklər turbulent mühitin pulsasiya təsirlərinə cavab olaraq daşıyıcı fazanın molekullarına nisbətən pulsasiya hərəkət

<sup>8</sup> Мустафаева, Г.Р. Осаждение твердых частиц из потока суспензий // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2017. №1, - с.33-37.

edir və turbulent diffuziya səbəbindən bütün istiqamətlərdə nizamsız hərəkət edir. Bu parametrlər turbulent axında hissəciklərin miqrasiyası və çökmə dərəcəsini müəyyən etmək üçün mühüm rol oynayır.

Tək hissəciyin yavaş axında və konsentrasionalı dispers axında çökməsi məsələləri öyrənilmişdir. Boru tipli qurğuların daxili səthində hissəciklərin çökməsi məsələsi kiçik Reynolds ədədləri üçün kifayət qədər məlumdur, lakin orta və böyük Reynolds ədədlərində çətinliklər yaranır, çünki modeldə hissəciklərin ətrafında axını təsvir edən qeyri-xətti üzvlər meydana çıxır.

Tək sferik hissəciyin çökmə sürətini təsvir etmək üçün model təklif edilmişdir. Bu model, turbulent axın şəraitində hissəciklərin çökməsi ilə bağlı spesifik məsələnin həlli üçün uyğunlaşdırılmış və emulsiyaların ayrılması və təbəqələşməsi proseslərinin təsvirinə əhəmiyyətli bir töhfə vermişdir.

Tədqiqatda həmçinin yüksək konsentrasionalı dispers axınlardan (məsələn, yüksək konsentrasionalı süspensiyalarda) hissəciklərin çökməsi araşdırılmışdır. Bu cür sistemlər hissəciklər arasındakı qarşılıqlı təsir, çökmənin məhdudlaşdırılması, koagulyasiya və aqlomeratların yaranması ilə xarakterizə olunur. Əsas problem, kiçik hissəciklərin daha böyük hissəciklər tərəfindən tutulduğu qravitasiya koagulyasiyasıdır.

Sferik hissəciklərin çökmə sürətini təsvir etmək üçün ənənəvi olaraq Riçardson-Zaki düsturu tətbiq edilir, burada eksponent göstəricisi  $n$  hissəciklərin ölçüsündən və onların həcm payından asılıdır. Bu düsturlar əsasında və müxtəlif empirik asılılıqlar tətbiq edilərək hissəciklərin məhdud çökmə sürəti aşağıdakı şəkildə təqdim olunur:

$$\frac{v_p}{v_s} = \xi(\varphi, \alpha). \quad (15)$$

Burada:  $\varphi$ -axında hissəciklərin həcmi payı;  $\xi(\varphi, \alpha)$ -mühitin parametrlərinin və hissəciklərin ölçülərinin hərəkətin məhdudluğuna təsirini xarakterizə edən funksiyadır.

Əgər həcm payı  $\phi > 0,8$  olarsa, srspensiyanın özlülüyünün artması səbəbindən yayılma müşahidə olunur. Göstərici həmçinin Qaliley rəqəmi ( $Ga$ ) və digər amillərdən asılıdır. Ədəbiyyatda  $n$ -nin

Qaliley rəqəmindən asılılığına dair mürəkkəb tənliklər verilsə də, bu tədqiqatda  $n$  üçün sadələşdirilmiş ifadə işlənib hazırlanmışdır:

$$n = \frac{4,75}{(1+0,0005Ga^2)^{1/25}} \cdot \quad (16)$$

Burada:  $n$ -dərəcə göstəricisi,  $Ga = \frac{a^3 \rho_c (\rho_d - \rho_c) g}{\eta_c^2}$  -Qaliley ədədidir.

Bu model sadəliyi ilə seçilir, daha az empirik əmsalları ehtiva edir və xüsusilə yüksək  $Ga$  dəyərlərində eksperimental məlumatları daha dəqiq əks etdirir. Təklif olunan model hesablamaları sadələşdirir və konsentrasiyalı axınlarda çökmə proseslərinin təsvirini yaxşılaşdırır.

Dispers axınlardan hissəciklərin çökmə proseslərinin təhlili iki əsas mexanizmi üzə çıxardı: miqrasiya-diffuziya və miqrasiya-qravitasiya mexanizmləri. Hissəciklərin çökməsi bir neçə yolla baş verə bilər: miqrasiya-qravitasiya mexanizmi nəticəsində axın həcmnin daxilindən birbaşa çökmə; hissəciklərin sərhəd qata və borunun divarına daşınması və nəticədə sıx bir qatın yaranması, həmçinin turbulent diffuziya səbəbilə borunun divarına çökmə. Bu cür proseslər, tez-tez neft sənayesində rast gəlinir və boruların daxili səthlərində sıx təbəqənin yaranması ilə müşayiət olunur ki, bu da hidrodinamika, kütlə və istilik mübadiləsinə təsir göstərir. Yaranan təbəqə aşağı istilikkeçirmə qabiliyyətinə malikdir, istilik mübadiləsinin effektivliyini azaldır və hidravlik müqaviməti artırmaqla maddi və enerji xərclərinin yüksəlməsinə səbəb olur.

Bu tədqiqatın məqsədi hissəciklərin çökmə mexanizmlərinin modelləşdirilməsi və onların boru kəmərlərində proseslərə təsirinin təhlilindən ibarətdir. Məqsədə nail olmaq üçün turbulent axınlarda hissəciklərin miqrasiya-diffuziya ilə daşınması və onların boru səthinə çökməsini təsvir edən tənliklər işlənib hazırlanmışdır.

Bu tənliklər proseslərin dinamikası haqqında daha dəqiq məlumat verir və neftin daşınması və emalı üçün effektiv texnologiyalar və avadanlıqların hesablanması mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Tədqiqatın nəticəsi olaraq, hissəciklərin borunun vahid səthinə təsirinin hesablanması üçün aşağıdakı ifadə təqdim edilmişdir:

$$J = -D_T \left( \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=R} = D \left( \frac{RV_D}{v_c} \right)^4 \left( \frac{DV_D^2 R}{v_c^3} \right)^{3/4} x^{-1/4} (C_p - C_0). \quad (17)$$

Burada:  $C$ -hissəciklər konsentrasiyası,  $D_T$ ,  $D$ -müvafiq olaraq turbulent və molekulyar diffuziya əmsalları,  $V$ ,  $V_D$ -sürət və dinamik axın sürəti,  $R$ -borunun radiusu,  $C_p$  və  $C_0$ -hissəciklərin mövcud və ilkin konsentrasiyaları,  $x$ -borunun xarakterik uzunluğudur.

Bu düstur axının özlülüyünün və diffuziya xassələrinin xüsusiyyətlərindən asılı olaraq, hissəciklərin borunun səthinə çökmə prosesini kəmiyyətcə qiymətləndirməyə imkan verir.

Boru kəməri sistemlərindəki əsas problemlərdən biri neftdən parafinlərin kristallaşması və boru kəmərlərində çöküntü əmələ gəlməsidir. Tədqiqatda bu prosesin mexanizmləri öyrənilmiş, boru və istilik mübadilə qurğularında parafinlərin çökməsini təsvir edən diffuziya kinetikasi və model işlənib hazırlanmışdır<sup>9</sup>.

Aşağı temperaturalarda neftdən parafinlərin çökməsi axın parametrlərinə mənfi təsir göstərir. Proses borunun divarlarında parafin və asfalt-qətran maddələrin kristallaşması ilə başlayır, əvvəlcə sərhəd qatda, sonra isə formalaşmış çöküntü qatında davam edir. Radial temperatur və konsentrasiya qradientləri parafinlərin divara diffuziyasını təşviq edir və orada kristallaşmaya səbəb olur. Çöküntü yaranmasının əsas amilləri temperatur, axının sürəti, neftin xüsusiyyətləri və boruların səthinin qeyri hamarlığı ilə bağlıdır. Parafinlər temperaturun azalması zamanı kristallaşır, qeyri hamar səthlərdə adgeziya artır. Asfalt-qətran maddələr isə çöküntünün strukturunu dəyişərək onun dayanıqlığını artıran birləşdirici rol oynayır. Bunu nəzərə alaraq, parafinlərin kristallaşmasını təsvir edən diffuziya modeli hazırlanmışdır, hansı ki, onların çökməsini və bu çöküntülərin hidrodinamikaya təsirini izah edir. Empirik modellərdən

---

<sup>9</sup> Kelbaliyev, G.I. Crystallization of paraffin from the oil in a pipe and deposition of asphaltene-paraffin substances on the pipe walls / G.I. Kelbaliyev, S.R. Rasulov, G.R. Mustafayeva [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2018. Vol.91, №5, - p.1227-1232.

fərqli olaraq, təklif olunan diffuziya modeli proseslərin kinetikasını nəzərə alır və çöküntülərin yaranması və böyüməsini daha dəqiq qiymətləndirməyə imkân verir.

Tədqiqatda neftdən parafinlərin kristallaşma kinetikasını təsvir edən tənlik verilmişdir. Bu tənlik həm parafinlərin maye fazadan bərk fazaya keçməsinə, həm də onun borunun səthinə miqrasiyasını nəzərə alır. Tənlik aşağıdakı kimi ifadə edilmişdir:

$$C(t) = C^*(T)[1 - \exp(-\beta t^n)] \quad (18)$$

Burada:  $\beta$ -kütlə ötürmə əmsalı;  $C$ -sərhəd qatının həcmində parafinin konsentrasiyası;  $C^*$ -temperaturdan asılı olaraq maye və bərk fazalarda parafinin tarazlıq konsentrasiyasıdır.

(18) ifadəsindən görüldüyü kimi, parafin təbəqəsinin maksimal qalınlığına çatdıqda, parafinlərin səthdəki konsentrasiyası tarazlığa uyğun həddə çatır. Bu vəziyyət səthdə parafin təbəqəsinin maksimal qalınlığını müəyyən edir. Əgər parafin çöküntüsünün maksimal qalınlığı borunun radiusuna bərabər olarsa, borunun kəsiyi tamamilə tıxanır və axın tamamilə bloklanır.

Boruların səthində çökmə mexanizmi aşağı temperaturda parafin kristallarının yaranması və böyüməsi, həmçinin sərhəd qatda-neftlə təmasda olan səthdə birbaşa asfalt-qətran maddələrin çökməsindən ibarətdir. Bu çöküntülər yarandıqca, səthdə qətran-parafin təbəqəsi formalaşır və zamanla onun qalınlığı artır. Qeyd etmək lazımdır ki, bu proses sistemin hidrodinamik və istilik-kütlə ötürmə xüsusiyyətlərinə əhəmiyyətli təsir göstərir. Çöküntülərin qalınlığı artdıqca istilik mübadiləsi və hidrodinamik parametrlər pisləşir ki, bu da əlavə enerji və material xərclərinə səbəb olur.

Nəqliyyat borularında və istilik daşıyıcı borularda parafin və asfalt-qətranlı maddələrin çökməsi modeli<sup>10</sup> bu amillər nəzərə alınmaqla ifadə oluna bilər ki, bu da yataqların işlənməsini və onların

---

<sup>10</sup> Келбалиев, Г.И. Моделирование процессов разделения фаз при течении нефтяных дисперсных систем / Г.И. Келбалиев, В.И. Керimli, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2019, №1, - с.68-71.

boru kəməri sistemlərinin fəaliyyətinə təsirini daha dəqiq proqnozlaşdırmağa imkan verir.

$$\delta_s(t) = R[1 - \exp(-m_s t)], \quad (19)$$

Burada:  $m_s = \frac{l_{so}}{2\pi\rho_s R_0^2}$ ,  $\delta_s$  -parafin çöküntüsünün qalınlığıdır.

Modelin eksperimental məlumatlarla müqayisəsi kifayət qədər qanəedici nəticələr göstərmişdir.

Təklif olunan model parafin çöküntülərinin artmasını və onların boru kəməri sistemlərinin fəaliyyətinə təsirini daha dəqiq proqnozlaşdırmağa imkân verir. Təqdim edilən düsturlar göstərir ki, laminar axın şəraitində borularda çöküntü qalınlığının artması hidrodinamiki qeyri-sabitliyə gətirib çıxarır, turbulent axın şəraitində isə bu faktor enerji dissipasiyasının artmasına, turbulentlik miqyasının azalmasına və nəticədə turbulent pulsasiyaların intensivliyinin zəifləməsinə səbəb olur. Beləliklə, boruların səthində kristallaşma, çökmə və sıx təbəqənin əmələ gəlməsi axının hidrodinamikasına, həmçinin istilik və kütlə mübadiləsi proseslərinə əks təsir göstərir. Zaman keçdikcə, əgər axının mərkəzində temperaturun azalması müşahidə olunarsa, parafin hissəcikləri və asfaltenlər axın strukturuna ciddi təsir göstərməyə başlayır. Bu, öz növbəsində, neftin reoloji xüsusiyyətlərini dəyişir. Asfaltenlərin mövcudluğu və nanoqreqatlar və onların klasterləri kimi koagulyasiya strukturlarının əmələ gəlməsi neftin reoloji xassələrinə ciddi təsir göstərir.

Bu strukturlar neftin özlülüyünü dəyişə bilər ki, bu da onun daşınmasını çətinləşdirir və istehsalat göstəricilərinə təsir edir. Bu problemlərin həlli üçün asfaltenlərin və digər bərk fazaların, çirklənmə mənbələri kimi, təmizlənməsi və ayrılması üçün effektiv üsulların işlənilib hazırlanması vacibdir.

Bununla əlaqədar olaraq, müxtəlif aromatik karbohidrogenlərdə asfaltenlərin həllolma analizinə əsaslanan, asfaltenlərdən və bərk hissəciklərdən tullantı sularını təmizlənməsinə yönəlmiş maye fazalı ekstraksiya texnologiyası təklif edilmişdir. “Maye-maye” sistemlərində koalesensiya, parçalanma və kütlə ötürmə proseslərindən istifadə edərək, toluol tətbiqinə əsaslanan ekstraksiya metodikası hazırlanmışdır.



suların asfaltənlər və digər bərk fazalardan təmizlənməsi üçün effektiv bir alət ola biləcəyini təsdiqləyir. Nəticələr göstərir ki, düzgün tənzimlənmiş ekstraksiya şərtləri və fazaların sonrakı ayrılması ilə yüksək dərəcədə təmizləmə əldə etmək mümkündür. Bu işə, ekoloji riskləri minimuma endirmək imkanı yaradır.

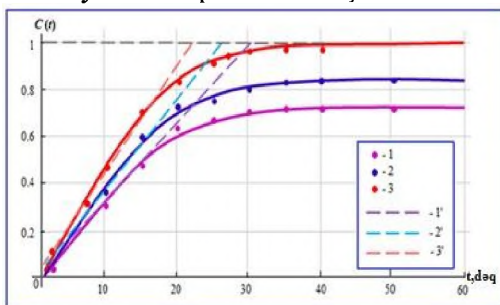
Prosesin kinetikasını təsvir etmək üçün temperatur və diffuziya parametrlərini nəzərə alan kütlə ötürmə tənliyi hazırlanmışdır. Əldə edilmiş eksperimental məlumatlar təklif olunan modelin 20-60°C temperatur diapazonunda asfalt-qətran maddələrin həllolma prosesini uyğun təsvir etdiyini təsdiqləyir.

Asfalt-qətran maddələrin toluolda həllolma prosesini təsvir edən tənlik aşağıdakı şəkildə təqdim edilə bilər:

$$C(t) = C^* \left( 1 - \exp \left( -\alpha t^{\frac{3}{2}} \right) \right). \quad (20)$$

Burada:  $C$ -həll olan maddənin konsentrasiyası,  $C^*$ -tarazlıq konsentrasiyası,  $\alpha$ -turbulent pulsasiyaların əmsalındır.

Tənlik hissəciklərin həlledicidə diffuziya prosesini nəzərə alır və həllolma dinamikasını proqnozlaşdırmağa imkan verir, bu işə ekstraksiya prosesinin optimallaşdırılması və çirkab suların təmizlənməsinin effektivliyinin artırılması üçün vacibdir. Şəkil 3-də müxtəlif temperaturalarda toluolda asfalt və qətran maddələrinin həllolmasının kinetik əyriləri təqdim edilmişdir.



**Şəkil 3. Asfaltənlər və qətranlı maddələrin toluolda müxtəlif temperaturalarda həll edilməsinin kinetik əyriləri:**

1 - 20°C; 2 - 40°C; 3 - 60°C. Düz xətlər asfaltənlər maddələrinin toluolda həll olmasının xətti kinetikasının müvafiq temperaturlarına uyğundur:

1' - 20°C; 2' - 40°C; 3' - 60°C.

**Altıncı fəsil** strukturlu neftlərin reoloji xüsusiyyətlərinin tədqiqinə və onların xassələrinin modelləşdirilməsinə həsr edilmişdir. Xüsusi diqqət dispers sistemlərə ayrılmışdır, burada aqreqativ və sedimentasiya dayanıqlığı mühitin strukturunu müəyyən edir. Bu cür sistemlərdə strukturun formalaşması hissəciklərin aqreqatlarının və ya klasterlərinin yaranması ilə əlaqəlidir ki, bu da onların fiziki xüsusiyyətlərinə ciddi təsir göstərir.

Tədqiqatda strukturlaşma prosesi nəzərdən keçirilir, bu proses hissəciklərin qarşılıqlı təsirini, koaqulyasiya strukturlarının formalaşmasını, özlülüyün dəyişməsinə və digər reoloji parametrləri əhatə edir. Hissəciklərin konsentrasiyasından asılı olaraq özlülüyün dəyişməsinə xarakterizə edən əsas sahələr müəyyən edilmiş və hər bir sahənin xüsusiyyətləri öyrənilmişdir. Strukturlaşma proseslərini nəzərə alaraq dispers sistemlərin özlülüyünü təsvir edən modellər işlənib hazırlanmışdır. Bu, reoloji xüsusiyyətlərin formalaşma mexanizmlərini daha dərinlən anlamağa və müxtəlif şəraitdə strukturlu neftlərin davranışını proqnozlaşdırmağa imkan verir.

Dispers sistemlərin strukturlaşması koaqulyasiya strukturlarının, aqreqatların və hissəciklərin karkas şəbəkələrinin formalaşması ilə bağlı mürəkkəb bir prosesdir. Bu proses mühitin reoloji xüsusiyyətlərini, o cümlədən onun özlülüyünü, hərəkətliliyini və tiksotrop xüsusiyyətlərini müəyyən edir.

Hissəciklərin konsentrasiyasının artması ilə onların arasındakı məsafə azalır, bu isə qarşılıqlı təsir və koaqulyasiya ehtimalının artmasına səbəb olur. Nəticədə, yüksək özlülük və aşağı hərəkətliliklə xarakterizə olunan strukturlu sistemlər formalaşır.

Belə strukturların dağılması xarici mexaniki amillərin təsiri altında baş verə bilər, məsələn, hərəkət sürətinin, təzyiqin və ya axının turbulentliyinin artması ilə. Bu proseslər təkcə karkas strukturlarının dağılmasına deyil, həm də yeni aqreqatların formalaşma dinamikasına təsir göstərir. Turbulent pulsasiyalar hissəciklərin toqquşma tezliyini artırır, bu da mövcud strukturların parçalanmasına və yeni koaqulyasiya əlaqələrinin yaranmasına şərait yaradır.

Xırda dispers hissəciklər bir-birlərinə diametrləri ölçüsündə yaxınlaşdıqda, hidrodinamik qüvvələr və braun diffuziyası vasitəsilə

qarşılıqlı təsirə girirlər, bu isə koaqulyasiya və yeni strukturların formalaşmasına səbəb olur. Belə strukturların formalaşma sürəti hissəciklərin konvektiv və diffuziya daşınması ilə müəyyən edilir.

Prosesin təsviri üçün hissəciklərin hərəkətini hərəkət gərginliyi ilə əlaqələndirən tənliklər<sup>11</sup> istifadə olunur.

Ədəbiyyatdan alınmış eksperimental məlumatlar əsasında dispers mühitin özlülüyünün Pekle rəqəmindən asılı olan yarıempirik ifadəsi əldə edilmişdir. Bu ifadə aşağıdakı düsturla təqdim edilir:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \exp\left(-mPe^{\frac{1}{2}}\right), \quad (21)$$

Burada:  $\eta$ -sistemin effektiv özlülüğü;  $\eta_0, \eta_{\infty}$ -neftin ilkin ( $\tau \leq \tau_0$ ) və son dinamik özlülüğü ( $\tau \gg \tau_0$ );  $Pe = \frac{\alpha}{D} \dot{\gamma} = \frac{6\pi\alpha^3\eta}{k_BT} \dot{\gamma}$  -Pekle ədədi və ya axının ölçüsüz sürəti;  $m$ -sferik hissəciyin kütləsidir.

Yüksək Pekle ədədləri ( $Pe$ ) zamanı sistem hissəciklərin yüksək konsentrasiyası ilə xarakterizə olunur ki, bu da tam strukturlaşmaya uyğun gəlir. Bu ifadə özlülüğün həcm konsentrasiyasından asılılığının deformasiyalı sahədə və sonrakı strukturlaşma mərhələlərindəki xarakterini göstərir.

Axında özlülüğün azalması sahəsi Pekle ədədi ( $Pe = 1$ ) ətrafında müşahidə olunur, burada hidrodinamiki və braun qüvvələri bərabər olur.  $Pe > 1$  olduqda özlülük  $\eta \rightarrow \eta_{\infty}$ -ə yaxınlaşır, bu isə yüksək axıcılıq sərhədi ( $\dot{\gamma}$ )-dəyərlərində mümkündür.

Beləliklə, kəsilmə sahəsində koalesensiyanın öyrənilməsi strukturların formalaşma dinamikasının dispers sistemlərin reoloji xüsusiyyətlərinə təsirini müəyyən etməyə imkan verir ki, bu da strukturlu neftlərin modelləşdirilməsində mühüm mərhələdir.

Özlülük reoloji mayelərin əsas parametridir, onların hərəkətililiyini müəyyən edir. Dispers sistemlərdə özlülük hərəkət gərginliyindən, hissəciklərin konsentrasiyasından, ölçülərindən və formalarından asılıdır. Xırda dispers sferik hissəciklərə malik olan

---

<sup>11</sup> Kelbaliyev, G.I., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. Viscosity of Structured disperse Systems // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2018. №3, - p.404-411.

həddindən artıq seyrək mühitlər üçün Eynşteyn tənliyi istifadə olunur. Lakin, daha mürəkkəb sistemlər üçün özlülüyün hissəciklərin konsentrasiyasından asılılığını ifadə edən çoxsaylı empirik formullar, məsələn, Barni və Mazrahi tənlikləri təklif edilmişdir.

Əksər formullar strukturlaşmanı nəzərə almır, bu isə özlülük ayrısını dəyişdirir. Tədqiqatda strukturlaşmanı nəzərə alan dispers sistemlərin özlülüyünü hesablamaq üçün model yaradılmışdır. Eksperimental məlumatların təhlili göstərir ki, strukturlaşmanın başlanğıcında özlülük yarımempirik tənliyə tabe olur:

$$\frac{\eta}{\eta_c} = \frac{\eta_0 - \eta_s}{\eta_c} \exp \left[ -\frac{k}{2} (\varphi - \varphi_s)^2 \right]. \quad (22)$$

Burada:  $\eta_c$ -mühitin özlülüğü;  $\eta_s$ -dinamik özlülük;  $\varphi$ -hissəciklərin həcmdəki konsentrasiyası;  $\varphi_s$ -hissəciklərin struktur formalaşmasının başlanğıcındakı konsentrasiyası;  $k$ -empirik əmsaldır.

Bu model, laminar axından strukturlaşmanın başladığı şəraitə keçid zamanı özlülüyün dəyişməsinə nəzərə almağa imkan verir. Bu, xüsusilə tiksotrop xüsusiyyətlərə malik sistemlər, məsələn, polietilen əlavələri olan asfalt kompozisiyaları və ya neft emulsiyaları üçün mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Strukturlaşma zamanı özlülüyün konsentrasiyadan asılılığı, hissəciklərin həcm payının reoloji xüsusiyyətlərə təsirini göstərir. Həmçinin, bu asılılıq hissəciklərin konsentrasiyasının azalması və ya sürüşmə gərginliyinin artması ilə aqreqatların dağılmasının mümkünlüyünü göstərir. Bu əlaqələr dispers sistemlərin xassələrinin modelləşdirilməsində və optimallaşdırılmasında praktik tətbiq tapa bilər.

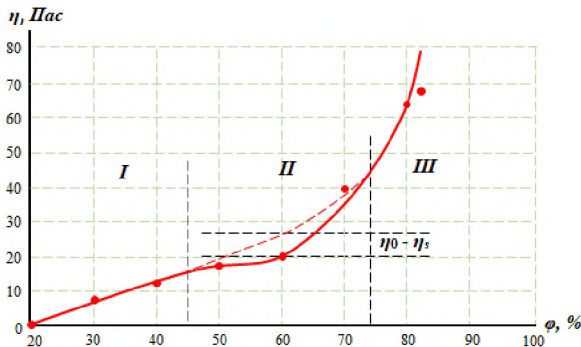
Şəkil 4-də özlülüyün neft emulsiyasında su damcılarının tərkibindən asılılığı təqdim edilmişdir, bu isə aşağıdakı tənliklə ifadə olunur:

$$\eta = (-11,6 + 0,6\varphi) \exp \left[ \frac{2,8\varphi}{(\varphi - 100)^2} \right] - 7 \exp[-0,01(\varphi - 60)^2] \quad (23)$$

Bu düstur, dispers mühitin nisbi özlülüyünü hesablamağa imkan verir. Burada Muradxanlı yatağından hasil edilən neftin dinamik özlülüğü ilkin dəyər kimi qəbul edilir və təxminən  $\eta_c \approx 14$  Pas təşkil edir.

Özlülüyn hissəciklərin həcmi konsentrasiyasından asılılığının ümumiləşdirilmiş formasını aşağıdakı düsturla ifadə etmək olar:

$$\frac{\eta}{\eta_c} = 1 + 2.5\varphi + A_0\varphi \exp\left(\frac{m\varphi}{(\varphi - \varphi_\infty)^2}\right) - A_1 \exp(k(\varphi - \varphi_s)^2) \quad (24)$$



**Şəkil 4. Neftin özlülüynün su təminatından asılılığı**

Bu düsturun son üzvü sistemdə strukturlaşmanın başlanğıcını xarakterizə edir və hissəciklərin konsentrasiyasının artması ilə onların sıxlaşması və strukturun formalaşmasının başladığını, bunun isə özlülük əyrisinin deformasiyasına səbəb olduğunu göstərir.

Sabit bərk hissəcik qatında və axında strukturlaşma hissəciklərin hərəkət sərbəstliyi ilə fərqlənir. Sabit qatda axın özlülük, hərəkət gərginliyi və məsələliliyinin dəyişməsi ilə xarakterizə olunur.

Eksperimental məlumatlara və ədəbiyyatda verilmiş tənzimləmələrə görə, dispers sistemin effektiv özlülüynü hissəciklərin həcm payından və ölçüsündən əhəmiyyətli dərəcədə asılıdır. Hissəciklərin ölçüləri artdıqda effektiv özlülük artır. Bu, böyük hissəciklərdə koagulyasiya strukturlarının və ya aqreqatların yaranmaması ilə bağlıdır, sistem isə sadəcə sıx şəkildə yerləşmiş hissəcikləri təşkil edir, bu da özlülüynün artmasına gətirib çıxarır.

Hərəkətsiz təbəqəni bir-biri ilə elastik əlaqəli hissəciklər zənciri kimi təsəvvür etmək mümkündür, onların arasında maye yerləşir. Bu halda, strukturlaşmış hissəcik təbəqəsinin həcmi özlülüynü aşağıdakı kimi müəyyən edilir:

$$\eta_v = \frac{4}{3} \eta_s \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}, \quad (25)$$

Qeyd etmək lazımdır ki, özlülüyün hesablanması üçün verilmiş düsturlar fenomenoloji deyil, eksperimental məlumatlara əsaslanan yarıempirik ifadələrdir. Bununla belə, onlar dispers mühitin strukturlaşma şəraitində özlülük əyrisinin dəyişmə xarakterini, uğurla təsvir edir. Strukturlaşmış sistemlərin formalaşma prosesi neftdə hissəciklərin tərkibindən (həcm payından), onların qarşılıqlı təsir gücündən və intervalından asılıdır. Hissəciklərin aqreqasiyası onların müəyyən ehtimalda toqquşması zamanı baş verir ki, bu da koaqulyasiya strukturlarının və aqreqatların yaranmasını təşviq edir.

Aqreqativ cəhətdən qeyri-sabit dispers neft sistemləri strukturlaşma, koaqulyasiya və asfalten hissəciklərinin parçalanması nəticəsində dəyişir, bu isə onların həcm və ölçülərinə təsir edir. Hissəciklərin qarşılıqlı təsiri özlü elastik karkasın yaranmasına səbəb olur, bu da neftin özlülüyünə və reoloji xassələrinə təsir edir.

Asfalten hissəcikləri koaqulyasiya nəticəsində flokkullar əmələ gətirir, bu flokkullar boruların və kollektorların səthində çökə bilər. Nanoaqreqatlar yüksək özlülüklü bir struktur formalaşdırır və tiksotrop xassələrə malikdir: təzyiq azaldıqda strukturlaşma baş verir, gərginlik artdıqda isə karkas dağılır.

Bu səbəbdən, hissəciklərin aqreqasiyası və onların özlülüyə təsirini nəzərə alan neft sistemləri üçün reoloji modelin işlənilməsi zəruridir.

Asfalten hissəciklərinin koaqulyasiya modelləri və nanoaqreqatların ölçülərinin hesablanması üçün aşağıdakı tənliliklər təklif edilmişdir.

Neftin həcmində asfalten hissəciklərinin laxtalanmasının öyrənilməsi prinsipi onların molekulyar təsirlərə görə ötürülməsinə əsaslanır. Bu prosesdə radius  $R \approx (1,5 - 2,0)$  sferasına daxil edilmiş stasionar hissəcik buraxılır. Ehtimal olunur ki, bu kürədən keçən hər hansı hissəcik seçilmiş hissəciklə toqquşma və laxtalanma ehtimalı yüksəkdir. Bu şərtə əsasən, asfalten hissəciklərinin laxtalanması və

nanoaqreqatların ölçülərinin hesablanması modelləri<sup>12</sup> təklif olunur ki, bu da onların böyüməsini və ölçülərini hesablamaq üçün aşağıdakı tənliklər şəklində təqdim edilə bilər:

$$a_g = a_{g_\infty} \left[ 1 - \exp \left( -C_0 \varphi_0 \left( \frac{\varepsilon_R}{\nu_c} \right)^{1/2} t \right) \right]^{1/3} \quad (26)$$

Burada:  $a_g$ ,  $a_{g_\infty}$  -aqreqatın müfəfiq olaraq cari və maksimal ölçüsü;  $C_0$ -eksperimental məlumatlara əsasən müəyyən edilən əmsal;  $\varepsilon_R$ - mühitin məsaməlilik parametridir.

Koaqulyasiya və aqreqasiya nəticəsində yaranan aqreqatlar çoxsaylı kiçik hissəciklərdən ibarətdir, bu hissəciklər bir-biri ilə bağlıdır və boş quruluşa malikdir, baxmayaraq ki, onların sıxlığı mərkəzə doğru artır. Strukturlaşdırılmış neft dispers sistemlərinin reoloji xassələrini yaxşılaşdırmaq üçün asfaltenlərin özlü-elastik çərçivəsinin sürət və ya təzyiq qradienti kimi xarici qüvvələrin təsiri altında mexaniki məhv edilməsi lazımdır. Karkasın dağıdılması ilk növbədə özlülüyün əhəmiyyətli dərəcədə azalmasına və dispers sistemin hərəkətliliyinin artmasına gətirib çıxarır, bu da onun emal və nəqli üçün daha əlverişli olmasını təmin edir. Strukturun dağıdılması şərtləri təhlil edilmiş və Maksvell tənliyi ilə özlülüyün və hərəkətliliyin dəyişməsi modelləri nəzərə alınmaqla neft dispers sistemlərinin süzülmə reoloji modelləri təklif edilmişdir.

Bu faktorların neft sistemlərinin süzülmə xüsusiyyətlərinə təsiri temperatur, hissəciklərin konsentrasiyası və mühitin digər xarakteristikalarından asılı olan parametrlər vasitəsilə təhlil edilmişdir. Asfalten hissəciklərinin koaqulyasiya və aqreqasiyası, həmçinin onların deformasiya və parçalanma proseslərinin baş verdiyi strukturlaşmış neft sistemləri üçün süzülmə qanunu klassik formadan kənara çıxır. Bu, asfalten hissəciklərinin özlüelastik karkasının xarici qüvvələrin (sürət və ya təzyiq qradientləri kimi) təsiri altında strukturunun dəyişməsi ilə izah olunur. Nəticələr mövcud

---

<sup>12</sup> Kelbaliyev, G.İ. Rheology of structured oils / G.I. Kelbaliyev, S.R. Rasulov, G.R. Mustafayeva [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2017. Vol.90, №4, - p.996-1002.

eksperimental məlumatlarla müqayisə edilmişdir, bu da təklif olunan modellərin aktuallığını təsdiq edir.

Strukturlaşmış neft sistemləri üçün süzülmə sürətinin tənliyi aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$V = K_1(T)(1 - \exp(-\alpha_1(T)(z/z_0)^6))z. \quad (27)$$

Burada:  $K_1$ -süzülmə əmsalı;  $T$ -temperatur;  $z = gradP$ ,  $z_0 = (gradP)_0$ ;  $K_1 = 3,01 \times 10^{-5} \exp(0,01824T)$ .

Təzyiq qradientindən asılı olaraq anomal neftin effektiv özlülüyünün dəyişməsi eksperimental məlumatlara əsasən empirik formul ilə təsvir edilmişdir:

$$\frac{\eta^* - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \exp(-30z^6) \quad (28)$$

Aşağı axın sürətlərində neftin effektiv özlülüüyü hərəkət sürəti və ya təzyiq qradientindən asılı olaraq dəyişir: özlülük maksimal dəyərdən minimal dəyərə qədər azalır və daha sonra sabitləşir. Bu nəticələr süzülmə prosesində özlülüyn dəyişmə dinamikasını təsdiq edir və onun təzyiq qradientindən necə asılı olduğunu göstərir.

Verilmiş tənliklər müxtəlif yataqlardakı məsaməli qatlarda neftlərin süzülmə prosesinin hesablanması üçün tətbiq oluna bilər, burada neftin özlülüüyü və keçiricilik əmsalı onun hərəkətililiyinə əhəmiyyətli təsir göstərə bilər.

## NƏTİCƏLƏR

1. Qeyri-Nyuton (anomal) neftlərin davranışını təsvir etmək üçün eksponensial qanuna əsaslanan bir riyazi model işlənib hazırlanmışdır. Bu model sürüşmə gərginliyinin kəskin dəyişməsinə nəzərə alaraq onun dəyərlərini müəyyən etməyə imkan verir [2].

2. Üfüqi boru kəmərlərində və neft quyularının gövdələrində istilik ötürülməsi proseslərinin mövcud vəziyyəti sisteməlik şəkildə təhlil edilmişdir. Boru arasına boşluqda yerləşən maye və qazın istilikkeçirmə qabiliyyəti və geometriya qradienti nəzərə alınmaqla istilik ötürmə prosesini təsvir edən yeni adekvat riyazi model təklif edilmişdir [3].

3. Göstərilmişdir ki, neftin kollektor laylarının kapilyarlarında strukturlaşma prosesi özlülüyn zamanla dəyişməsi vasitəsilə təsvir edilə bilər. Bu dəyişməni adekvat şəkildə təsvir edən eksponensial xarakterli riyazi model təklif edilmişdir. Model neftin özlülüynünün doymuş laylara təsirini nəzərə alır və çətin hasil olunan neft yataqlarının işlənməsi problemlərinin həlli üçün istifadə edilə bilər [10].

4. Asfaltın hissəciklərinin məsamələrdə çökməsi zamanı məsaməli mühitin sıxlaşma modelləri işlənib hazırlanmış, həmçinin qeyri-stasionar süzülmə tənliyinin həlləri əldə edilmişdir. Bu həllər əsasında məsaməli mühitin süzülmə xüsusiyyətlərini qiymətləndirmək üçün ifadələr təklif edilmişdir. Süzülmə sürətinin pulsasiya xarakterli zəifləməsini qiymətləndirmək üçün tənlik təklif olunmuşdur. Qeyd edilmişdir ki, neftin layda süzülmə prosesində pulsasiya xarakterli zəifləməsi yuxarıdakı layların ağırlığı altında təbii sıxlaşma ilə əlaqədardır [11].

5. Reynold ədədlərinin geniş diapazonunda Darsi ədədini ümumi şəkildə təsvir etmək üçün yarıempirik ifadə təklif edilmişdir [5].

6. Dispers hissəciklərinin toqquşma tezliyini təyin etmək üçün hissəciklərin paylanma funksiyasını nəzərə alan model işlənib hazırlanmışdır. Bu düstur dispers fazanın hissəciklərinin ölçüləri üzrə paylanmasının toqquşma tezliyinə təsirini tam şəkildə nəzərə alır [7].

7. Su damcılarının səthində asfalt-qətran maddələrdən adsorbsiya qatının yaranmasını təsvir edən diffuziya modeli təklif edilmiş, həmçinin onun qalınlığını qiymətləndirmək üçün düstur təqdim olunmuşdur. İzotrop turbulent axında damcıların koalesensiya və parçalanmasının birgə prosesini təsvir edən model işlənib hazırlanmışdır. Damcıların sayının və ölçülərinin zamana görə təkamülünü qiymətləndirmək üçün parçalanma və koalesensiya tezliklərindən asılı tənliklər təklif edilmişdir [25].

8. Neft çirkab sularının təmizlənməsi üçün həlledicinin təkrar dövriyyəsi ilə həyata keçirilən bir texnologiya işlənib hazırlanmışdır. Bu texnologiya ekoloji və iqtisadi baxımdan sərfəlidir, çünki ətraf mühiti çirkəndirən neft tullantılarını effektiv şəkildə zərərsizləşdirir. Bundan əlavə, təklif olunan proses tamamilə tullantısızdır [12].

9. Çökmə mexanizmlərini təsvir edən riyazi modellər işlənib hazırlanmış və mövcud eksperimental məlumatlarla müqayisə edilmişdir. Parafinlərin diffuziya kinetikasi tədqiq edilmiş və onların nəqliyyat və istilik mübadilə borularında çökməsini təsvir edən model verilmişdir [18,27].

10. Aromatik həlledicidə asfalt-qətran maddələrin temperaturdan asılı olaraq həllolma prosesini təsvir edən kinetik model qurulmuşdur. Model sərhəd təbəqədə izotrop turbulentlik şəraitində kütlə ötürməyə əsaslanır. Hissəcik səthində diffuziya və konvektiv axınların bərabərliyini nəzərə alan kinetik tənlik işlənib hazırlanmışdır. Həmçinin sərhəd qatda həll olmuş maddənin konsentrasiyasının xətti və qeyri-xətti paylanması üçün kinetik asılılıqlar və həllolma əmsalları müəyyən edilmişdir [21].

11. Strukturlaşmış dispers sistemlərin reoloji xassələrini nəzərə almaqla özlülüyün hesablanması üçün ümumiləşdirilmiş tənlik təklif edilmişdir. Strukturlaşma mərhələsində özlülük əyrisinin xarakterik xüsusiyyətləri aşkar edilmişdir. Strukturlaşmış dispers sistemlərin özlülüyü üçün müxtəlif tənliklər nəzərdən keçirilmiş və eksperimental məlumatlarla müqayisə aparılmışdır [24].

12. Strukturlaşmış neftlərin reologiyasına dair araşdırmalara əsaslanaraq, asfalten hissəciklərinin molekulyar və turbulent diffuziyasından istifadə etməklə nanoaqreqatların ölçülərinin və kütləsinin zamanla dəyişməsini qiymətləndirən tənliklər əldə

edilmişdir. Bundan əlavə, Maksvell tənliyinin həllinə əsaslanan süzülmə və özlüelastik maye üçün reoloji modellər təklif edilmişdir. Eksperimental məlumatları qənaətbəxş şəkildə təsvir edən iki yarıempirik reoloji model də təqdim edilmişdir [20].

## **DİSSERTASIYA İŞİNDƏ NƏŞR EDİLMİŞ ƏSƏRLƏRİN SİYAHISI**

1. Rzayev, Ab.H., Kelbaliyev, G.I., Mustafayeva, G.R. [et al.] Sealing of oil reservoir as a result of deformation and sedimentation of various additives // Science & applied engineering quarterly, London, 2014. №4, - p. 6-11.

2. Расулов, С.Р., Рзаев, Аб.Г., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Математическое моделирование поведения аномальных (неньютоновских) нефтей // Ученые записки НИИ «Геотехнологические проблемы нефти и газа и химия», 2014. Т.XV, - с. 70-75.

3. Гулуев, Г.А., Рзаев, Аб.Г., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Математическое моделирование процесса теплопередачи в стволе нефтяных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2015. №1, - с. 44-47.

4. Рзаев, Аб.Г., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Разработка метода оценки состояния нефтяной залежи // Нефтепромысловое дело, 2015. №5, - с. 21-23.

5. Келбалиев, Г.И., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Проблемы нелинейностей уравнений фильтрации нефтей в пористых средах // Нефтепромысловое дело, 2015. №8, - с.23-26.

6. Расулов, С.Р., Оруджев, В.В., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Уплотнение нефтяного пласта в результате деформации и осаждения различных примесей // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2015. №4, - с. 101-112.

7. Рзаев, Аб.Г., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Определение частоты столкновения частиц в полидисперсных системах // Ученые записки НИИ «Геотехнологические проблемы нефти, газа и химия», 2015. Т. XVI, - с.433-438.

8. Kelbaliyev, G.İ., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. [et al.] Ecological aspects of extraction process of organic solution from sewage by recycling // Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2016. №2, - p.111-120.

9. Рзаев, Аб.Г., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Оценка реологических характеристик аномальных нефтей и нефтяных эмульсий // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2016. №3, - с.55-58.

10. Расулов, С.Р., Рзаев, Аб.Г., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Математическое моделирование процесса структурообразования нефти в пласте-коллекторе нефтяных месторождений // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2016, №3, - с.98-101.

11. Келбалиев, И.Г., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Моделирование фильтрации нефтей в пористой среде и технология жидкофазной экстракции асфальтенов // Теоретические основы химической технологии, 2016. Т.50, №6, - с.673-682.

12. Сулейманов, Г.З., Расулов, С.Р., Мустафаева Г.Р. [и др.] Использование жидкофазной экстракции в процессе очистки нефтяных сточных вод // Нефтепромысловое дело, 2016. №11, - с.55-59.

13. Расулов, С.Р., Келбалиев, Г.И., Мустафаева, Г.Р. Моделирование процессов фильтрации аномальных структурированных нефтей // Сборник тезисов международной научно-технической конференции посвященной памяти академика А. Х. Мирзаджанзаде, г. Уфа, 2016, - с.295-297.

14. Рзаев, Аб.Г., Нуриева, И.А., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Интенсификация процесса динамического отстоя нефтяной эмульсии // Азербайджанское нефтяное хозяйство, 2016. №11, - с.39-43.

15. Келбалиев, Г.И., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Механика и реология нефтяных дисперсных систем // Москва, Изд-во. «Маска», 2017. - 462 с.

16. Мустафаева, Г.Р. Определение вязкости структурированных нефтяных дисперсных систем // Сборник материалов Международной научно-практической конференции,

приуроченной к 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан, г. Альметьевск, 2016, - с.40-43.

17. Мустафаева, Г.Р. Основные характеристики турбулентного течения нефтяных дисперсных систем // Сборник материалов Международной конференции «Рассохинские чтения», г.Ухта, 2017. Часть 1, - с.231-234.

18. Мустафаева, Г.Р. Осаждение твердых частиц из потока суспензий // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2017. №1, - с.33-37.

19. Kelbaliyev, G.İ., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. [et al.] Rheology of structured oils // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2017. Vol.90, №4, - p.996-1002.

20. Kelbaliyev, G.I., Tagiyev, D.B., Mustafayeva, G.R. [et al.] Rheology of Structural oil disperse Systems // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2017. №5, - p.729-735.

21. Tagiyev D.B., Kelbaliyev, G.I., Mustafayeva, G.R. [et al.] Dissolution kinetics of asphaltresinous materials in aromatic solvents // Chemistry and Technology of Fuels and Oils 2017. Vol.53, №3, - p.345-351.

22. Мустафаева, Г.Р. Разрушение эмульсий в постоянном электрическом поле // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2017. №3, - с. 100-103.

23. Мустафаева, Г.Р. Особенности осаждения и образования плотного слоя частиц на внутренней поверхности труб // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2018. №2, - с.61-65.

24. Kelbaliyev, G.I., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. Viscosity of Structured disperse Systems // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2018. №3, - p.404-411.

25. Kelbaliyev, G.İ., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. Modeling of Phenomena of Drop Coalescence in Oil Emulsion Breaking Processes // Chemistry and Technology of Fuels and oils, 2018. №2, - p.158-165.

26. Rzayev, A.G., Kelbaliyev, G.I., Mustafayeva, G.R. [et al.] Modeling of Emulsion Formation and Breaking in Thermochemical Oil Treatment Process // Chemistry and Technology of Fuels and oils, 2018. Vol.54, №3, - p.249-264.

27. Kelbaliyev, G.I., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. [et al.] Crystallization of paraffin from the oil in a pipe and deposition of asphaltene-paraffin substances on the pipe walls // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2018. Vol.91, №5, - p.1227-1232.

28. Мустафаева, Г.Р. Реологические модели, присущие течению неньютоновских нефтей // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2018. №4, - с.40-42.

29. Келбалиев, Г.И., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Реологические свойства структурированных нефтяных дисперсных систем // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2019, №1, - с.54-60.

30. Келбалиев, Г.И., Керимли, В.И., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Моделирование процессов разделения фаз при течении нефтяных дисперсных систем // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2019, №1, - с.68-71.

31. Сальников, А.В., Ягубов, Я.Х., Салаватов, Т.Ш., Мустафаева Г.Р. [и др.] Экспериментальная оценка адгезионных свойств внутреннего гладкостенного покрытия трубопроводов к асфальтосмолопарафинистым отложениям нефтей Ярегского месторождения// Socar Prossedings, 2020, №1, - с.51-58.

32. Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. Hydrodynamic features of suspensions and emulsions flows // News of the National Academy of Sciences of the republic of Kazakhstan, Series Chemistry and technology, 2021. Vol.2, №446, - p.99-104.

33. Мустафаева, Г.Р. Влияние асфальтосмолистых веществ на разделение нефтяных эмульсий. Сборник тезисов международной научно-тех. Конференции // Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей // г. Ухта, 2022, - с.149-153.

34. Келбалиев, Г.И., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. Очистка нефтесодержащих сточных вод синергетической смесью // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2023, № 3, - с.35-39.

35. Келбалиев, Г.И., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.]  
Зависимость вязкости нефтяных эмульсий от содержания частиц  
и воды // Оборудование и технологии для нефтегазового  
комплекса, 2023, №6, - с.24-28.

**Həmmüəlliflərlə birgə işlərdə iddiaçının şəxsi fəaliyyəti:**

[16,17,18,22,23,28,33] - müəllifin sərbəst hazırladığı işlər.

[10,11,15,19,20,21,24,32,34,35] - işlərində müəllif məsələnin  
qoyuluşunu formalaşdırmış, həll üsulu təklif etmiş, nəticələrin  
doğruluğunun yoxlanılmasında iştirak etmişdir.



Dissertasiyanın müdafiyyəsi 15 aprel 2025-ci il tarixində saat 11<sup>00</sup>-da Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən BED 2.03 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcəkdir.

Ünvan: AZ1010, Azərbaycan, Bakı şəhəri, D.Əliyeva küçəsi 227.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiyaların və avtoreferatların elektron versiyaları Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 11 mart 2025-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 10.03.2025

Kağızın formatı: A5

Həcm: 78091

Tiraj: 30